



MITIGAÇÃO DE PROBLEMAS NA EXTRUSÃO DE COMPONENTE PARA PNEUS: ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

ANDRÉ FILIPE ALMEIDA SILVA

julho de 2020

MITIGAÇÃO DE PROBLEMAS NA EXTRUSÃO DE COMPONENTE PARA PNEUS: ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

André Filipe Almeida Silva

1150658

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

MITIGAÇÃO DE PROBLEMAS NA EXTRUSÃO DE COMPONENTE PARA PNEUS: ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

André Filipe Almeida Silva

1150658

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva e coorientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Professores Adjuntos do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutora Sandra Cristina de Faria Ramos
Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor António Manuel de Bastos Pereira
Professor Auxiliar com Agregação, Universidade de Aveiro

AGRADECIMENTOS

Concluído este trabalho, que se traduz no encerramento de um ciclo muito importante na minha vida, endereço os meus sinceros agradecimentos...

Ao engenheiro Francisco Silva, por me ter encaminhado para este projeto, por acreditar em mim, nas minhas capacidades e no meu trabalho. Pelo excelente acompanhamento, motivação, dedicação e espírito de sacrifício com que trata os seus alunos.

Ao engenheiro Raul Campilho pelo apoio com a utilização do *software* de simulação e por me direcionar no melhor caminho para o sucesso deste trabalho.

Ao engenheiro Pedro Neves, pelo incrível apoio diário e conhecimentos transmitidos. Pela sua personalidade exemplar e por tornar este estágio, numa enorme mais-valia pessoal e profissional.

À equipa do departamento da Engenharia 3, por me darem oportunidade de expor as minhas propostas de solução e ajudarem na implementação das mesmas.

À equipa da Continental Mabor, colegas de gabinete e restantes departamentos, pelo apoio diário e pelas excelentes condições de trabalho, fazendo-me sentir como um deles.

Aos meus pais e irmã, por todo o apoio e sacrifícios que fizeram para eu conseguir chegar até aqui, mostrando diariamente um suporte essencial.

Aos meus amigos, e colegas de turma, Eduardo Amaral, Vítor Santos, Rubén Resende e Pedro Preto pelo apoio diário durante a realização desta dissertação, dando sempre uma palavra de incentivo e aconselhamento.

À minha amiga Margarida Matos que acompanhou todo o meu progresso e me ajudou nos momentos de maior dificuldade e insegurança, realçando sempre o lado positivo de cada situação. Por ser uma pessoa com uma energia contagiante e por acreditar nas minhas capacidades.

PALAVRAS CHAVE

Indústria automóvel; *Cap ply*; Dinâmica de Fluidos Computacional; Termografia; Microcontrolador; Melhoria do processo; Revestimentos técnicos; Rugosidade superficial.

RESUMO

Atualmente, na área da mobilidade, os pneus desempenham um papel importante. Os pneus são componentes constituídos por várias camadas de materiais distintos, tais como, compostos de borracha, aço e cordas de poliamida. Entre o piso e as cintas metálicas, existe uma camada formada por cintas de *cap ply*, que são enroladas múltiplas vezes. Estas cintas restringem a expansão do pneu, quando sujeito a forças centrífugas.

Alguns dos principais problemas das *Cap strip*, máquinas onde se produz o *cap ply*, estão relacionados com as condições de controlo de temperatura do cabeçote da máquina. Durante a extrusão do composto de borracha, o mesmo flui através de uma extrusora, passando por uma bomba de engrenagens e chegando, finalmente, a um cabeçote, onde o escoamento termina numa fieira, ocorrendo aí a impregnação das cordas têxteis de poliamida. Na fase de escoamento no cabeçote, o incorreto controlo de temperatura origina a vulcanização prematura de composto de borracha e também a falha de impregnação, diminuindo assim a qualidade das cintas de *cap ply*, e originando grandes volumes de desperdício.

A dissertação aqui apresentada, foi desenvolvida na empresa Continental Mabor – Indústria de pneus S.A., no Departamento de Apoio Técnico à Produção, onde foram executados vários ensaios experimentais e análises numéricas para a melhoria do processo de produção de *cap ply*.

Foram estruturadas análises numéricas de dinâmica de fluidos computacional, de forma a simular o escoamento de composto de borracha e as trocas de energia térmica no interior do cabeçote. Em paralelo com as análises numéricas, foram realizados ensaios laboratoriais para obter dados relativos às propriedades do composto de borracha em análise, e também ensaios experimentais, tais como, a recolha de imagens termográficas, o estudo da superfície interna do cabeçote com recurso a técnicas de análise de rugosidade superficial, a execução de ensaios de extrusão e criação de rotinas de registo dos parâmetros de máquina com recurso a um microcontrolador. Com os resultados obtidos, foi possível elaborar um novo controlo de temperatura do cabeçote, que revelou ser extremamente eficaz.

Posto isto, as empresas, que trabalham com equipamentos de produção de *cap ply* e, outros equipamentos de extrusão de compostos de borracha, podem aplicar as soluções implementadas neste projeto, melhorando a qualidade das cintas produzidas, reduzindo os custos de produção e tempos de produção e aumentando o nível de segurança para os operadores.

KEYWORDS

Automobile industry; Cap ply; Computational Fluid Dynamics; Thermography; Microcontroller; Process improvement; Coatings technology; Surface roughness.

ABSTRACT

Currently, in the area of mobility, tires play a key role. Tires are components formed by several layers of different materials, such as rubber compounds, steel and polyamide cords. Between the tread and steel belts, there is a layer of cap ply belts, which are wrapped multiple times. These belts restrict the tire growth when subjected to centrifugal forces.

Some of the main problems in Capstrip lines, the machines where cap ply is produced, are related to the temperature control of the extruder head. During the extrusion of the rubber compound, it flows through an extruder, passing through a gear pump and finally reaching the extruder head, where the flow ends in a die, with the impregnation of the polyamide cords. In the flow phase, inside the extruder head, an incorrect temperature control leads to premature vulcanization of the rubber compound and lack of impregnation, thus reducing the quality of cap ply belts, and causing large volumes of waste.

The dissertation presented here was developed at Continental Mabor – Indústria de pneus S.A., in the Departamento de Apoio Técnico à Produção, where several experimental tests and numerical analyses were performed to optimize the production process of cap ply.

Numerical analyses of computational fluid dynamics were structured to simulate the flow of rubber compound and thermal energy exchanges inside the extruder head. In parallel with numerical analyses, laboratory tests were performed to obtain data on the properties of the rubber compound under analysis, as well as experimental tests, such as the collection of thermographic images, the study of the inner surface of the extruder head through surface roughness analysis techniques, the execution of extrusion tests and the creation of machine parameter recording routines using a microcontroller. With the results obtained it was possible to elaborate a new temperature control for the extruder head, which proved to be extremely effective.

Thus, companies working with cap ply production equipment and other rubber compound extrusion equipment can apply the solutions implemented in this project, improving the quality of the belts produced, reducing production costs, production times and increasing the level of safety for operators.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
a.C.	Antes de Cristo
AG	<i>Automotive Group</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado
BR	<i>Butadiene Rubber</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i>
DE	Departamento de Engenharia
e.g.	Por exemplo
EPDM	Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber
FMS	<i>Final Master Strainer</i>
IBAD	<i>Ion Beam Assisted Deposition</i>
i.e.	Isto é
IR	<i>Isoprene Rubber</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LHS	<i>Left Hand Side</i>
MMS	<i>Mixing Management System</i>
N.A.	Não Aplicável
NR	<i>Natural Rubber</i>
N-S	Navier - Stokes
PID	<i>Proportional integral derivative controller</i>
PT	Platina
PTFE	Politetrafluoretileno
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RPA	<i>Rubber Process Analyzer</i>
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
S.A.	Sociedade Anónima
SBR	Borracha de butadieno-estireno
SSR	<i>Self Supporting Runflat</i>
SUV	<i>Sport Utility Vehicle</i>
TCU	<i>Temperature Control Unit</i>
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões

Lista de Unidades

€	Euro
“	Polegada
bar	Unidade de pressão
fps	<i>Frames per second</i>
g	Grama
GB	<i>Gigabyte</i>
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
K	Kelvin
kg	Quilograma
kg/h	Quilograma por hora
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³ /h	Metro cúbico por hora
m/s	Metro por segundo
m/min	Metro por minuto
mA	Miliampere
mAh	Miliampere-hora
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
MU	<i>Mooney Units</i>
Pa	Pascal
Pa.s	Pascal segundo
phr	Partes de borracha por cem
rad/s	Radianos por segundo
s ⁻¹	Frequência
μm	Micrómetro
W	Watt
Ω	Ohm
°C	Grau Celsius

Lista de Símbolos

%	Porcentagem
α	Constante de tempo do modelo <i>Cross</i> .
A	Área
A_{cinta}	Área correspondente à secção da cinta de <i>cap ply</i>
$A_{composto}$	Área correspondente à secção de composto de borracha
A_{cordas}	Área correspondente à secção das cordas têxteis
Al	Símbolo químico para o Alumínio
β	Coeficiente de expansão térmica volumétrica

Cr	Símbolo químico para o Crómio
δ_x	Dimensão do elemento fluido na direção x
δ_y	Dimensão do elemento fluido na direção y
δ_z	Dimensão do elemento fluido na direção z
e	Espessura
η	Viscosidade dinâmica
η_0	Viscosidade dinâmica para uma taxa de corte nula
η_∞	Viscosidade dinâmica para uma taxa de corte infinita
η^*	Viscosidade dinâmica complexa
$\vec{f}$	Vetor de forças de corpo
g	Constante de aceleração gravítica
G^*	Módulo de corte complexo
$\dot{\gamma}$	Taxa de corte
h	Coeficiente de convecção
k	Condutividade térmica
K	Índice de consistência
l	Comprimento linear
L_{ref}	Comprimento característico
λ	Comprimento de onda
μ	Viscosidade dinâmica
n	Índice de <i>Power Law</i>
N	Número de cordas têxteis
N	Símbolo químico para o Azoto
Nu_L	Número de Nusselt
p	Pressão
ρ	Densidade
$\dot{q}$	Caudal mássico
Q	Calor total transferido
Q_λ	Intensidade da radiação emitida
Q_{Total}	Intensidade da radiação total emitida
®	Marca registada
R	Resíduo
R_a	Número de Rayleigh
Re	Número de Reynolds
S'	Binário elástico
S''	Binário viscoso
$\vec{S}$	Taxa de deformação viscosa
Si	Símbolo químico para o Silício
S_E	Fonte externa de energia

S_M	Fonte externa de momento
t	Tempo
T	Temperatura
T_p	Temperatura de parede
T_∞	Temperatura ambiente
τ	Tensão de corte
$\vec{\tau}$	Tensor de tensões viscosas
Ti	Símbolo químico para o Titânio
$\mathbf{u}$	Vetor velocidade
u	Componente da velocidade na direção x
$\vec{V}$	Vetor velocidade do fluido
v	Componente da velocidade na direção y
$\mathbf{v}$	Velocidade de linha
w	Componente da velocidade na direção z
W_i	Função peso

GLOSSÁRIO DE TERMOS

<i>Brainstorming</i>	Tempestade de ideias.
<i>Breadboard</i>	Placa de ensaio para montagem de sistemas eletrônicos.
<i>Cap strip</i>	Máquina de produção de cintas têxteis.
<i>Cap ply</i>	Cinta têxtil impregnada com composto de borracha.
<i>Contiseal</i>	Tecnologia que permite aumentar a resistência a furos no piso do pneu.
<i>Contisilent</i>	Tecnologia que permite diminuir o ruído gerado pelo rolamento do pneu. Caracteriza-se pela utilização de uma espuma colada ao interior do pneu.
<i>Creel</i>	Estação que suporta as bobinas de tecido têxtil para a produção de <i>cap ply</i> .
<i>Hevea Brasiliensis</i>	Nome científico para a árvore Seringueira.
<i>Log</i>	Ficheiro computacional destinado ao registo de dados ao longo de um período de tempo
<i>Loop</i>	Ciclo.
<i>microSD</i>	Padrão para cartões de memória portáteis.
<i>Mini slitter</i>	Máquina de corte. Tem como objetivo cortar tecido calandrado em tiras de dimensão igual ao <i>cap ply</i> .
Negro de fumo	Produto resultante da pirólise ou combustão parcial de hidrocarbonetos. Constituído em grande parte por carbono.
<i>Nylon®</i>	Nome comercial para poliamida.
<i>Powertrain</i>	Estrangeirismo para “Transmissões”.
<i>Rayon</i>	Tecido de fibra celulósica.
<i>Scorch resistance</i>	Resistência da borracha à pré-vulcanização.
<i>Scrap</i>	Estrangeirismo para “Desperdício”. Refere-se ao produto não conforme gerado na produção de um ou vários componentes.
<i>Setpoint</i>	Valor alvo definido para uma variável no controlo do processo.
<i>Shear thinning</i>	Comportamento característico de alguns fluidos não Newtonianos. Caracteriza-se pela diminuição da viscosidade quando sujeito tensões de corte/deformações.
<i>Software</i>	Instruções escritas para ser processadas por um computador, de forma a executar determinadas tarefas.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - ETAPAS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE UM PNEU [1].	37
FIGURA 2 - METODOLOGIA UTILIZADA.	40
FIGURA 3 - DIFERENTES TIPOS DE CONSTRUÇÃO DE PNEUS. ADAPTADO DE [5].	46
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA EM CORTE DE UM PNEU RADIAL DE VEÍCULOS LIGEIROS. ADAPTADO DE [2].	46
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DAS FORÇAS DE CORTE DEVIDO AO MOVIMENTO ENTRE CINTAS METÁLICAS. ADAPTADO DE [6].	47
FIGURA 6 - MATERIAIS PRESENTES NO PNEU E SUA DISTRIBUIÇÃO [7].	49
FIGURA 7 - PROCESSO DE RETICULAÇÃO POLIMÉRICA. ADAPTADO DE [2].	52
FIGURA 8- PERFIS DE VELOCIDADE, TAXA DE CORTE E TENSÃO DE CORTE NUM FLUXO ENTRE DUAS PLACAS PLANAS. ADAPTADO DE [21].	53
FIGURA 9 – VISTA EM CORTE DE UM VISCOSÍMETRO DE MOONEY. ADAPTADO DE [23].	53
FIGURA 10 - CURVA CARACTERÍSTICA DE UM ENSAIO REALIZADO NUM REÓMETRO DE DISCO OSCILATÓRIO. ADAPTADO DE [24].	53
FIGURA 11 - REPRESENTAÇÃO EM CORTE DE UM RPA. ADAPTADO DE [25].	54
FIGURA 12 - MODELOS DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS [11].	54
FIGURA 13 - MICROESTRUTURA DE UM MATERIAL SEMICRISTALINO. ADAPTADO DE [27].	55
FIGURA 14 - DIFERENTES DISCIPLINAS QUE COMPÕEM A DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL. ADAPTADO DE [30].	56
FIGURA 15 - ELEMENTO FLUIDO PARA AS LEIS DE CONSERVAÇÃO [29].	59
FIGURA 16 - ILUSTRAÇÃO DO TENSOR TENSÃO [38].	62
FIGURA 17 - PRINCIPAIS GRUPOS DE MALHAS.	62
FIGURA 18 - MALHA CARTESIANA PARA REPRESENTAR UM FLUXO ATRAVÉS DE TUBOS: (A) MALHA CARTESIANA (B) PADRÃO DE FLUXO OBTIDO [29].	62
FIGURA 19 - MALHA NÃO ORTOGONAL PARA O ESCOAMENTO DE FLUIDO ENTRE TUBOS: (A) MALHA NÃO ORTOGONAL (B) PADRÃO DE FLUXO OBTIDO [29].	63
FIGURA 20 - MALHA NÃO ESTRUTURADA COM ELEMENTOS TRIANGULARES PARA A SIMULAÇÃO DE UM AEROFÓLIO [29].	63
FIGURA 21 - IRRADIÂNCIA DE UM CORPO NEGRO. A ÁREA ABAIXO DE CADA CURVA É DESCRITA PELA EQUAÇÃO(25). ADAPTADO DE [43].	66
FIGURA 22 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO E SEUS PARÂMETROS. ADAPTADO DE [44].	67
FIGURA 23 - DIREÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO E MAGNÉTICO [42].	67
FIGURA 24 - POLARIZAÇÃO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA [42].	67

FIGURA 25 - IMAGEM TERMOGRÁFICA OBTIDA PARA A ANÁLISE DE CANCRO NA TIROIDE [46].	68
FIGURA 26 - SENSOR DE TEMPERATURA RTD PT100 [59].	71
FIGURA 27 - ALTERAÇÕES MACROMECAÑICAS PROVOCADAS POR UM MOVIMENTO RELATIVO ENTRE SUPERFÍCIES E COM RELAÇÃO ENTRE QUATRO FATORES [63].	72
FIGURA 28 - ZONAS DE UM SISTEMA TRIBOLÓGICO SUBSTRATO/REVESTIMENTO. ADAPTADO DE [65].	73
FIGURA 29 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO PVD POR EVAPORAÇÃO E POR PROJEÇÃO CATÓDICA [63].	74
FIGURA 30 - MAPA DAS FÁBRICAS CONTINENTAL RELATIVAS À DIVISÃO DE PNEUS [7].	82
FIGURA 31 - VISTA AÉREA DA CONTINENTAL MABOR [7].	83
FIGURA 32 – CREEL COM BOBINAS POSICIONADAS.	83
FIGURA 33 - CHAPA PERFURADA COM OLHAIS CERÂMICOS.	84
FIGURA 34 - FIEIRA PARA PRODUÇÃO DE 16 CINTAS DE CAP PLY EM SIMULTÂNEO.	84
FIGURA 35 - VISTA INTERIOR DO CABEÇOTE.	85
FIGURA 36 - VISTA DA PARTE MÓVEL E PARTE FIXA DO CABEÇOTE. A PARTE MÓVEL POSSUI DUAS RESISTÊNCIAS DE AQUECIMENTO.	85
FIGURA 37 - PORMENOR DA SUPERFÍCIE DE VEDAÇÃO NO INTERIOR DO CABEÇOTE.	86
FIGURA 38 - DEMONSTRAÇÃO DA MONTAGEM DAS CORDAS NA FIEIRA DURANTE A ABERTURA DO CABEÇOTE.	86
FIGURA 39 - EXTRUSORA BERSTORFF® GE-120.	87
FIGURA 40 - ESTAÇÃO DE ALIMENTAÇÃO DA TREMONHA.	87
FIGURA 41 - BOMBA DE ENGRENAGENS.	88
FIGURA 42 - TAMBORES DE ARREFECIMENTO.	88
FIGURA 43 - ESTAÇÃO DE ENROLAMENTO DE CINTAS DE CAP PLY.	89
FIGURA 44 - UNIDADE DE ENROLAMENTO DE CAP PLY.	89
FIGURA 45 - CARRO DE TRANSPORTE COM BOBINAS DE CAP PLY DEVIDAMENTE IDENTIFICADAS.	90
FIGURA 46 - COMPOSTO DE BORRACHA VULCANIZADO NOS CANAIS DE ESCOAMENTO DO CABEÇOTE.	91
FIGURA 47 - PRESENÇA DE DUAS CINTAS DE CAP PLY DEFEITUOSAS DEVIDO À EXISTÊNCIA DE AGLOMERADOS DE COMPOSTO DE BORRACHA NA FIEIRA.	91
FIGURA 48 - PRODUÇÃO DE CAP PLY COM QUATRO CINTAS DEFEITUOSAS DEVIDO À FALHA DE IMPREGNAÇÃO DE BORRACHA.	92
FIGURA 49 - DIAGRAMA ISHIKAWA PARA O PROBLEMA NA CAP STRIP.	93
FIGURA 50 - PROCEDIMENTO UTILIZADO PARA A METODOLOGIA DESENVOLVIDA.	97
FIGURA 51 - AMOSTRAS PARA OS ENSAIOS DE SCORCH. A) AMOSTRAS NÃO PROCESSADA PELO MOINHO. B) AMOSTRAS PROCESSADAS PELO MOINHO.	100
FIGURA 52 - PRENSA MECÂNICA MANUAL PARA CORTE DE AMOSTRAS.	100
FIGURA 53 - AMOSTRA REMOVIDA DO VISCOSÍMETRO APÓS CONCLUSÃO DO ENSAIO.	103
FIGURA 54 - ALPHA TECHNOLOGIES® RPA 2000.	104

FIGURA 55 - SISTEMA ROBOTIZADO DE ALIMENTAÇÃO DE AMOSTRAS.	104
FIGURA 56 – A) MODELO TRIDIMENSIONAL DE UM CABEÇOTE PERTENCENTE A UMA <i>CAP STRIP</i> . B) CABEÇOTE REAL DE UMA <i>CAP STRIP</i>	106
FIGURA 57 - DETALHES REFERENTES À GEOMETRIA DOS CANAIS DO CIRCUITO DE REFRIGERAÇÃO DA <i>CAP STRIP</i> . A) LOCAL DOS CANAIS NA ESTRUTURA DE SUPORTE DO CABEÇOTE. B) LOCAL DOS CANAIS NO CABEÇOTE.	107
FIGURA 58 –CANAIS DE FLUXO DE ÁGUA NA (A) ESTRUTURA DE SUPORTE DO CABEÇOTE E (B) NO CABEÇOTE.	108
FIGURA 59 - AMBIENTE DE TRABALHO APÓS IMPORTAÇÃO DO MODELO TRIDIMENSIONAL.....	108
FIGURA 60 - FERRAMENTA <i>VOID FILL</i> PARA A CRIAÇÃO DE UM VOLUME NO CANAL INTERNO DA ESTRUTURA DE SUPORTE DO CABEÇOTE.....	109
FIGURA 61 - ÁREA DE CONTACTO ENTRE OS DOIS BLOCOS QUE CONSTITUEM O CABEÇOTE.....	111
FIGURA 62 - SUPERFÍCIES CORRESPONDENTES ÀS SUPERFÍCIES DE CONTACTO.	112
FIGURA 63 - RECEITA PARA O COMPOSTO FMS-B00163.	112
FIGURA 64 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO COMPOSTO FMS-B00163.....	113
FIGURA 65 - PROPRIEDADES ATRIBUÍDAS AO FLUIDO FMS-B00163.....	113
FIGURA 66 - PROPRIEDADES DO MATERIAL AÇO AO CARBONO.....	114
FIGURA 67 - PROPRIEDADES DO MATERIAL AR.....	114
FIGURA 68 - PROPRIEDADES DO MATERIAL ÁGUA.	114
FIGURA 69 - OPÇÃO DE DESIGNAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ENTRE CONSTANTE E VARIÁVEL.	115
FIGURA 70 - REGISTO DE PARÂMETROS DA <i>CAP STRIP</i> 3 NO DIA 29/03/2019.	115
FIGURA 71 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UMA CINTA DE <i>CAP PLY</i>	117
FIGURA 72 - IMAGEM TERMOGRÁFICA DO CABEÇOTE COM A <i>CAP STRIP</i> EM FUNCIONAMENTO À VELOCIDADE MÁXIMA DA LINHA.....	121
FIGURA 73 - DIMENSÕES E PARÂMETROS DE MALHA PARA O CENÁRIO 1.....	122
FIGURA 74 - PARÂMETROS DO <i>SOLVER</i> PARA O CENÁRIO 1.....	123
FIGURA 75 - DEFINIÇÕES DO <i>SOLVER</i> RELATIVOS À ABA "FÍSICA".	124
FIGURA 76 - CONTROLADOR DE TEMPERATURA DA UNIDADE DE CONTROLO DE TEMPERATURA.	128
FIGURA 77 – DOMÍNIO DE CONTROLO PARA A SIMULAÇÃO DO CENÁRIO 3.....	129
FIGURA 78 - PARTE MÓVEL DO CABEÇOTE COM RESISTÊNCIAS DE AQUECIMENTO. MODELO UTILIZADO NO CENÁRIO 4.....	132
FIGURA 79 - RUGOSÍMETRO (MAHR® PERTHOMETER M2).	135
FIGURA 80 - LOCAIS DE MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE.....	136
FIGURA 81 - BOMBA DE ENGRENAGENS.....	136
FIGURA 82 - ELEMENTO DE ENCAIXE PERTENCENTE AO CABEÇOTE. PERMITE LIGAR O CABEÇOTE À BOMBA DE ENGRENAGENS.	137

FIGURA 83 - COMBINAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL COM UMA IMAGEM DA BOMBA DE ENGRENAGENS, DE FORMA A SIMULAR A MONTAGEM DO CONJUNTO.	137
FIGURA 84 - EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO PARA OS ENSAIOS DE EXTRUSÃO.....	137
FIGURA 85 - LOCALIZAÇÃO DOS PURGADORES E SONDA DE TEMPERATURA NO CABEÇOTE.	139
FIGURA 86 - PONTOS DE SOLDA NO AMPLIFICADOR MAX31865.	140
FIGURA 87 - ESQUEMA DE MONTAGEM DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DE TEMPERATURA.	140
FIGURA 88 - PROGRAMAÇÃO CORRESPONDENTE À DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE MEDIÇÕES E INTERVALO ENTRE CADA MEDIÇÃO.	141
FIGURA 89 - PROGRAMAÇÃO CORRESPONDENTE AO ACIONAMENTO DO DISPOSITIVO LED.....	141
FIGURA 90 - ADAPTADOR E SONDA DE TEMPERATURA INSTALADOS NO CABEÇOTE.	142
FIGURA 91 - MONTAGEM FINAL DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DE TEMPERATURA.	142
FIGURA 92 - MASSA INICIAL E FINAL DAS AMOSTRAS COM PASSAGEM NO MOINHO PARA O ENSAIO SCORCH.	145
FIGURA 93 - MASSA INICIAL E FINAL DAS AMOSTRAS SEM PASSAGEM NO MOINHO PARA O ENSAIO SCORCH.	146
FIGURA 94 - MASSA DAS AMOSTRAS SEM PASSAGEM NO MOINHO PARA O ENSAIO DE MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE.	150
FIGURA 95 - MASSA DAS AMOSTRAS COM PASSAGEM NO MOINHO PARA O ENSAIO DE MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE.	150
FIGURA 96 - VISCOSIDADE DINÂMICA A 80°C.	151
FIGURA 97 - VISCOSIDADE DINÂMICA A 90°C.	151
FIGURA 98 - VISCOSIDADE DINÂMICA A 100°C.	151
FIGURA 99 - VISCOSIDADE DINÂMICA A 110°C.	151
FIGURA 100 - VISCOSIDADE DINÂMICA A 120°C.	152
FIGURA 101 - FOLHA DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO POLIMÉRICA DE SEGUNDA ORDEM.	153
FIGURA 102 - GRADIENTE DE TEMPERATURA PARA O CENÁRIO 1 COM REFINAMENTO DE MALHA.....	155
FIGURA 103 - VISTA EM CORTE (A) À ESQUERDA E (B) À DIREITA DO PLANO DE CONTACTO ENTRE AMBAS AS PARTES DO CABEÇOTE.	156
FIGURA 104 - VISTA EM CORTE ONDE SE PODE OBSERVAR A DIFERENTE DISTRIBUIÇÃO TÉRMICA ENTRE A PARTE FIXA (À ESQUERDA) E PARTE MÓVEL (À DIREITA) DO CABEÇOTE.	156
FIGURA 105 - VOLUME CORRESPONDENTE A TEMPERATURAS SUPERIORES OU IGUAIS A 110°C.	157
FIGURA 106 - MAGNITUDE DA VELOCIDADE PARA O CENÁRIO 1.	157
FIGURA 107 - VISCOSIDADE DINÂMICA PARA O CENÁRIO 1.	158
FIGURA 108 - MAGNITUDE DAS TENSÕES DE CORTE PARA O CENÁRIO 1.	158
FIGURA 109 - RASTREAMENTO DE PARTÍCULAS PARA O CENÁRIO 1.....	159
FIGURA 110 - PARTÍCULA COM MAIOR TEMPO DE RESIDÊNCIA PARA O CENÁRIO 1.	159

FIGURA 111 - VALORES DOS RESÍDUOS PONDERADOS OBTIDOS PARA O CENÁRIO 1.....	160
FIGURA 112 - GRADIENTE DE TEMPERATURA NO DOMÍNIO DE CONTROLO GLOBAL PARA O CENÁRIO 2.	162
FIGURA 113 - VISTA EM CORTE REPRESENTATIVA DA DISTRIBUIÇÃO TÉRMICA ENTRE A PARTE FIXA (À ESQUERDA) E PARTE MÓVEL (À DIREITA) DO CABEÇOTE.	163
FIGURA 114 - MAGNITUDE DA VELOCIDADE PARA O CENÁRIO 2.	163
FIGURA 115 - VISCOSIDADE DINÂMICA PARA O CENÁRIO 2.	164
FIGURA 116 - MAGNITUDE DAS TENSÕES DE CORTE PARA O CENÁRIO 2.	164
FIGURA 117 - TRAJETO DA PARTÍCULA COM MAIOR TEMPO DE RESIDÊNCIA PARA O CENÁRIO 2.	165
FIGURA 118 - VALORES DE <i>RESID IN</i> PARA CADA ITERAÇÃO.....	165
FIGURA 119 - PERFIL DE TEMPERATURA PARA O CENÁRIO 3.	167
FIGURA 120 - VOLUME CORRESPONDENTE A TEMPERATURAS SUPERIORES A 110°C PARA O CENÁRIO 3.	168
FIGURA 121 - VALORES DE RESÍDUOS PONDERADOS (<i>RESID IN</i>) PARA O CENÁRIO 3.....	168
FIGURA 122 - GRADIENTE DE TEMPERATURA PARA O CENÁRIO 4.	169
FIGURA 123 - REPRESENTAÇÃO DOS VALORES DE RESÍDUOS PARA CADA ITERAÇÃO DO CENÁRIO 4. ...	170
FIGURA 124 - GRADIENTE DE TEMPERATURA COM REPRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS E RESPECTIVOS NÓS. VISTA EM CORTE NO PLANO DE CONTACTO ENTRE AMBAS AS PARTES DO CABEÇOTE.	171
FIGURA 125 - GRADIENTE DE TEMPERATURA NO VOLUME DO COMPOSTO DE BORRACHA.	172
FIGURA 126 - DIFERENTES TONALIDADES E ACABAMENTOS SUPERFICIAIS CARACTERÍSTICOS DAS SUPERFÍCIES INTERNAS DO CABEÇOTE.....	172
FIGURA 127 - IMAGEM TERMOGRÁFICA DO INTERIOR DO CABEÇOTE.....	173
FIGURA 128 - GRADIENTE DE TEMPERATURA REGISTADO NO CENÁRIO 4 (INTERIOR DO CABEÇOTE). ..	173
FIGURA 129 - IMAGEM TERMOGRÁFICA À SAÍDA DA FIEIRA.	174
FIGURA 130 - IMAGEM TERMOGRÁFICA DO EXTERIOR DO CABEÇOTE.	174
FIGURA 131 – REMOÇÃO DO REVESTIMENTO PRESENTE NA PARTE MÓVEL DO CABEÇOTE NOVO.	178
FIGURA 132 - PROVETE DE ENSAIO E CÂMARA FOTOGRÁFICA INSTALADOS PARA REGISTO DE DADOS.	179
FIGURA 133 - ROTURA DA TAMPA DURANTE O PRIMEIRO ENSAIO DE EXTRUSÃO.	180
FIGURA 135 - DADOS OBTIDOS POR FICHEIROS LOG PARA O DIA 28/03/2019.	183
FIGURA 136 - DADOS OBTIDOS POR FICHEIROS LOG PARA O DIA 11/05/2019.	184
FIGURA 137 - DADOS OBTIDOS POR FICHEIROS LOG PARA O DIA 02/04/2019.	185
FIGURA 138 - SONDA ORIGINAL DO CABEÇOTE DESACOPLADA.	185
FIGURA 139 - VISTA INTERNA DO CABEÇOTE QUE DEMONSTRA A INSTALAÇÃO DA SONDA ORIGINAL DO CABEÇOTE.	186
FIGURA 140 - DIAGRAMA DE EXPLICAÇÃO DAS CAUSAS A COMBATER COM O NOVO SISTEMA. ESQUEMA ELABORADO PELO DE 3.....	189

FIGURA 141 - NOVA SONDA RTD PT100 INSTALADA NO CABEÇOTE, EM SUBSTITUIÇÃO DO PURGADOR.	189
FIGURA 142 - PROGRAMA <i>LADDER</i> DE CONTROLO DE TEMPERATURA PARA AS <i>CAP STRIP</i>	190
FIGURA 143 - DADOS OBTIDOS POR FICHEIROS LOG PARA O DIA 25/05/2019.	191
FIGURA 144 - DADOS OBTIDOS POR FICHEIROS LOG PARA O DIA 06/06/2019.	192
FIGURA 145 - QUALIDADE DAS CINTAS DE <i>CAP PLY</i> (A) ANTES DO NOVO CONTROLO, (B) APÓS INSTALAÇÃO DO NOVO CONTROLO.	192
FIGURA 146 - <i>SCRAP</i> GERADO POR FALHA DE IMPREGNAÇÃO E COMPOSTO DE BORRACHA VULCANIZADO NAS <i>CAP STRIP</i> 1, 2 E 3, ENTRE OS ANOS 2014 E 2019.	193
FIGURA 147 - LOCAIS COM MAGNITUDE DE VELOCIDADE REDUZIDA.	199
FIGURA 148 - LOCAL DE PARAGEM ABRUPTA DO ESCOAMENTO, REDUZINDO ASSIM A MAGNITUDE DA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO.	200
FIGURA 149 - FLUXOS DE MASSA DE ENTRADA E SAÍDA PARA O ELEMENTO FLUIDO [29].	213
FIGURA 150 - CUBO DE TENSÕES PARA UM ELEMENTO FLUIDO [29].	216
FIGURA 151 - COMPONENTES DO VETOR DE FLUXO DE CALOR [29].	219

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - COMPONENTES PRESENTES NUM PNEU RADIAL E SUAS FUNÇÕES [7].	47
TABELA 2 - MATÉRIA PRIMA PRESENTE NA FORMULAÇÃO DE UM COMPOSTO DE BORRACHA [9].	49
TABELA 3 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS DIFERENTES TIPOS DE REFORÇOS TÊXTEIS [5].	51
TABELA 4 - DIFERENTES MODELOS DE VISCOSIDADE.	64
TABELA 5 - TRABALHOS REALIZADOS NA ÁREA DA TERMOGRAFIA.	69
TABELA 6 - COMPARAÇÃO ENTRE RASPBERRY PI® E ARDUINO® UNO [56].	70
TABELA 7 - TRABALHOS REALIZADOS NA ANÁLISE DE REVESTIMENTOS GASOSOS EM MOLDES.	75
TABELA 8 - ESTUDOS CIENTÍFICOS RELACIONADOS COM AS PROPRIEDADES DE VULCANIZAÇÃO DE COMPOSTOS DE BORRACHA E ENSAIOS SCORCH.	76
TABELA 9 - EMPRESAS PERTENCENTES AO GRUPO CONTINENTAL, EM PORTUGAL.	82
TABELA 10 - DESCRIÇÃO DAS CAUSAS CONSIDERADAS COMO CRÍTICAS PARA A OCORRÊNCIA DE COMPOSTO DE BORRACHA VULCANIZADO E FALHA DE BORRACHA.	94
TABELA 11 - PROCEDIMENTO PARA A OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS PRINCIPAIS PARA OS ENSAIOS DE SCORCH E ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE.	99
TABELA 12 - SEQUÊNCIA DE ENSAIOS DE SCORCH.	101
TABELA 13 - PROCEDIMENTO PARA A COLOCAÇÃO DA AMOSTRA NO VISCOSÍMETRO.	102
TABELA 14 - ESPECIFICAÇÕES DO <i>HARDWARE</i> UTILIZADO NAS ANÁLISES NUMÉRICAS.	105
TABELA 15 - MATERIAIS ATRIBUÍDOS A CADA VOLUME DO DOMÍNIO DE CONTROLO PARA O CENÁRIO 1.	110
TABELA 16 - REGISTO DE <i>SCRAP</i> REFERENTE AO DIA 29/03/2019.	116
TABELA 17 - CAUDAIS MÁSSICO PARA AS VÁRIAS RECEITAS DE <i>CAP PLY</i> .	117
TABELA 18 - CONDIÇÕES FRONTEIRA APLICADAS AO CENÁRIO 1.	119
TABELA 19 - MATERIAIS ATRIBUÍDOS A CADA VOLUME PARA O CENÁRIO 2.	125
TABELA 20 - CONDIÇÕES FRONTEIRA APLICADAS AO CENÁRIO 2.	126
TABELA 21 - MATERIAIS UTILIZADOS PARA O CENÁRIO 3.	130
TABELA 22 - CONDIÇÕES FRONTEIRA APLICADAS AO CENÁRIO 3.	130
TABELA 23 - MATERIAIS ATRIBUÍDOS AO CENÁRIO 4.	132
TABELA 24 - CONDIÇÕES FRONTEIRAS APLICADAS AO CENÁRIO 4.	133
TABELA 25 - COMPONENTES E SEUS CUSTOS PARA MONTAGEM DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DE TEMPERATURA.	139
TABELA 26 - RESULTADOS OBTIDOS COM OS ENSAIOS DE SCORCH PARA AS AMOSTRAS COM PASSAGEM NO MOINHO.	147

TABELA 27 - RESULTADOS OBTIDOS COM OS ENSAIOS DE SCORCH PARA AS AMOSTRAS SEM PASSAGEM NO MOINHO.	148
TABELA 28 - VALORES DOS COEFICIENTES PARA A EQUAÇÃO POLIMÉRICA DE SEGUNDA ORDEM.	153
TABELA 29 - COEFICIENTES PARA O MODELO <i>CARREAU</i>	154
TABELA 30 - NÚMERO DE ELEMENTOS E NÓS PARA O CENÁRIO 1.	154
TABELA 31 - NÚMEROS DE REYNOLDS OBTIDOS PARA O CENÁRIO 1.	155
TABELA 32 - <i>RESID IN</i> PARA O CENÁRIO 1.	160
TABELA 33 - NÚMERO DE NÓS E ELEMENTOS PARA A MALHA REFINADA DO CENÁRIO 1.	161
TABELA 34 - COMPARAÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS PARA O CENÁRIO 1 PELOS VÁRIOS MÉTODOS.	161
TABELA 35 - RESULTADOS DE TEMPERATURA OBTIDOS PARA AMBAS AS MALHAS DO CENÁRIO 1 E RESPETIVAS DIFERENÇAS.	161
TABELA 36 - NÚMERO DE NÓS E ELEMENTOS PRESENTES NA MALHA DO CENÁRIO 2.	162
TABELA 37 - NÚMERO DE REYNOLDS RELATIVO AO CENÁRIO 2.	162
TABELA 38 - <i>RESID IN</i> PARA O CENÁRIO 2.	165
TABELA 39 - NÚMERO DE NÓS E ELEMENTOS PARA A MALHA REFINADA DO CENÁRIO 2.	166
TABELA 40 - COMPARAÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS PARA O CENÁRIO 2 PELOS VÁRIOS MÉTODOS.	166
TABELA 41 - RESULTADOS DE TEMPERATURA OBTIDOS PARA AMBAS AS MALHAS DO CENÁRIO 2 E RESPETIVAS DIFERENÇAS.	166
TABELA 42 - NÚMERO DE NÓS E ELEMENTOS PARA O CENÁRIO 3.	167
TABELA 43 - RESULTADOS E RESPETIVAS DIFERENÇAS PARA AS MALHAS COM DIFERENTES TAMANHOS DO CENÁRIO 3.	168
TABELA 44 - NÚMERO DE ELEMENTOS E NÓS PARA A MALHA REFINADA DO CENÁRIO 3.	169
TABELA 45 - NÚMERO DE NÓS E ELEMENTOS PARA O CENÁRIO 4.	169
TABELA 46 - VALORES DOS RESÍDUOS E RESPETIVOS ERROS PARA O CENÁRIO 4.	170
TABELA 47 - RESULTADOS E RESPETIVAS DIFERENÇAS PARA AS MALHAS COM DIFERENTES TAMANHOS DO CENÁRIO 4.	170
TABELA 48 - NÚMERO DE NÓS E ELEMENTOS PARA O CENÁRIO 5.	171
TABELA 49 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE NA MÁQUINA <i>CAP STRIP</i> 1.	175
TABELA 50 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE NA MÁQUINA <i>CAP STRIP</i> 3.	176
TABELA 51 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE NUMA PARTE MÓVEL NA CONDIÇÃO DE NOVO.	177
TABELA 52 - RUGOSIDADE DO PROVETE PARA O ENSAIO 1.	178
TABELA 53 - CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA FOTOGRÁFICA E DEFINIÇÕES DE GRAVAÇÃO UTILIZADAS.	179
TABELA 54 - TEMPO DE ESCOAMENTO PARA O ENSAIO 1.	180

TABELA 55 - RUGOSIDADES DA SUPERFÍCIE INTERNA DO PROVETE PARA O ENSAIO 2.....	180
TABELA 56 - TEMPO DE ESCOAMENTO DE COMPOSTO DE BORRACHA NO ENSAIO 2.	181
TABELA 57 - RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE INTERNA DO PROVETE PARA O ENSAIO 3.	181
TABELA 58 - TEMPO DE ESCOAMENTO PARA O ENSAIO 3.....	181
TABELA 59 - TEMPO DE ESCOAMENTO PARA O ENSAIO 4.....	182
TABELA 60 - REGISTO DE <i>SCRAP</i> RELATIVO AO DIA 11/05/2019. REGISTO DE UMA ÚNICA OCORRÊNCIA.	184

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	37
1.1 Contextualização	37
1.2 Objetivos	39
1.3 Metodologia utilizada	40
1.4 Estrutura da dissertação	41
1.5 Empresa de acolhimento	41
2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO	45
2.1 O pneu	45
2.1.1 Componentes de um pneu radial	46
2.2 Propriedades da borracha	48
2.2.1 Composição do pneu	48
2.2.1.1 Polímeros	49
2.2.1.2 Cargas	50
2.2.1.3 Agentes de proteção	50
2.2.1.4 Agentes de vulcanização	51
2.2.1.5 Auxiliares de processamento	51
2.2.1.6 Materiais de reforço	51
2.2.2 Vulcanização	51
2.2.3 Comportamento reológico e viscoelástico da borracha	52
2.3 Análise numérica aplicada a fluidos não newtonianos	54
2.3.1 Propriedades físicas	54
2.3.2 Introdução à dinâmica de fluidos computacional	55
2.3.3 Transferências de calor	56
2.3.4 Pré-processamento	57

2.3.5	Processamento	57
2.3.6	Pós-processamento	57
2.3.7	Método dos elementos finitos	57
2.3.8	Equações governantes	58
2.3.8.1	Conservação de massa	59
2.3.8.2	Conservação do momento	60
2.3.8.3	Conservação de energia	60
2.3.9	Equações de Navier-Stokes	61
2.3.10	Tipos de malha	62
2.3.11	Modelos de viscosidade	64
2.3.12	Método dos resíduos ponderados	64
2.4	Termografia	65
2.5	Controlo de processos	70
2.5.1	Microcontroladores	70
2.5.2	Sensores de temperatura	71
2.5.3	Controladores	71
2.6	Revestimentos em moldes	72
2.6.1	Estudo dos mecanismos de desgaste	72
2.6.2	Revestimentos para moldes	73
2.6.2.1	Técnica de deposição PVD	74
2.7	Ensaio <i>Scorch</i>	75
3	CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA E DO PROCESSO E ANTEVISÃO DE SOLUÇÕES.....	81
3.1	Caracterização da empresa	81
3.2	Caracterização do processo	83
3.3	Caracterização do problema	90
3.4	Tempestade de ideias e diagrama de Ishikawa	93
3.5	Análise crítica de possíveis soluções	94

4	MÉTODOS	97
4.1	Ensaaios laboratoriais	98
4.1.1	Ensaaios de Scorch	100
4.1.1.1	Preparação de amostras	100
4.1.1.2	Execução do ensaio.....	101
4.1.2	Medição de viscosidade	103
4.1.2.1	Preparação de amostras	103
4.1.2.2	Execução do ensaio.....	103
4.2	Análise numérica.....	104
4.2.1	Domínio de controlo	105
4.2.1.1	Circuito de água	107
4.2.2	Cenário 1 – Cabeçote com resistências de aquecimento.....	108
4.2.2.1	Materiais	109
4.2.2.2	Condições fronteira	115
4.2.2.3	Condições iniciais.....	121
4.2.2.4	Malha	121
4.2.2.5	Solver	122
4.2.3	Cenário 2 – Cabeçote com circuito de água	124
4.2.3.1	Materiais	125
4.2.3.2	Condições fronteira	126
4.2.3.3	Condições iniciais.....	128
4.2.3.4	Malha	129
4.2.3.5	Solver	129
4.2.4	Cenário 3 – Componente do cabeçote com circuito de água	129
4.2.4.1	Materiais	130
4.2.4.2	Condições fronteira	130
4.2.4.3	Condições iniciais.....	131
4.2.4.4	Malha	131
4.2.4.5	Solver	131
4.2.5	Cenário 4 – Componente do cabeçote com resistências de aquecimento	131
4.2.5.1	Materiais	132
4.2.5.2	Condições fronteira	132
4.2.5.3	Condições iniciais.....	133

4.2.5.4	Malha	133
4.2.5.5	Solver	133
4.2.6	Cenário 5 – Aquecimento viscoso	134
4.2.6.1	Materiais	134
4.2.6.2	Condições fronteira	134
4.2.6.3	Condições iniciais	134
4.2.6.4	Malha	134
4.2.6.5	Solver	134
4.3	Termografia.....	134
4.4	Análise da rugosidade	135
4.5	Ensaio de extrusão.....	136
4.5.1	Equipamento	136
4.5.2	Parâmetros	138
4.6	Arduino®	138
4.6.1	Desenvolvimento do sistema de monitorização de temperatura	139
4.6.2	Particularidades do programa desenvolvido.....	141
4.6.3	Projeto e instalação dos componentes	141
5	RESULTADOS	145
5.1	Componente experimental	145
5.1.1	Ensaio laboratorial	145
5.1.1.1	Ensaio de Scorch.....	145
5.1.1.2	Medição de viscosidade.....	149
5.1.2	Análise numérica	154
5.1.2.1	Cenário 1 – Cabeçote com resistências de aquecimento	154
5.1.2.1.1	Refinamento da malha	160
5.1.2.2	Cenário 2 – Cabeçote com circuito de água	161
5.1.2.2.1	Refinamento da malha	166
5.1.2.3	Cenário 3 – Componente do cabeçote com resistências de aquecimento.....	167
5.1.2.3.1	Refinamento da malha	168
5.1.2.4	Cenário 4 – Componente do cabeçote com circuito de água	169

5.1.2.4.1	Refinamento da malha	170
5.1.2.5	Cenário 5 – Aquecimento viscoso	171
5.1.3	Termografia	172
5.1.4	Análise de rugosidade	175
5.1.5	Ensaios de extrusão	178
5.1.6	Ficheiros Log com Arduino®	182
5.2	Síntese dos resultados	186
5.3	Lições aprendidas	187
5.4	Soluções implementadas	188
5.4.1	Impacto das soluções implementadas	191
6	CONCLUSÕES	197
6.1	Conclusões	197
6.2	Proposta de trabalhos futuros	199
7	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	203
8	ANEXOS	213
8.1	ANEXO 1 – Equação da conservação da massa	213
8.2	ANEXO 2 – Equação da conservação de momento	215
8.3	ANEXO 3 – Equação da conservação de energia	218
8.4	ANEXO 4 – Tabela de conversão de valores para RTD PT100	222
8.5	ANEXO 5 – Programa de leitura e registo de temperatura	224
8.6	ANEXO 6 – Relatórios de ensaios <i>Scorch</i> – Composto com passagem no moinho	226
8.7	ANEXO 7 – Relatórios de ensaios <i>Scorch</i> – Composto sem passagem no moinho	240
8.8	ANEXO 8 – Relatórios de ensaios RPA – Composto sem passagem no moinho	253

8.9	ANEXO 9 – Relatórios de ensaios RPA – Composto com passagem no moinho	301
8.10	ANEXO 10 – Desenho técnico do cabeçote de uma <i>Cap strip</i>	346
8.11	ANEXO 11 – Desenho técnico do equipamento para ensaios de extrusão	348
8.12	ANEXO 12 – Desenho técnico do adaptador para sonda térmica (Arduino®)	353
8.13	ANEXO 13 – Desenho técnico do adaptador para a nova sonda RTD PT100.....	355

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

1.2 Objetivos

1.3 Metodologia utilizada

1.4 Estrutura da dissertação

1.5 Empresa de acolhimento

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O pneu é um componente mundialmente utilizado e que evoluiu desde um simples aro de aço com uma jante em madeira, até um conjunto de vários componentes, em que cada um desempenha uma função exclusiva e de extrema importância para o desempenho final do produto. O pneu é constituído por reforços têxteis, reforços metálicos e compostos de borracha. Habitualmente, num único pneu existe mais do que um tipo de composto de borracha. A combinação de vários compostos de borracha permite adaptar cada componente às suas condições de utilização, e.g., é possível manipular o composto de borracha utilizado no piso do pneu para que o mesmo tenha uma maior ou menor dureza, influenciando assim a força de atrito entre o pneu e a estrada, que é responsável pela tração.

A manufatura de um pneu consiste em cinco fases, conforme indicado na Figura 1.



Figura 1 - Etapas do processo de produção de um pneu [1].

Os reforços de tecido têxtil são produtos que se incluem na fase de preparação e são fabricados através da impregnação de várias cordas com um composto de borracha. Estes reforços permitem restringir e controlar o incremento do volume do pneu a altas velocidades, devido às forças centrífugas [2].

Um dos reforços de tecido têxtil é o *cap ply*. Este componente é um material composto por várias cordas têxteis colocadas paralelamente entre si, em combinação com um composto de borracha. No seu processo de fabrico, as cordas têxteis são desenroladas de bobinas e passam por uma fiação que possui duas entradas conectadas aos canais de fluxo de composto de borracha. Por ação de uma extrusora e uma bomba de engrenagens, a borracha é pressionada a entrar na fiação, de forma a impregnar as cordas têxteis. Após a fase de impregnação, as cintas de *cap ply* passam por tambores de arrefecimento que provocam a descida da sua temperatura, para que seja possível proceder ao enrolamento das cintas em bobinas, sem que ocorra a adesão entre as várias camadas de *cap ply*.

O *cap ply* pode também ser fabricado através da utilização de calandras. Nesse caso, faz-se a impregnação das várias cordas têxteis com borracha, regulando a distância entre os rolos da calandra, obtendo uma camada de reforço têxtil. Para obter o *cap ply* pronto para a etapa

seguinte, i.e., para a construção, é necessário cortar a camada de reforço têxtil em tiras de menor dimensão, na sua largura, recorrendo a uma máquina denominada por *mini-slitter*. Este método é menos utilizado, porque obriga à utilização de calandras, que normalmente produzem reforço metálico e, por isso, tornar-se-ia num processo mais dispendioso em termos financeiros e logísticos.

O processo de produção de *cap ply* é bastante sensível e necessita de uma constante melhoria contínua, de forma a torná-lo mais rentável e capaz de produzir produto com excelente qualidade. Para a sua otimização, é imperativo estudar os parâmetros de funcionamento da máquina, e também, compreender efetivamente as propriedades física e químicas do composto de borracha.

Por isso, este trabalho focaliza-se no processo de extrusão, que é uma das fases da produção de *cap ply*. Devido à reação de vulcanização, verifica-se o início da reticulação polimérica que altera as propriedades físicas e químicas do composto de borracha. Numa ótica de otimização do processo, analisou-se os parâmetros de funcionamento de extrusão de uma forma científica, combatendo o método empírico utilizado pela empresa, conseguindo assim, evitar um processo iterativo para atingir a otimização do processo. Utilizando a simulação computacional de dinâmica de fluidos, pretendeu-se avaliar esses parâmetros e, com base nos resultados obtidos, estabelecer um modelo otimizado para implementação na máquina. Para as simulações é necessário conhecer as propriedades reológicas do composto. A utilização de técnicas de análise experimental, como a termografia e a utilização de um microcontrolador, permitiu suportar os dados obtidos pelas simulações e validar as análises e conclusões obtidas.

Em paralelo com as simulações, analisou-se o impacto que a rugosidade superficial dos canais de extrusão tem no escoamento de borracha, através de ensaios experimentais. Numa fase inicial os ensaios decorreram em superfícies não tratadas e com rugosidades diferentes. Conforme os resultados obtidos, definiu-se a rugosidade que gerou melhores resultados para efetuar o tratamento da superfície do canal de extrusão com um revestimento técnico. Por vezes os revestimentos técnicos melhoram o fluxo de escoamento, aumentando a vida útil dos canais e melhorando o produto final obtido pelo processo.

1.2 Objetivos

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação tem como principal objetivo analisar o processo de extrusão na produção de *cap ply* e, com base nessa análise, implementar alterações que visam melhorar esse processo de produção. Desta forma, pretende-se estudar o comportamento dos parâmetros que influenciam o modo de operação das *Cap Strip*. De um modo geral, os objetivos desta dissertação passam por:

- Modelar o domínio de controlo das *Cap Strip*, através de um *software* CAD (*Computer Aided Design*);
- Simular o escoamento de borracha no cabeçote e analisar o gradiente de temperatura, tensão de corte, viscosidade dinâmica e perfil de velocidade;
- Perceber o comportamento da borracha conforme a variação dos parâmetros de operação e variação das suas características;
- Realizar ensaios laboratoriais, de forma a analisar as propriedades do composto de borracha, e também para caracterizar o seu comportamento relativamente à vulcanização;
- Analisar os problemas de vulcanização prematura e falha de impregnação de composto de borracha, percebendo quais as suas causas raiz;
- Implementar alterações no processo que visem, essencialmente, combater os problemas de vulcanização nas cintas de *cap ply* e no interior do cabeçote;
- Reduzir a quantidade de *scrap* gerado por borracha vulcanizada e falha de borracha;
- Desenvolver técnicas que permitam monitorizar e registar as condições de operação da máquina;
- Indicar sugestões de melhoria.

1.3 Metodologia utilizada

A metodologia utilizada nesta dissertação está descrita na Figura 2.



Figura 2 - Metodologia utilizada.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos.

No primeiro capítulo, é feita uma introdução à temática em análise, de forma a enquadrar o trabalho realizado, esclarecendo os objetivos, a metodologia utilizada e a entidade empresarial onde foi desenvolvida toda a dissertação.

No segundo capítulo, é apresentado o enquadramento teórico, onde são abordados os assuntos relacionados com o projeto realizado, sendo, por isso, essenciais para a sua compreensão. É feita uma análise ao pneu, analisando os componentes que o constituem e o fenómeno de vulcanização. Por último, são apresentados os conceitos relacionados com a análise numérica de dinâmica de fluidos computacional, termografia, controlo de processos, revestimentos em moldes e ensaios Scorch. Este capítulo constitui o suporte teórico para o desenvolvimento realizado.

O terceiro capítulo introduz o processo de fabrico em análise, a empresa de acolhimento, a descrição do problema em investigação e uma breve análise de possíveis soluções, com vista à resolução desse problema.

No quarto capítulo, é apresentada toda a metodologia utilizada para o desenvolvimento da componente prática do trabalho desenvolvido. Neste capítulo, é explicada a estruturação e métodos utilizados para a execução dos ensaios laboratoriais, das análises numéricas, da análise termográfica, da análise de rugosidade, dos ensaios de extrusão e do sistema de monitorização com recurso a um microcontrolador.

No capítulo cinco, são apresentados os resultados obtidos, assim como, a discussão dos mesmos. Em conjunto com os resultados, são apresentadas as soluções implementadas e os seus impactos no processo de fabrico.

No capítulo seis, são apresentadas as conclusões de todo o trabalho realizado, assim como as propostas para trabalhos futuros.

1.5 Empresa de acolhimento

O trabalho apresentado nesta dissertação foi realizado em ambiente industrial, na Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A., localizada em Lousado, Vila Nova de Famalicão e sob orientação do Engenheiro Pedro Neves. O período de estágio teve uma duração total de 9 meses e, decorreu entre o dia 15/10/2018 e o dia 15/07/2019, com um horário diário entre as 8:00 h e as 16:30 h, durante os dias úteis da semana.

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 O pneu

2.2 Propriedades da borracha

2.3 Análise numérica aplicada a fluidos não newtonianos

2.4 Termografia

2.5 Controlo de processos

2.6 Revestimentos em moldes

2.7 Ensaio *Scorch*

2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 O pneu

A roda é um componente que evoluiu a partir de componentes mais antigos, tais como, rolos utilizados na idade do bronze, há mais de 5000 anos, e que serviam para auxiliar o movimento de cargas pesadas. Os primeiros veículos com rodas surgiram, aproximadamente, no ano 3500 a.C., na Suméria.

Com o recurso a cavalos que atingiam altas velocidades, os veículos começaram a ser adaptados para utilização militar, sendo então introduzidas as primeiras rodas com raios e com pneu, formado por camadas de cobre, aço e pele, que protegiam a frágil roda em madeira.

Em 1846 foi lançada a primeira patente para uma câmara de ar em elastómero, que permitia reduzir o trabalho realizado para movimentar uma carruagem, reduzindo também o ruído gerado pelas rodas. Este conceito sofreu várias melhorias nos anos 80, quando surgiu a primeira roda com pneumático.

A descoberta da vulcanização por Charles Goodyear em 1839 permitiu que o pneu evoluísse desde uma simples tela de borracha a cobrir uma câmara de ar, até ao pneu que existe na atualidade, sendo um componente extremamente complexo e constituído por vários materiais distintos, tais como tecidos têxteis, aço e compostos de borracha [2].

O pneu de automóvel é, do ponto de vista mecânico, um reservatório de pressão constituído por uma membrana flexível. Do ponto de vista da ciência de materiais, o pneu é uma estrutura de borracha reforçada com cordas metálicas e têxteis, e que está submetido a deformações contínuas durante o seu período de vida útil. O desempenho e propriedades características dos pneus baseiam-se essencialmente nestes pontos de vista. Sucintamente, os pneus de automóvel devem oferecer suporte ao peso total do veículo, oferecer uma mobilidade eficiente, amortecer pequenas irregularidades presentes no piso da estrada e transmitir todas as forças de tração e de travagem [3].

Atualmente, o pneu pode ser distinguido pelo seu modo de construção. A construção de pneus pode ser distinguida em três tipos: pneus de construção diagonal (Figura 3 - a), pneus de construção diagonal com cintas metálicas (Figura 3 - b) e por fim, pneus de construção radial (Figura 3 - c). Os pneus de construção diagonal são utilizados essencialmente em camiões, reboques e equipamentos de agricultura, porque apresentam uma elevada resistência na parede lateral. Os pneus de construção radial requerem processos de fabrico mais complexos e são os pneus mais utilizados na atualidade, por apresentarem uma baixa resistência ao rolamento, excelente desempenho a altas velocidades e maior resistência ao desgaste, sendo por isso, utilizados nos automóveis [4].

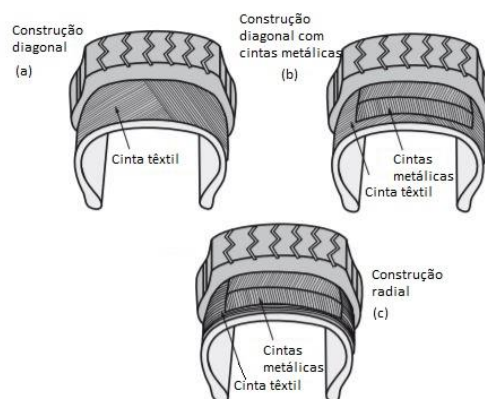


Figura 3 - Diferentes tipos de construção de pneus. Adaptado de [5].

2.1.1 Componentes de um pneu radial

Num pneu radial, é possível encontrar vários componentes distintos que têm como objetivo garantir a geometria e desempenho pretendidos. Os pneus de veículos ligeiros de construção radial, possuem uma camada têxtil em *nylon*[®] (*cap ply*), que tem como objetivo restringir e controlar o crescimento do pneu devido às forças centrífugas geradas a altas velocidades. Sem esta camada, o pneu pode atingir dimensões anormais durante a condução, ou também pode atingir a rotura das suas membranas [2]. A Figura 4 representa uma vista em corte de um pneu de construção radial para veículos ligeiros.

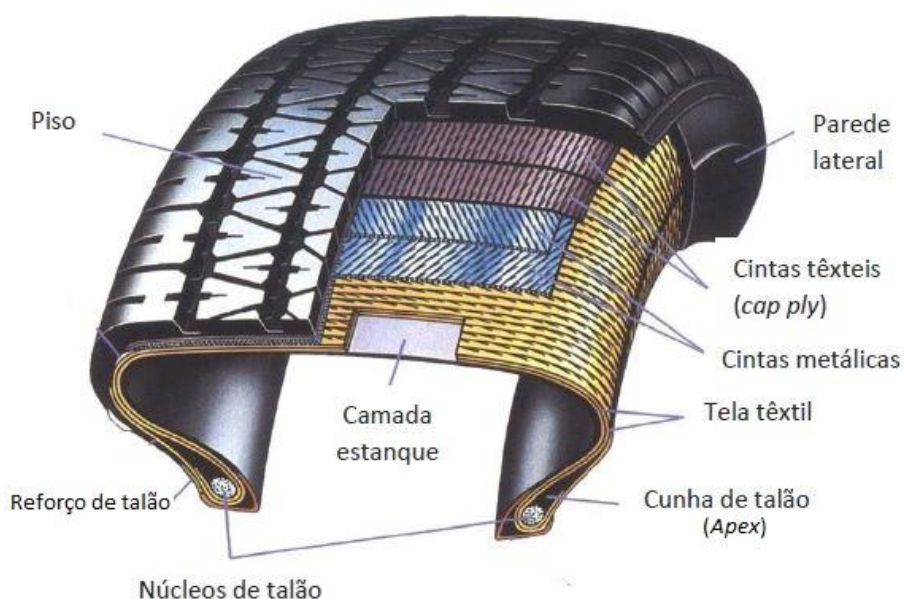


Figura 4 - Representação esquemática em corte de um pneu radial de veículos ligeiros. Adaptado de [2].

Além de controlar a forma geométrica do pneu, a camada de cintas de *cap ply* também previne a separação entre as cintas metálicas. A separação das cintas metálicas ocorre devido ao facto de existirem duas camadas de arame rígidas de aço numa matriz flexível e que são submetidas a deformações, originando um conflito. Como a orientação de uma camada metálica é oposta à direção da camada metálica seguinte, significa que quando os arames de aço de uma das cintas

se deslocam numa direção, os arames da camada posterior são deslocados radialmente, na direção oposta, conforme demonstrado na Figura 5 [6].

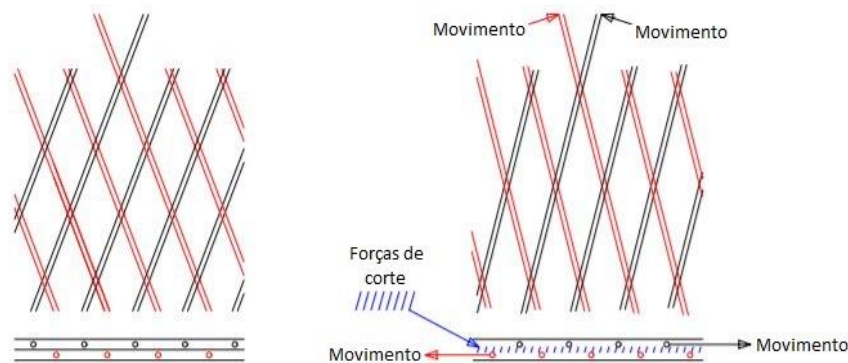


Figura 5 - Representação das forças de corte devido ao movimento entre cintas metálicas. Adaptado de [6].

Assim como o *cap ply*, todos os restantes componentes que fazem parte da construção de um pneu, afetam diretamente o seu comportamento através das propriedades que lhe conferem. Na Tabela 1 encontra-se uma breve descrição de cada um desses componentes.

Tabela 1 - Componentes presentes num pneu radial e suas funções [7].

Componente	Descrição	Representação esquemática
Camada estanque	Camada em composto de borracha que garante a estanquicidade do ar no interior do pneu.	
Núcleo de talão	Conjunto de arames impregnados com composto de borracha, colocados paralelamente entre si. Garantem a fixação do pneu à jante do veículo.	
Cunha de talão	Banda em composto de borracha e que é ligada posteriormente ao núcleo de talão. Oferece estabilidade direcional e controla a flexão do pneu.	
Reforço do talão	Tecido têxtil impregnado com composto de borracha colocado ao lado do talão, tornando-o mais resistente.	

Componente	Descrição	Representação esquemática
Tela têxtil	Tecido têxtil impregnado com composto de borracha que garante consistência ao pneu e resistência à pressão interna.	
Parede lateral	Banda em composto de borracha que protege a carcaça do pneu e controla o conforto oferecido pelo pneu. Algumas paredes laterais são mais rígidas e suportam o veículo mesmo em situação de fugas de ar de grande dimensão (SSR).	
Cintas metálicas	Arames de aço colocados paralelamente entre si e impregnados com composto de borracha. Restringem a expansão do pneu, reduzem a resistência ao rolamento e aumentam a resistência contra danos.	
Cintas têxtil	As cintas têxteis (<i>cap ply</i>), são conjuntos de cordas têxteis impregnadas com composto de borracha, formando uma tira com 10 mm de largura. Este componente controla a deformação do pneu a velocidades elevadas.	
Piso	Banda de borracha formada por três compostos de borracha distintos. É o componente responsável por transmitir aderência, resistência ao rolamento e estabilidade direcional ao veículo. O seu padrão determina a resistência do pneu à aquaplanagem.	

A combinação do núcleo de talão, cunha de talão e reforço de talão (opcional), resulta no talão.

2.2 Propriedades da borracha

2.2.1 Composição do pneu

Os componentes mencionados na Tabela 1 podem apresentar diferentes composições, consoante o objetivo que o pneu em construção tem. A alteração das propriedades dos materiais que formam esses componentes alteram diretamente o desempenho do pneu. As matérias-primas de natureza renovável são frequentemente utilizadas, tais como, a borracha natural, resinas e sílica. Atualmente, observa-se um esforço notório no desenvolvimento de

tecnologias que permitam fabricar materiais recicláveis na indústria de pneus [8]. De uma forma geral, os compostos de borracha seguem a formulação apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Matéria prima presente na formulação de um composto de borracha [9].

Grupo	Matérias-primas
Polímeros	Borracha natural e borracha sintética
Cargas	Negro de fumo, sílica e carbonato de cálcio
Agentes de proteção	Antioxidante, antiozonante e cera
Agentes de vulcanização	Ativador, promotor de reação, acelerador e retardador
Auxiliares de processamento	Óleo e resina

A Figura 6 representa as diferentes quantidades de cada material que, em conjunto, constituem o pneu.

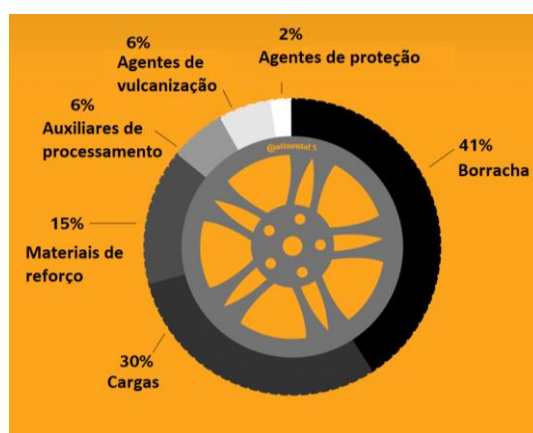


Figura 6 - Materiais presentes no pneu e sua distribuição [7].

2.2.1.1 Polímeros

Através da polimerização, os monómeros formam uma longa cadeia molecular, sendo esta a principal estrutura de um material polimérico. Os polímeros podem ser categorizados em: elastómeros, fibras, termoplásticos e termoendurecíveis [10]. As moléculas poliméricas podem ser amorfas ou cristalinas, sendo que geralmente os elastómeros são considerados sólidos amorfos [11].

Os elastómeros mais frequentemente utilizados são os seguintes:

- Borracha Natural (NR – *Natural Rubber*);
- Borracha sintética de Isopreno (IR – *Isoprene Rubber*);
- Borracha de Estireno-Butadieno (SBR – *Styrene Butadiene Rubber*);
- Borracha de Polibutadieno (BR – *Butadiene Rubber*);
- Borracha Etileno-Propileno-Dieno (EPDM - *Ethylene Propylene Diene Monomer*).

A borracha natural é extraída da seringueira (*Hevea brasiliensis*) e a mesma apresenta várias categorias catalogadas pela norma ASTM D 2227 (2015) [12]. As categorias baseiam-se no teor de terra presente na borracha. Geralmente, quanto maior for o teor de terra na borracha natural, mais baixo será o seu preço. Como esta matéria-prima provém da agricultura, a mesma pode apresentar uma oferta comercial variável no tempo e, por isso, é frequente na indústria

de pneus comparar o preço da borracha natural, com as borrachas sintéticas. Contudo, a substituição da borracha natural pelas borrachas sintéticas apresenta limites, devido à combinação única de propriedades, tais como, tensão de cedência, resiliência, adesividade.

As borrachas sintéticas apresentam, geralmente, propriedades físicas e químicas inferiores em relação à borracha natural, contudo, o seu preço apelativo permite obter produtos com custos mais reduzidos, mantendo um bom desempenho. Uma grande vantagem na utilização de borrachas sintéticas é a sua uniformidade. Geralmente, os processos de produção de borracha sintética são bastantes controlados e é possível identificar com precisão as propriedades do produto final. Relativamente à borracha natural, sendo um produto biológico, a mesma pode apresentar variações na sua qualidade. De todas as borrachas naturais, a borracha SBR é a mais utilizada na indústria de pneus pela sua relação preço/qualidade e também por melhorar a resistência à tração. A borracha BR é bastante conhecida por diminuir a resistência ao rolamento e por melhorar a durabilidade do pneu. Já a borracha EPDM é a menos utilizada na indústria e a sua maior vantagem é a resistência ao envelhecimento [13].

2.2.1.2 Cargas

As cargas podem ser consideradas como reforços ou não reforços. As cargas do tipo reforço têm como objetivo melhorar as propriedades mecânicas do composto, enquanto que as cargas do tipo não reforço desempenham um papel importante na redução do custo de produção do composto de borracha. As principais cargas utilizadas na indústria de pneus são o negro de fumo e a sílica, ambos funcionando como reforços. A dispersão de partículas de cargas na mistura do composto de borracha é determinante na manipulação das propriedades finais do composto [14].

O negro de fumo melhora as propriedades físicas do composto e provoca um incremento da viscosidade dos compostos à base de borracha. A sua cor escura deve-se à presença de um teor de carbono igual ou superior a 90% em forma de esferas de reduzida dimensão. Apesar da borracha natural apresentar uma cor acastanhada, o negro de fumo é responsável pela cor escura que os pneus apresentam. A adição desta carga afeta diretamente as propriedades de cura do composto, pelo que a sua adição deve ser devidamente controlada [15].

A sílica, geralmente, é uma carga utilizada em menor quantidade devido às suas propriedades e custo, contudo, combinando a sílica com negro de fumo, consegue-se melhorar as propriedades do composto de borracha que provocam um aumento da tração do pneu à estrada. A adição de sílica aumenta a resistência à flexão e tração, mas diminui o alongamento à rotura [16].

2.2.1.3 Agentes de proteção

Os elastómeros estão sujeitos a diferentes ações durante o seu período de vida útil, dependendo da área de aplicação. As cargas mecânicas são as mais vulgarmente aplicadas, mas frequentemente são acompanhadas pela ação de oxigénio, ozono, óleos, gordura e ácidos. Os pneus estão expostos a várias amplitudes térmicas devido ao ambiente onde operam e também pela geração de calor devido à fricção gerada durante a condução. As altas temperaturas favorecem a difusão de oxigénio, fomentando a oxidação do pneu [17]. Os antiozonantes protegem a superfície externa do pneu contra ataques de ozono, ataques esses que geram fendas na direção perpendicular à direção das tensões aplicadas. O ozono reage com as cadeias

moleculares da borracha, quebrando-as. Em paralelo com os antiozonantes, utilizam-se ceras à base de parafina para o mesmo efeito [18].

2.2.1.4 Agentes de vulcanização

A reação de borracha com enxofre é lenta, mesmo a elevadas temperatura. Para que um volume de borracha natural vulcanize na totalidade a 140°C, é necessário aguardar cerca de 4 horas. Para combater este problema, recorre-se a agentes de vulcanização que, como o nome indica, reduzem o tempo de vulcanização, acelerando a reação. Os aceleradores são utilizados em combinação com ativadores, por exemplo, o óxido de zinco [19].

Conforme o sistema de vulcanização utilizado e percentagem de cada componente, obtêm-se diferentes densidades de reticulação e, consequentemente, compostos de borracha com propriedades viscoelásticas distintas.

2.2.1.5 Auxiliares de processamento

Os auxiliares de processamento são adicionados ao composto de borracha para melhorarem o processamento do composto, i.e., auxiliar a dispersão de enchedor na mistura, controlar o nível de adesividade e a viscosidade. As resinas fenólicas são frequentemente utilizadas para controlarem o nível de adesividade do composto. Este parâmetro é essencial para evitar a adesão entre camadas adjacentes durante o processamento do composto de borracha [20].

2.2.1.6 Materiais de reforço

Os materiais de reforço não fazem parte da composição dos compostos de borracha, contudo, são materiais que, através de determinados processos de fabrico, são combinados com os compostos de borracha. Estes materiais garantem uma maior resistência e estabilidade ao pneu. Usualmente, estes materiais são arames de aço com um revestimento específico que promove uma maior adesão à borracha e também apresentam uma tensão de cedência até aos 4000 MPa, ou cordas têxteis com tensões de cedência na ordem dos 4500 MPa. Na Tabela 3 encontra-se um breve resumo das vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de cordas têxteis [5].

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de reforços têxteis [5].

Tipo	Vantagens	Desvantagens
Rayon	Resistente ao calor; Estabilidade dimensional.	Custo elevado; Sensível à humidade.
Aramida	Elevada resistência mecânica e rigidez; Resistente ao calor.	Processamento de elevada dificuldade; Custo elevado;
Nylon®	Elevada resistência mecânica; Resistente ao calor.	Custo elevado;
Poliéster	Baixa contração de material; Baixo custo; Alta resistência mecânica.	Baixa resistência ao calor em comparação com os restantes reforços.

2.2.2 Vulcanização

A maior parte dos componentes à base de borracha, como pneus e outras peças mecânicas, não podem ser produzidos sem vulcanização. A borracha no seu estado normal, i.e., sem estar vulcanizada, não mantém a sua forma após sujeita a grandes deformações e pode apresentar uma elevada adesividade. A adição de enxofre à borracha é a base do processo de vulcanização,

que foi evoluindo e mais componentes foram adicionados de forma a tornar este processo mais estável e rentável. A vulcanização provoca um aumento da elasticidade, enquanto diminui a plasticidade. Através da reticulação, as cadeias poliméricas lineares são interligadas através de ligações covalentes (Figura 7).

O processo de vulcanização necessita de cuidados especiais para evitar a vulcanização prematura. Deve-se garantir que existe resistência à vulcanização prematura (*Scorch resistance*), o suficiente para permitir a manipulação da borracha em todos os processos até chegar à vulcanização. A resistência à vulcanização prematura é medida pelo tempo, a uma determinada temperatura, para a formação de reticulação, indicada pela subida da viscosidade [2].

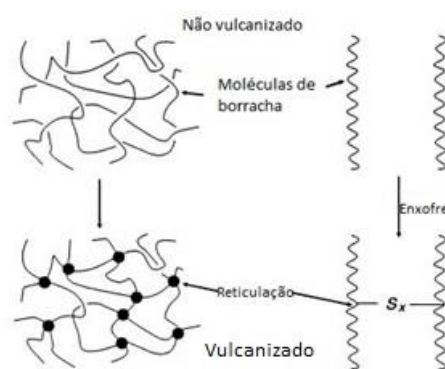


Figura 7 - Processo de reticulação polimérica. Adaptado de [2].

2.2.3 Comportamento reológico e viscoelástico da borracha

Os materiais elastoméricos apresentam características idênticas a materiais de natureza líquida e sólida, sendo por isso considerados como materiais viscoelásticos. A reologia é a ciência que analisa o escoamento e deformação da matéria quando sujeita a ação de forças, i.e., é a ciência que estuda a resposta interna dos materiais quando lhe são aplicadas diferentes forças. O parâmetro mais importante que define o fluxo de borracha é a viscosidade, que representa a resistência ao fluxo de material. A viscosidade pode ser entendida como a razão entre a tensão de corte e a taxa de corte imposta no fluido. Se imaginarmos um fluxo entre duas placas planas paralelas entre si, observa-se que a taxa de corte varia não linearmente, e em que toma o valor nulo no eixo central, atingindo o valor máximo junto às paredes das placas (Figura 8) [21]. Os principais ensaios para garantir a qualidade do produto final estão relacionados com o comportamento de vulcanização e características de processabilidade do composto de borracha utilizado.

Considerando os vários processos utilizados no processamento de borracha, é facilmente perceptível que o composto de borracha está sujeita a uma vasta gama de taxas de corte, e por isso, os testes de processabilidade podem ser realizados em equipamentos sob compressão, corte rotacional e extrusão. Atualmente, o equipamento mais utilizado é o viscosímetro de *Mooney*, que determina a viscosidade do elastómero em estado não vulcanizado, em função da taxa de corte. Quanto maior for o valor da viscosidade medida, menor será a elasticidade do elastómero [22].

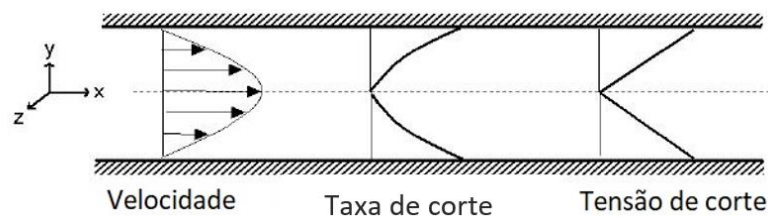


Figura 8- Perfis de velocidade, taxa de corte e tensão de corte num fluxo entre duas placas planas. Adaptado de [21].

O viscosímetro de *Mooney* funciona através da rotação de um rotor numa cavidade aquecida e fechada, preenchida com composto de borracha (Figura 9). Geram-se tensões de corte crescentes entre o composto e o rotor, resultando num valor de binário medido em unidades arbitrárias denominadas por unidades de Mooney (MU – *Mooney Units*), que se relacionam diretamente com o binário. Este ensaio segue a norma ASTM D-1646 [23].

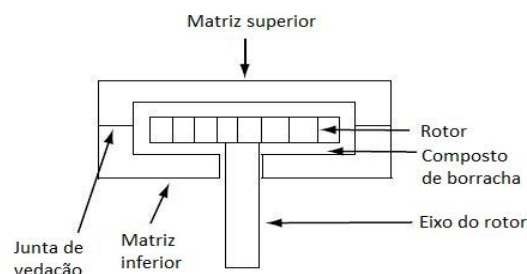


Figura 9 – Vista em corte de um viscosímetro de Mooney. Adaptado de [23].

No viscosímetro de Mooney, é possível configurar o equipamento de duas formas distintas, i.e., o equipamento pode ser configurado para realizar o ensaio de determinação do tempo de pré vulcanização ou para determinação das propriedades reológicas do composto. No ensaio de avaliação do tempo de pré vulcanização, o rotor tem um movimento de rotação e a determinada altura do teste, o composto de borracha atinge um estado de cura tão avançado, que o rotor provoca rotura na amostra, parando o ensaio. Nos testes de reometria, com reómetro de disco oscilatório (ODR), o movimento de rotação é substituído por um movimento de rotação oscilatório de baixa magnitude, permitindo avaliar a viscosidade do composto além do tempo de pré vulcanização. Na Figura 10 pode-se observar que a curva padrão de um ensaio ODR permite determinar o valor máximo de binário, mesmo após o tempo de pré vulcanização [24].

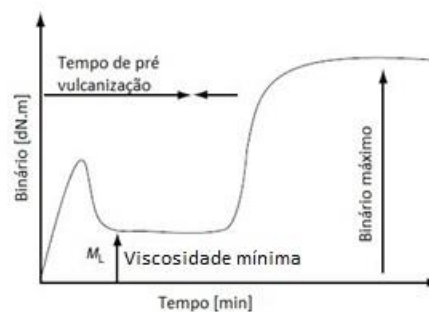


Figura 10 - Curva característica de um ensaio realizado num reómetro de disco oscilatório. Adaptado de [24].

O analisador de processamento de borracha (RPA – *Rubber Process Analyser*) é um reómetro dinâmico torsional, com uma cavidade bicônica. O RPA é um equipamento que funciona sem rotor e possui um motor robótico que pode ser programado diretamente para variar a frequência de forma sinusoidal da matriz inferior (Figura 11). A grande vantagem deste equipamento é que não necessita de um controlo tão rigoroso do tamanho da amostra [25]. Este equipamento consegue determinar, com elevada precisão, as seguintes propriedades: Binário elástico (S'), Binário viscoso (S''), módulo de corte complexo (G^*), viscosidade dinâmica (η') e viscosidade dinâmica complexa (η^*) [26].

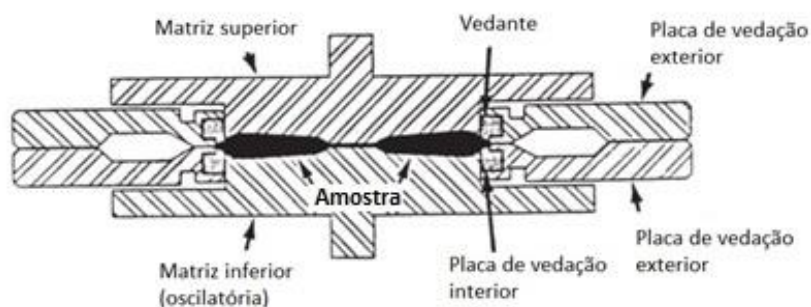


Figura 11 - Representação em corte de um RPA. Adaptado de [25].

2.3 Análise numérica aplicada a fluidos não newtonianos

2.3.1 Propriedades físicas

Um sólido linear elástico obedece à lei de Hooke, i.e., a tensão é proporcional à deformação. Já um líquido viscoso obedece à lei de Newton, i.e., a tensão é proporcional à taxa de deformação. No caso dos elastómeros, pode-se afirmar que o seu comportamento tem propriedades entre os dois casos referidos anteriormente. A resposta destes materiais, que não é linear elástica nem típica de líquidos ideais, é denominada por comportamento viscoelástico.

O comportamento viscoelástico é descrito pelos modelos de Maxwell e Voigt. No modelo de Maxwell, os dois elementos mecânicos estão dispostos em série, significando que quando se lhes aplica uma tensão, a deformação sofrida é dada pela soma das deformações de cada um dos elementos, enquanto que a tensão em cada um dos elementos é igual à tensão imposta. O modelo Voigt pode ser representado por um amortecedor e uma mola puramente elásticos, colocados em paralelo (Figura 12) [11].

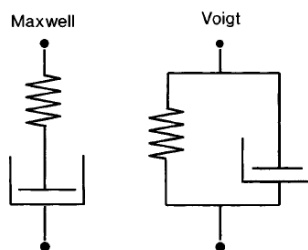


Figura 12 - Modelos de materiais viscoelásticos [11].

Os polímeros amorfos apresentam um estado vítreo quando se situam abaixo da temperatura de transição vítrea, e um estado plástico acima desta temperatura (Figura 13). Abaixo da temperatura de transição vítrea, as interações moleculares entre átomos não ligados, são fortes e as cargas são transmitidas de átomo para átomo. Se uma deformação elástica for aplicada ao polímero, praticamente todas as ligações carbono-carbono são sujeitas a tensões e, por isso, tornam-se distorcidas. Quando são aplicadas grandes deformações plásticas, os átomos permutam de posição, levando a deformações não recuperáveis. Acima da temperatura de transição vítrea, as interações entre átomos não ligados, são inexistentes. Isto significa que apenas os entrelaçamentos são os únicos pontos de conexão no material, e os átomos são livres de deslocamento. As propriedades elásticas existem devido à entropia da variação das posições dos entrelaçamentos [27].

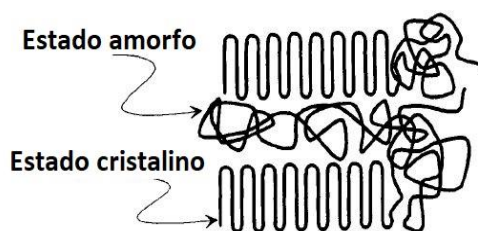


Figura 13 - Microestrutura de um material semicristalino. Adaptado de [27] .

Habitualmente, os polímeros apresentam uma estrutura semicristalina, onde se verifica um estado amorfo e cristalino em simultâneo [27].

A seleção do negro de fumo é um fator crítico para criar um composto de borracha que possua determinadas características, e que se destinem a determinado uso. Para a obtenção de compostos de borracha de elevada qualidade, o tipo de negro de fumo e o sistema de vulcanização devem ser cuidadosamente selecionados [28].

2.3.2 Introdução à dinâmica de fluidos computacional

A CFD (*Computational Fluid Dynamics* ou Dinâmica de Fluidos Computacional) é uma técnica de análise de sistemas que envolvem o escoamento de fluidos, transferência de calor e fenómenos associados, tais como reações químicas, através de simulações computacionais. Nos últimos anos a dinâmica de fluidos computacional tem sofrido uma evolução notória e os recentes desenvolvimentos tornaram esta técnica mais poderosa e ao alcance de um maior volume de utilizadores na indústria. Atualmente, esta técnica está implementada em diversas áreas, e.g., aerodinâmica de aviões e veículos, hidrodinâmica de navios, análises de combustão interna em motores e turbinas, processos químicos, sistemas AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado), metrologia e engenharia biomédica [29].

Na íntegra, a dinâmica dos fluidos computacional resulta da interação da mecânica dos fluidos com a matemática e ciência computacional, conforme ilustrado na Figura 14. A mecânica dos fluidos estuda os fluidos em movimento ou estacionários, em que esse movimento pode ser descrito através de equações matemáticas, denominadas por equações governantes. Essas equações são resolvidas através de meios computacionais sofisticados.

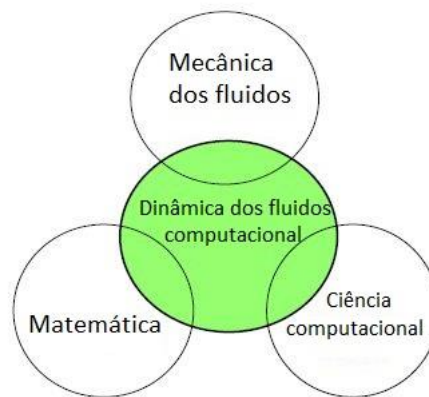


Figura 14 - Diferentes disciplinas que compõem a dinâmica dos fluidos computacional. Adaptado de [30].

Tradicionalmente, para a resolução de problemas da dinâmica de fluidos e de transferência de calor, efetuam-se análises experimentais e analíticas que suportam as simulações computacionais.

Com a aplicação da dinâmica dos fluidos computacional, é possível reduzir substancialmente os custos e tempo para desenvolvimento de novos projetos, estudar sistemas de grande volume, assim como sistemas que estejam sujeitos a condições nocivas para o ser humano. Contudo, esta técnica requer um elevado conhecimento e experiência por parte do utilizador, assim como meios computacionais sofisticados que atingem custos elevados [30].

2.3.3 Transferências de calor

As transferências de calor são formas de transporte de energia entre corpos, devido a diferenças de temperatura. Os três modos de transferência de calor são [31]:

- Condução;
- Convecção;
- Radiação.

O transporte de calor por condução ocorre devido à troca de energia entre moléculas, sem que ocorra movimento molecular, ou também devido ao movimento livre de eletrões, se presentes. Este modo de transferência de calor depende essencialmente das propriedades dos corpos e pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases, onde existam diferenças de temperatura.

As moléculas presentes nos líquidos e gases têm liberdade de movimento e, quando existem regiões quentes e frias, há a movimentação de matéria devido à variação de densidade. Essa movimentação promove as trocas de energia entre moléculas. Este fenómeno é descrito como convecção. A convecção pode ser natural, forçada (e.g., o movimento do fluido existe devido a uma força externa) ou uma mistura de ambos.

A radiação é o único modo de transferência de calor que não necessita de um meio material para que existam trocas de energia. A radiação térmica é a propagação de energia, através de ondas eletromagnéticas, tendo como origem uma superfície de um corpo. Quando estas ondas atingem outras superfícies, uma parte dessa radiação é refletida, outra parte é transmitida e a restante, absorvida [32].

2.3.4 Pré-processamento

Durante a utilização de *software* CFD, no pré-processamento colocam-se todos os dados relativos ao problema em análise através de uma interface e, subsequentemente, a transformação desses dados é processada pelo *Solver*. Os passos para a definição do pré-processamento são os seguintes [29]:

- Definição e criação da geometria de interesse, i.e., o domínio computacional [30];
- Caracterização dos materiais envolvidos;
- Especificação das condições de fronteira nas faces que coincidem com as fronteiras do domínio;
- Seleção dos fenómenos físicos e químicos que necessitam de ser modelados;
- Geração da malha.

A precisão na solução do problema está relacionada com o número de elementos, na medida em que quanto maior for o seu número, maior será a precisão da solução obtida. Contudo, deve-se considerar o nível de precisão pretendido e o tempo de cálculo para obter um compromisso entre ambos. As malhas ótimas são, geralmente, não uniformes, i.e., mais refinadas nas zonas onde ocorrem grandes variações geométricas de nó em nó, e menos refinadas nas zonas com variações relativamente reduzidas [29].

2.3.5 Processamento

Existem três técnicas de solução numérica distintas: diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos [29, 32]. Neste trabalho foi utilizado o *software* Autodesk® CFD 2019 e, por isso, apenas se irá abordar o método utilizado pelo *software*, i.e., o método dos elementos finitos.

O método dos elementos finitos divide o modelo CAD em elementos finitos de tamanho reduzido e de formas geométricas simples. Durante a fase de processamento, as equações diferenciais parciais são resolvidas em cada elemento. Quando a contribuição de todos os elementos é reunida, obtém-se um sistema de equações matricial [33, 34].

De uma forma geral, todos os *softwares* de análise CFD seguem os seguintes passos:

- Integração das equações governantes de fluxo de fluido em todos os elementos do domínio de controlo;
- Conversão do resultado da integração das equações governantes, resultando num sistema algébrico de equações – Discretização;
- Solução das equações algébricas através de um método iterativo.

2.3.6 Pós-processamento

No pós-processamento, consegue-se visualizar e exportar os resultados obtidos para os vários parâmetros envolvidos. No Autodesk® CFD 2019, encontram-se disponíveis as seguintes ferramentas: Controlos globais, Planos, Tracejamento de partículas, Superfícies ISO, Volumes ISO, Paredes, Pontos, Transferência de resultados e a geração de um relatório. Com a combinação destas ferramentas, é possível avaliar os parâmetros envolvidos no fluxo a estudar.

2.3.7 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos é uma ferramenta de análise numérica para a determinação de soluções aproximadas para problemas de grande dimensão na área da engenharia. As equações

governantes podem ser facilmente derivadas, mas a solução analítica para esses problemas apresenta uma dificuldade elevada. Essa dificuldade deve-se à geometria ou à complexidade de carregamentos nas condições fronteira.

Este método considera que a região de solução é composta por vários elementos, de reduzida dimensão e conectados entre si, e efetua uma aproximação através das equações governantes, i.e., as equações diferenciais parciais são reduzidas em equações simultâneas lineares ou não lineares. A discretização de elementos finitos passa por reduzir um problema contínuo, num número finito de elementos e com nós específicos, referidos como nós [32].

As equações que expressam as propriedades de cada elemento são constituídas por uma matriz do elemento (LHS - *Left Hand Side*) e um vetor de carga,

$$[K]_e = \frac{Ak}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\{f\}_e = \begin{Bmatrix} Q_i \\ Q_j \end{Bmatrix} \quad (2)$$

onde Q representa o calor total transferido, k a condutividade térmica, l o comprimento linear numa dimensão do elemento e i e j representam os nós que formam o elemento.

Supondo ϕ como sendo a variável desconhecida, pode-se então escrever o sistema global de equações,

$$[K]\{\phi\} = \{f\} \quad (3)$$

E desta forma se obtêm os valores nodais da variável em interesse, e.g., temperatura [32].

2.3.8 Equações governantes

As equações governantes da dinâmica dos fluidos computacional seguem as leis de conservação da física. Consequentemente, a massa de um fluido é conservada, as alterações do momento são iguais ao somatório de forças (segunda lei de Newton) e as alterações de energia são iguais ao somatório da taxa de adição de calor e do trabalho de uma partícula do fluido (primeira lei da termodinâmica) [29].

Na análise de fluxos de fluidos a uma escala macroscópica (superior a $1 \mu m$), a estrutura molecular e o movimento molecular podem ser desprezados, i.e., o fluido é tratado como contínuo. Uma pequena partícula ou um ponto no fluido é o elemento de menor dimensão desse fluido, cujas propriedades macroscópicas não são influenciadas pelas moléculas individuais.

As dimensões desse elemento têm como dimensão dos lados $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ (Figura 15) [29].

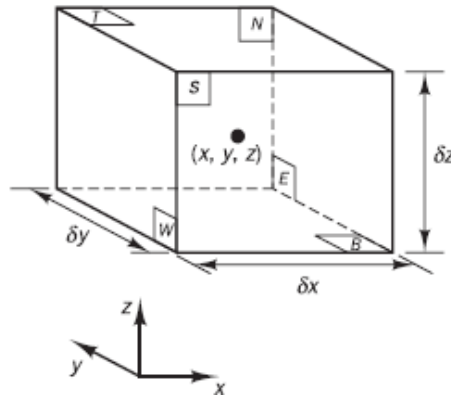


Figura 15 - Elemento fluido para as leis de conservação [29].

Todas as propriedades do fluido são dependentes do espaço e tempo, pelo que as mesmas podem ser escritas da seguinte forma:

- Densidade – $\rho(x, y, z, t)$;
- Pressão – $p(x, y, z, t)$;
- Temperatura – $T(x, y, z, t)$;
- Vetor de velocidade – $u(x, y, z, t)$.

O elemento considerado é de tal reduzida dimensão, que as propriedades do fluido podem ser expressas com precisão através dos dois primeiros termos de uma série de *Taylor*. Utilizando como referência a Figura 15, a determinação da pressão nas faces W e E, em que ambas estão à distância de $\frac{1}{2}\delta_x$ do centro do elemento, pode ser expressa na seguinte forma,

$$p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \quad \text{e} \quad p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \quad (4)$$

2.3.8.1 Conservação de massa

A equação da conservação de massa admite que a taxa de incremento de massa num elemento fluido é igual à taxa líquida de fluxo de massa nesse mesmo elemento, e pode ser expressa por [29, 35],

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

onde ρ representa a densidade, p a pressão e u, v, w representam as componentes do vetor de velocidade nas direções x, y, z do sistema cartesiano tridimensional, respetivamente.

Para fluidos incompressíveis, a densidade é constante e, por isso, a equação da conservação de massa pode ser expressa por,

$$\text{div}(\mathbf{u}) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

A dedução detalhada da equação da conservação de massa pode ser consultada no ANEXO 1 – Equação da conservação da massa.

2.3.8.2 Conservação do momento

Com recurso à segunda lei de Newton, a equação da conservação de momento indica que a taxa de variação do momento numa partícula do fluido é igual ao somatório das forças nessa partícula. Essas forças podem ser forças de superfície ou forças de corpo.

A equação da conservação de momento é então dada, para as três direções do referencial cartesiano, por:

- Componente X do momento,

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (7)$$

- Componente y do momento,

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (8)$$

- Componente Z do momento,

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (9)$$

onde τ_{ij} representa as tensões de corte (os sufixos i e j indicam que a componente da tensão de corte atua na direção j e numa superfície normal à direção i), t o tempo e S_{Mx} , S_{My} , S_{Mz} representam as componentes de fontes externas de momento por unidade de volume e tempo, nas direções x , y , z , respetivamente. Dado que esses termos incluem as forças de corpo, a modelação de forças de corpo relativas à gravidade seria igual a $S_{Mx} = 0$, $S_{My} = 0$, $S_{Mz} = -pg$.

A explicação detalhada da dedução das equações da conservação de momento encontra-se no ANEXO 2 – Equação da conservação de momento.

2.3.8.3 Conservação de energia

A equação da energia é derivada da primeira lei da termodinâmica, que indica que a taxa de variação de energia de um elemento fluido é igual à taxa de adição de calor a esse elemento, mais a taxa de trabalho realizado sobre esse mesmo elemento. A energia de um fluido é a soma da energia interna (térmica), energia cinética e energia potencial gravítica.

A equação da conservação de energia é dada pela equação (10),

$$\begin{aligned} \rho \frac{DE}{Dt} = & -\text{div}(pu) + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \text{div}(-k \text{ grad } T) + S_E \end{aligned} \quad (10)$$

onde E representa a energia específica de um fluido, T a temperatura e S_E uma fonte externa de energia por unidade de volume e tempo.

A explicação da dedução da equação da conservação de energia encontra-se no ANEXO 3 – Equação da conservação de energia.

2.3.9 Equações de Navier-Stokes

As equações de Navier-Stokes (N-S) descrevem a física associada ao fluxo de fluidos, e assumem uma relação linear entre o tensor de tensões e o gradiente de velocidade. Isto é particularmente verdade para os fluidos Newtonianos. Já os fluidos não Newtonianos não satisfazem esta relação. No caso destes fluidos, é necessário utilizar um modelo para as tensões viscosas [36, 37].

Para fluidos não Newtonianos, o tensor de tensões viscosas, $\vec{\tau}$, (Figura 16) é dado por [38],

$$\vec{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} \end{bmatrix} = \eta \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} = \eta \vec{S} \quad (11)$$

A divergência do tensor de tensões viscosas é então dada por,

$$\nabla \cdot \vec{\tau} = \nabla \eta \cdot \vec{S} + \eta \nabla \cdot \vec{S} = \nabla \eta \cdot \vec{S} + \eta \nabla \cdot \vec{V} \quad (12)$$

O termo de compressibilidade do fluido, de acordo com a assunção de Stokes é,

$$\frac{1}{3} \nabla (\eta \nabla \cdot \vec{V}) \quad (13)$$

Finalmente, a equação do momento é,

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \vec{f} - \nabla p + \nabla \eta \cdot \vec{S} + \eta \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{3} \nabla (\eta \nabla \cdot \vec{V}) \quad (14)$$

onde $\vec{V}$ representa o vetor velocidade do fluido, $\vec{f}$ o vetor de forças de corpo, g a aceleração gravítica e $\vec{S}$ a taxa de deformação viscosa.

A equação de N-S é ligeiramente diferente para os fluidos não Newtonianos, na medida em que a viscosidade dinâmica não é constante e, por isso, deve ser utilizado um modelo de viscosidade para descrever essa não linearidade. O tensor de tensões viscosas é o mesmo para a equação de N-S para fluidos Newtonianos, contudo, a sua divergência é diferente [38, 39].

No ano 2000, a equação de N-S foi selecionada como sendo um dos sete problemas *Millennium* declarados pelo *Clay Mathematics Institute of Cambridge*, uma vez que existem algumas inconsistências com a equação em alguns fluxos de fluidos especiais [38].

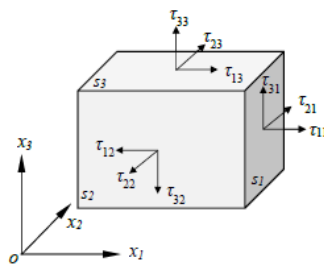


Figura 16 - Ilustração do tensor tensão [38].

2.3.10 Tipos de malha

Na área da dinâmica de fluidos computacional, recorre-se essencialmente a dois tipos de malhas para definição de geometrias complexas (Figura 17).

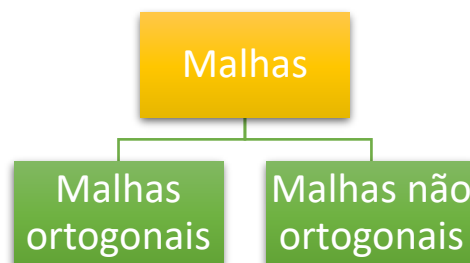


Figura 17 - Principais grupos de malhas.

As malhas ortogonais são malhas onde as linhas que separam os elementos são paralelas com o sistema de coordenadas cartesiano. Devido à maioria dos problemas de engenharia apresentarem geometrias complexas, as malhas ortogonais não se adequam. Para uma situação do cálculo do fluxo de fluido através de vários tubos, a utilização de uma malha ortogonal gera resultados de reduzida precisão e dificuldades na definição correta das condições fronteira (Figura 18) [29].

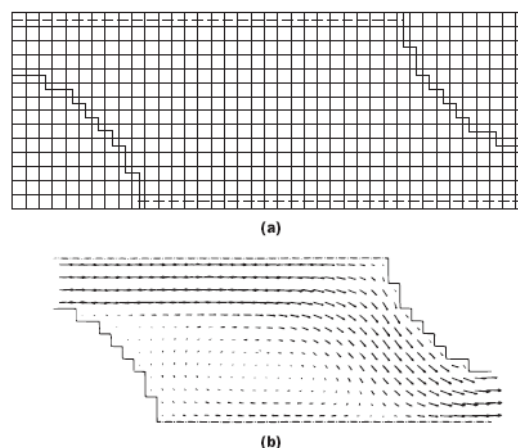


Figura 18 - Malha cartesiana para representar um fluxo através de tubos: (a) malha cartesiana (b) padrão de fluxo obtido [29].

De forma a contornar as limitações impostas por malhas ortogonais, podem ser utilizadas malhas não ortogonais (Figura 19). A vantagem destas malhas passa pela sua capacidade de utilizar coordenadas curvilíneas para as fronteiras de geometria, significando que todos os elementos apenas pertencem ao domínio, tornando a simulação mais eficiente.

Utilizando elementos de dimensão semelhante, é possível verificar que, para o mesmo problema, os resultados tornam-se muito mais precisos, principalmente nas zonas de fronteira geométrica (Figura 19).

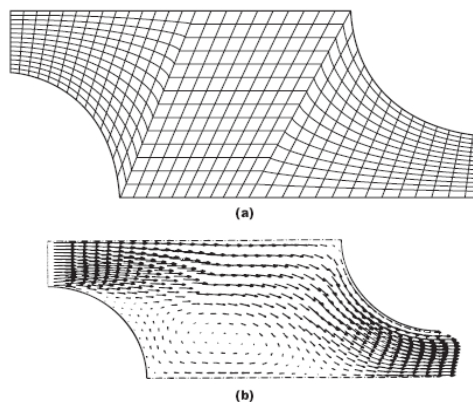


Figura 19 - Malha não ortogonal para o escoamento de fluido entre tubos: (a) malha não ortogonal (b) padrão de fluxo obtido [29].

Por último, existem ainda as malhas não estruturadas (Figura 20) que são mais flexíveis, i.e., adaptam-se às fronteiras geométricas sem restrições. Este tipo de malha pode ser utilizado em qualquer método de discretização e os elementos podem assumir várias formas, passando pelos triângulos e quadriláteros para geometrias a 2D (duas dimensões) e prismas e hexaedros para geometrias a 3D (três dimensões) Por vezes utilizam-se, elementos de forma geométrica distinta na mesma malha.

A grande vantagem das malhas não estruturadas reside no facto de as mesmas não possuírem um arranjo de linhas que respeite um sistema de coordenadas, significando que a malha pode ser concentrada onde é necessária sem desperdício de poder computacional. Na atualidade, os sistemas de geração automática deste tipo de malha são vastamente utilizados em *software* comercial, porque permitem reduzir os tempos despendidos na geração da malha, aumentando a eficácia da análise numérica [29].

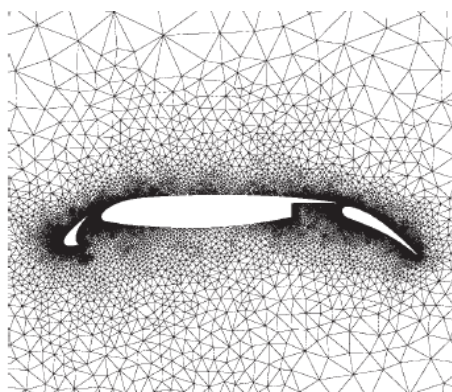


Figura 20 - Malha não estruturada com elementos triangulares para a simulação de um aerofólio [29].

2.3.11 Modelos de viscosidade

Encontram-se disponíveis na bibliografia vários modelos de viscosidade, sendo que os principais estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Diferentes modelos de viscosidade.

Modelo	$\eta(\dot{\gamma})$	
<i>Power Law</i>	$K \dot{\gamma}^{n-1}$	(15)
<i>Carreau</i>	$(\eta_0 - \eta_\infty)(1 + (\lambda \dot{\gamma})^2)^{\frac{n-1}{2}} + \eta_\infty$	(16)
<i>Sisco</i>	$\eta_0 + K \dot{\gamma}^{n-1}$	(17)
<i>Cross</i>	$\eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + \alpha \dot{\gamma}^n}$	(18)

A viscosidade a uma taxa de corte nula é representada por η_0 e a uma taxa de corte infinita por η_∞ . λ representa uma constante de tempo em que o fluido muda de Newtoniano para um comportamento de *shear thinning*. n é o índice de *Power Law*, K é o índice de consistência e α a constante de tempo do modelo *Cross*. A taxa de corte é representada por $\dot{\gamma}$.

Estes modelos de viscosidade apenas dependem da taxa de corte, o que significa que estes fornecem dados de viscosidade em função da taxa de corte. A viscosidade é altamente influenciável pelas mudanças de temperatura e taxas de corte, principalmente nos materiais poliméricos.

A Autodesk® desenvolveu a equação (19) que permite definir a viscosidade de um material em função da taxa de corte e da temperatura. Desta forma, é possível ter apenas uma equação que define a viscosidade para várias temperaturas e taxas de corte em contraste com os modelos apresentados na Tabela 4, em que é necessário definir várias equações para definir a viscosidade para cada uma das temperaturas. Esta diferença é de extrema importância no domínio computacional, porque em simulações numéricas é recorrente existirem situações em que o fluido em análise sofre variações de temperatura.

$$\ln(\eta) = A_1 + A_2 \ln(\dot{\gamma}) + A_3 T + A_4 [\ln(\dot{\gamma})]^2 + A_5 [\ln(\dot{\gamma})] T + A_6 T^2 \quad (19)$$

A temperatura é representada por T e os coeficientes de regressão linear por A_i .

2.3.12 Método dos resíduos ponderados

Atualmente existem vários métodos para a determinação de uma solução aproximada para um determinado problema, tais como:

- Método de *Ritz*;
- Método de *Rayleigh Ritz*;
- Método dos resíduos ponderados.

As aplicações informáticas mais utilizadas recorrem ao método dos resíduos ponderados. Dentro deste método existem ainda cinco métodos, sendo o mais utilizado o método dos resíduos ponderados de *Galerkin*. O método dos resíduos ponderados é uma técnica para obtenção de soluções aproximadas de equações diferenciais. Este método apresenta-se como uma ferramenta poderosa para a resolução de equações diferenciais através de uma forma simples [40].

Suponha-se uma equação diferencial do tipo,

$$L(\Phi) = 0 \quad (20)$$

em que se assume uma solução aproximada $\bar{\Phi}$ cujos parâmetros são,

$$\bar{\Phi} = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (21)$$

onde a representa os parâmetros. A substituição de $\bar{\Phi}$ na equação diferencial gera um resíduo R , definido como

$$R = L(\bar{\Phi}) \quad (22)$$

O objetivo passa por obter um valor residual, o mais próximo possível de zero.

$$\int_D W_i R \, dx = 0 \quad (23)$$

onde W_i é a função peso e a integração é feita em relação ao domínio de interesse D . Desta forma, obtém-se um sistema de equações lineares em função dos coeficientes a_i [41].

2.4 Termografia

A temperaturas superiores a 0 K, os corpos emitem radiação térmica. A intensidade dessa radiação depende essencialmente do seu comprimento de onda (λ) e da temperatura do corpo [42]. Na física, a luz, a radiação ultravioleta e a radiação infravermelha podem ser descritas como ondas eletromagnéticas.

Através do comprimento de onda e intensidade da radiação emitida por um corpo, é possível determinar a sua temperatura superficial. A intensidade da radiação emitida por um corpo, em função do comprimento de onda e temperatura superficial é dada por:

$$Q_\lambda = \frac{A}{\lambda^5 \left(e^{(B/\lambda T)} - 1 \right)} \quad (24)$$

onde Q_λ é a intensidade da radiação emitida (W) num determinado comprimento de onda, λ o comprimento de onda (m), T a temperatura da superfície (K) e A e B representam constantes: $3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$ e $1,439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, respetivamente. A equação (24) gera uma série de curvas que descrevem a quantidade de radiação emitida para cada

comprimento de onda e para várias temperatura de superfície (Figura 21). A radiação total emitida (Q_{Total}) por um corpo pode ser obtida pela integração da equação (24), resultando:

$$Q_{Total} = \sigma.T^4 \quad (25)$$

onde σ representa a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$).

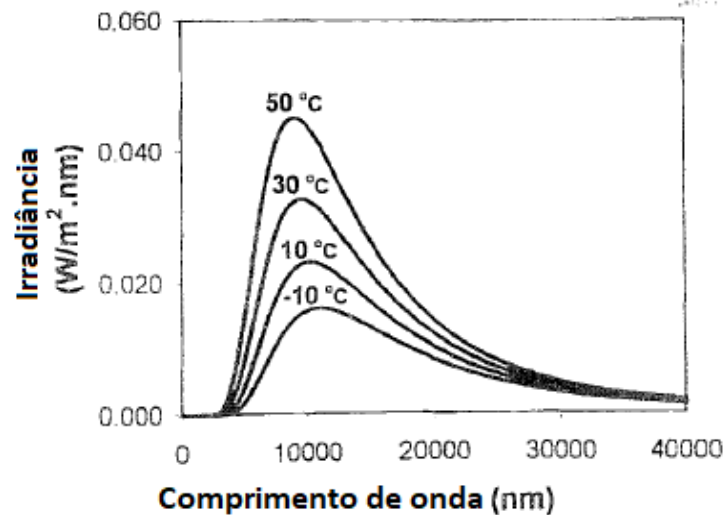


Figura 21 - Irradiância de um corpo negro. A área abaixo de cada curva é descrita pela equação(25). Adaptado de [43].

A temperatura de uma superfície está relacionada diretamente com o comprimento de onda, na medida em que quanto maior for a temperatura, menor será o comprimento de onda. A relação do comprimento de onda com a temperatura superficial pode ser descrita pela lei de Wein,

$$\lambda_{max} = \frac{2,9}{T} \quad (26)$$

onde λ_{max} é o comprimento de onda máximo de emissão (mm) [43].

O espectro eletromagnético apresenta vários tipos de radiação (Figura 22), consoante a gama de comprimentos de onda. A radiação visível situa-se entre os 400 nm e os 700 nm, significando que, por exemplo, um objeto à temperatura ambiente (290 K), emite uma radiação de intensidade máxima a um comprimento de onda de 10 μm . Portanto, um ser humano consegue sentir a radiação do tipo infravermelho, mas não a consegue visualizar. Na Terra, a temperatura de objetos entre os -10°C e os 50°C remete para comprimentos de onda entre os 9 μm e 11 μm , conforme indica a equação (26). Consequentemente, a medição de radiação emitida por tais objetos é denominada por termografia infravermelha [43].

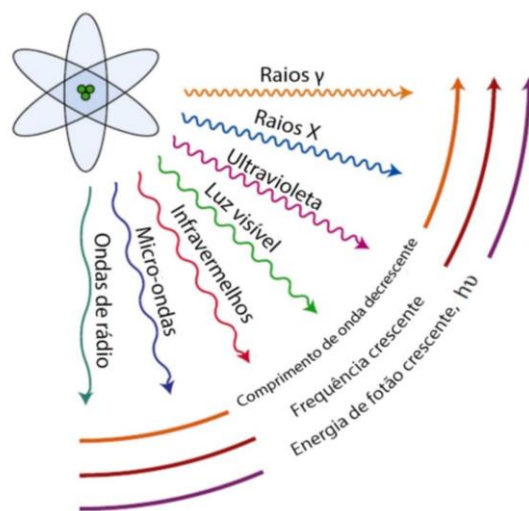


Figura 22 - Espectro eletromagnético e seus parâmetros. Adaptado de [44].

As ondas eletromagnéticas mantêm a sua forma enquanto se deslocam no espaço e no tempo, a elevadas velocidades (velocidade da luz em condições de vácuo). Nas ondas eletromagnéticas, os distúrbios são o campo magnético e o campo elétrico, sendo perpendiculares entre si, e também, perpendiculares à direção de propagação, sendo por isso denominadas por ondas transversais (Figura 23)[45].

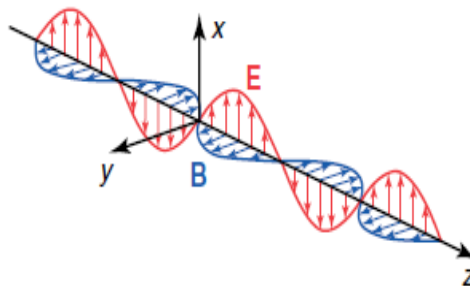


Figura 23 - Direção do campo elétrico e magnético [42].

Para a radiação infravermelha, o polarizador de ondas é constituído por uma grelha condutora microscópica e, desta forma, apenas as ondas cujo campo elétrico oscila perpendicularmente à grelha, são transmitidas (Figura 24).

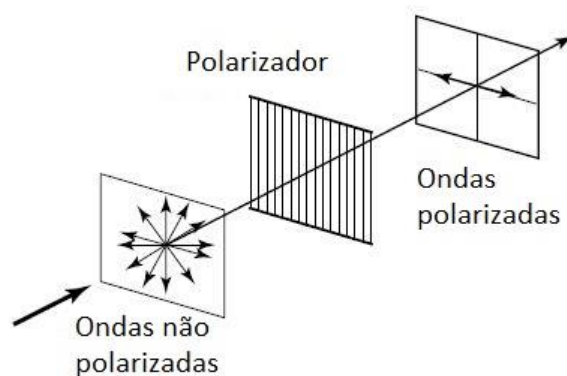


Figura 24 - Polarização de radiação infravermelha [42].

Na fronteira entre dois materiais, uma parte da radiação incidente é refletida e uma parte é refratada seguindo as leis da reflexão e da refração, respetivamente. Em todas as aplicações práticas de câmaras de infravermelhos, um objeto emite radiação na direção da câmara que é, posteriormente, focada no detetor e medida quantitativamente. Dependendo do material, a emissividade pode assumir valores, assim como também para um mesmo material, pode-se encontrar vários valores de emissividade, originando uma situação desfavorável. Em algumas situações, os valores de emissividade podem oscilar entre 0,02 e 0,8 para uma superfície metálica que seja polida e uma superfície com uma acabamento de elevada rugosidade, respetivamente [45].

A termografia é uma técnica que permite a obtenção de imagens com gradação de cores definidas pelo utilizador e que permitem verificar as zonas de maior ou menor temperatura, conforme a escala. Um exemplo disso está na análise do cancro da tiroide através da termografia. Na presença de cancro da tiroide, observa-se uma região mais fria no pescoço e que provoca um distúrbio na simetria da imagem térmica (Figura 25)[46].

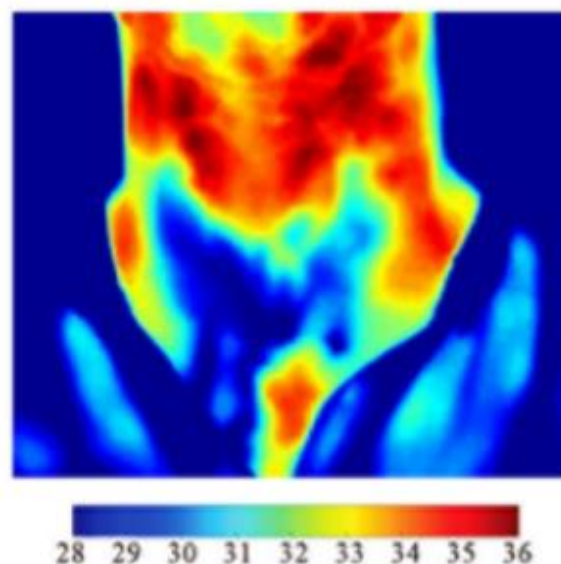


Figura 25 - Imagem termográfica obtida para a análise de cancro na tiroide [46].

A utilização de câmaras termográficas é uma prática cada vez mais corrente na indústria, mas que padece de um vasto conhecimento e experiência do operador. Existem inúmeros exemplos práticos em que esta metodologia permitiu otimizar e compreender fenómenos térmicos associados a determinados processos, conforme indicados na Tabela 5.

Tabela 5 - Trabalhos realizados na área da termografia.

Autor	Descrição
[47]	Para o fabrico de filamentos fundidos foi instalado um sistema de termografia. Com as análises experimentais efetuadas, foi possível efetuar uma correlação entre os perfis de temperatura e os comprimentos de ligação, verificando que esses dados poderiam ser utilizados no controlo do processo de produção.
[48]	Na extrusão de alumínio utilizou-se imagens termográficas e imagens de luz visível para a inspeção da superfície do material extrudido à saída da matriz. A utilização de câmaras termográficas e de luz visível permitiu controlar os efeitos termodinâmicos na superfície do alumínio e também registar os defeitos através da combinação das imagens.
[49]	Na extrusão de filamentos na manufatura aditiva foi verificado que a velocidade rápida de arrefecimento do extrudido era independente da velocidade de alimentação do filamento. Esta conclusão foi suportada por imagens termográficas.
[50]	Em alternativa à utilização de raios-x para o estudo da cristalização de compósitos de borracha natural, recorreu-se à termografia, provando que este método garante resultados precisos e é adequado para borrachas naturais com diferentes níveis de reticulação e com diferentes tipos de cargas.
[51]	A distribuição de temperatura na manufatura aditiva de polímeros é determinante para garantir a união do filamento com os filamentos vizinhos. Através da termografia infravermelha, conseguiu-se otimizar os parâmetros de extrusão, assegurando uma forte ligação entre filamentos.
[52]	No processo de manufatura aditiva, através da termografia determinou-se as temperaturas importantes para a soldadura do polímero, assim como a velocidade de arrefecimento e determinação do tempo em que o polímero permaneceu acima da temperatura de transição vítrea.
[53, 54]	Para a otimização de um sistema de pultrusão, utilizou-se a termografia para analisar o perfil de temperatura na matriz, em paralelo com simulações computacionais, reduzindo o consumo de energia em 57%, através da implementação de um novo sistema de aquecimento.
[55]	Na extrusão hidrostática, o controlo de temperatura define a estrutura e as propriedades mecânicas do material. Devido às elevadas pressões de extrusão, a termografia foi o método utilizado para avaliar os perfis de temperatura, por se tratar de um método sem contacto direto com a peça.

2.5 Controlo de processos

2.5.1 Microcontroladores

Atualmente, em termos comerciais, existem dois dispositivos dominantes: o Raspberry Pi® e o Arduino®. Embora ambos sejam muito idênticos no seu aspeto, existem diferenças significativas entre ambos. Estes componentes permitem elaborar esquemas de automação com custos relativamente baixos e com bastante flexibilidade em termos de opções e parâmetros a monitorizar.

Na Tabela 6 encontram-se algumas diferenças entre o Raspberry Pi® e um Arduino® Uno.

Tabela 6 - Comparação entre Raspberry Pi® e Arduino® Uno [56].

	Raspberry Pi®	Arduino® Uno
Vantagens	• Processamento mais rápido; • Permite alojamento de um sistema operativo; • Capacidade de ligar a redes de internet; • Pode executar vários códigos ao mesmo tempo.	• Fácil conexão a sensores analógicos; • Elevada variedade de componentes; • Baixo custo; • Rapidez na iniciação do código.
Desvantagens	• Requer um maior número de componentes adicionais; • Mais dispendioso.	• Só pode executar um código; • Sem possibilidade de conectar à <i>internet</i> (exceto com a adição de um componente adicional); • Linguagem de programação mais difícil de aprender.

O Raspberry Pi® é um pequeno computador que inclui um sistema operativo, e por isso, permite uma vasta gama de funcionalidades, principalmente na área da robótica. Contudo, a ligação a sensores e dispositivos externos é mais complexa do que com o Arduino®. O Arduino® é um dispositivo que não possui um sistema operativo e que utiliza um microprocessador para processar e controlar toda a informação. Um microcontrolador é desenhado especificamente para interagir com sensores, motores, luzes e outros tipos de dispositivos. Em suma, um Raspberry Pi® possui uma elevada capacidade de computação e um Arduino® permite obter informação de sensores. Em alguns casos, ambos os sistemas são utilizados em conjunto, na medida em que o Arduino® é responsável por obter os dados obtidos pelos sensores e o Raspberry Pi® é responsável por manipular esses dados [56].

Um estudo recente permitiu incluir tecnologia de baixo custo para monitorizar as condições de ventilação, temperatura e humidade no interior do Mosteiro dos Jerónimos. Com recurso a um Arduino®, sensores e leitores de cartão micro SD, foi possível registar dados a cada 10 minutos durante 15 meses. As condições analisadas apresentam um impacto significativo na conservação

e sustentabilidade de monumentos históricos. Com este método, foi possível caracterizar o clima interno de um dos monumentos mais emblemáticos de Portugal, mostrando que é possível utilizar sistemas de baixo custo para controlos de elevado interesse e importância [57].

2.5.2 Sensores de temperatura

Os sensores de temperatura RTD (*Resistance Temperature Detector*), também conhecidos por termístores [58], são resistências que medem a temperatura usando o princípio de aquecimento. A platina é o metal usado na construção de sensores RTD, por ser quimicamente inerte e por conseguir atingir uma vasta gama de temperaturas para medições precisas. Existem sensores RTD PT100 (Figura 26) e RTD PT1000, em que PT significa platina e “100” significa a resistência ($100 \, \Omega$) à temperatura de 0°C . Portanto, um sensor RTD PT1000 possui uma resistência de $1000 \, \Omega$ à temperatura de 0°C . A subida de 1°C representa um incremento de $0,384 \, \Omega$ em resistência. Para a programação de leituras de temperatura, é habitual a utilização de tabelas de conversão que permitem converter o valor de resistência lido pelo processador em valores de temperatura (ANEXO 4 – Tabela de conversão de valores para RTD PT100). Existem ainda sensores RTD PT100 com dois ou três fios. Conforme indicado, o valor de resistência que traduz o incremento de 1°C em temperatura é bastante reduzido, pelo que a precisão dos valores lidos pode ser influenciada pela própria resistência dos fios. A grande vantagem dos sensores com três fios, em relação aos de dois fios, está na possibilidade de eliminação da resistência dos fios, permitindo leituras mais precisas [59].



Figura 26 - Sensor de temperatura RTD PT100 [59].

2.5.3 Controladores

Um controlador PID (*Proportional Integral Derivative Controller*) é um mecanismo de controlo em *loop* e que funciona através do cálculo do valor do erro. Este erro é determinado através da diferença do valor da variável medido no processo e o *setpoint*. O *setpoint* é o valor a que se pretende que esteja a variável a ser controlada no processo. Através destes dados, o controlador PID faz a correção da função de controlo, H_{PID} , (27)[60].

$$H_{PID}(s) = K \left[1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s} \right] \quad (27)$$

Este controlador funciona com recurso a quatro parâmetros:

- K - Ganho proporcional;
- T_i - Ação integral;

- T_d - Ação derivativa;
- T_d / N - Filtro.

Num controlo de temperatura, um controlador PID consegue controlar a tensão enviada para o mecanismo de geração de temperatura conforme o valor da temperatura lido esteja perto, ou não, do *setpoint* definido [61].

Um método mais simples de controlo de variáveis é através do uso de controladores ON-OFF em que a variável a ser controlada pode assumir um valor mínimo e um valor máximo, não existindo uma gama de valores intermédios, i.e., um controlador que regule a potência de um motor pode ser configurado de forma a emitir a potência máxima ou a potência mínima [60, 61].

2.6 Revestimentos em moldes

2.6.1 Estudo dos mecanismos de desgaste

A relação entre dureza do revestimento e substrato, espessura do revestimento, rugosidade superficial e dureza das partículas de desgaste são quatro fatores que estão envolvidas durante um contacto onde existe movimento relativo entre as superfícies [62].

Os mecanismos de atrito e desgaste estão relacionados com as tensões nas superfícies, com a formação de fissuras e com a libertação de partículas provindas das superfícies. As forças de corte iniciam a formação de fissuras, que mais tarde provocam a libertação de partículas de desgaste de dimensão microscópica (geralmente). Nos contactos tribológicos, verifica-se a formação de microfilmes em revestimentos duros, os quais apresentam uma fraca resistência ao corte, pela formação de uma camada de óxidos que promove a lubricidade do contacto [63].

Na Figura 27 estão representados os mecanismos macromecânicos de atrito num contacto entre uma superfície não revestida e uma superfície revestida, onde existe movimento relativo entre ambas.

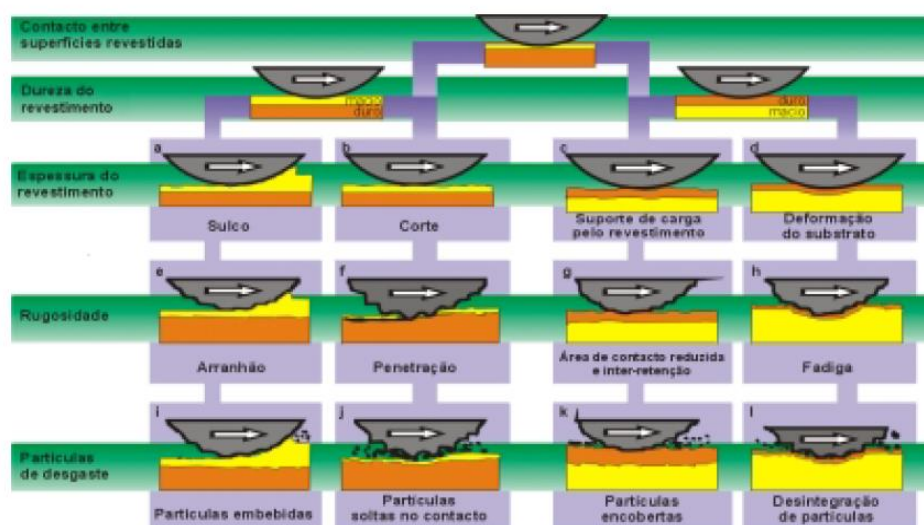


Figura 27 - Alterações macromecânicas provocadas por um movimento relativo entre superfícies e com relação entre quatro fatores [63].

2.6.2 Revestimentos para moldes

Na indústria de moldes, é recorrente observar problemas de desgaste nas suas superfícies, originando irregularidades geométricas nas peças obtidas, assim como, uma maior dificuldade no processo de extração da peça do interior do molde. Atualmente, os revestimentos finos, ou revestimentos técnicos, têm uma vasta gama de produtos e que permitem modificar as propriedades da superfície em locais onde seja necessário. De uma forma geral, o substrato é desenhado de forma a ter resistência mecânica e rigidez, enquanto que o revestimento é responsável pela resistência à corrosão, cargas térmicas e pelas características de fricção [64]. Os processos de aplicação de revestimentos estão divididos em quatro grupos principais grupos: gasosos, em solução, fundidos e sólidos [65].

Neste trabalho, apenas os revestimentos gasosos serão abordados, uma vez que o equipamento utilizado para a realização deste trabalho apenas permite a deposição em fase de vapor.

Como demonstrado na Figura 28, numa superfície revestida, existem quatro zonas com diferentes propriedades que devem ser consideradas, sendo elas [65]:

- Substrato – No substrato a porosidade, homogeneidade do material, coeficiente expansão térmica, dureza, condutividade térmica e elasticidade do material, são os fatores de maior relevância;
- Interface – Entre o revestimento e o substrato situa-se a interface, que deve apresentar uma boa adesão e resistência ao corte;
- Revestimento – As propriedades do substrato devem ser coerentes com as propriedades do revestimento, sendo essas as propriedades referidas anteriormente.
- Superfície – Nesta zona é importante considerar a reatividade química, rugosidade da superfície e a resistência ao corte.

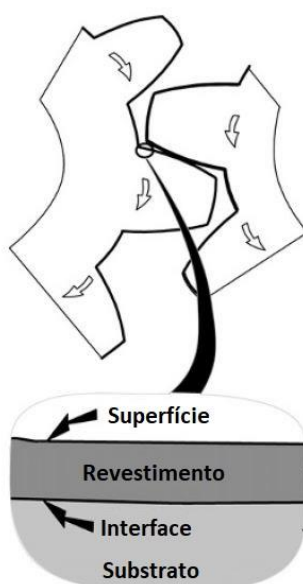


Figura 28 - Zonas de um sistema tribológico substrato/revestimento. Adaptado de [65].

Conforme referido anteriormente, apenas os revestimentos gasosos serão abordados. Estes revestimentos podem ser aplicados por CVD (*Chemical Vapor Deposition*), PVD (*Physical Vapour Deposition*) e IBAD (*Ion Beam Assisted Deposition*) [64]. De entre os vários processos descritos, apenas o PVD será analisado, dado que foi o processo escolhido para a realização de trabalho experimental durante este projeto.

2.6.2.1 Técnica de deposição PVD

O processo PVD envolve a evaporação de material a partir de uma fonte sólida e a posterior deposição desse material no substrato, formando o revestimento. Essa deposição ocorre dentro de uma câmara sob condições de vácuo. A aceleração das partículas em direção ao substrato pode assumir duas formas: projeção catódica e evaporação. Na projeção catódica, o material da fonte é ejetado devido ao bombardeamento da superfície por um gás iónico. Na evaporação, o metal a ser depositado funciona como cátodo devido à evaporação térmica de material e que é ionizado e acelerado em direção ao substrato.

Uma diferença significativa entre ambos os processos, reside no facto de a projeção catódica permitir ser executada a temperaturas a partir dos 50°C, sendo este um fator importante para a aplicação de revestimentos em substratos de origem polimérica. Esta é uma das vantagens em relação ao método de evaporação. [64].

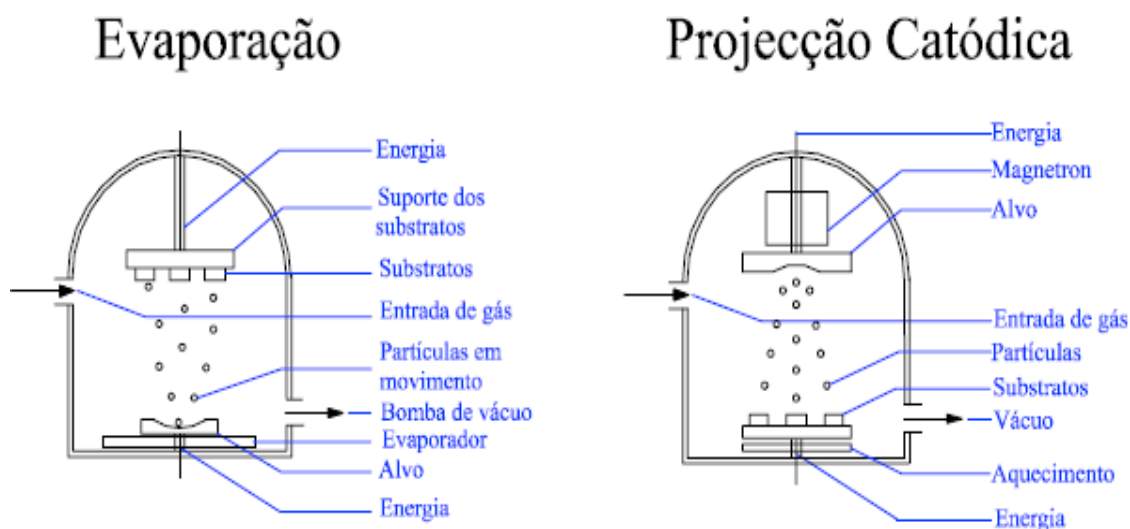


Figura 29 - Representação esquemática do processo PVD por evaporação e por projeção catódica [63].

A aplicação de revestimentos finos permite obter propriedades únicas em substratos em que, no seu estado natural, não são capazes de as oferecer. Dessas propriedades, destaca-se a resistência à abrasão que, em regra geral, aumenta com a aplicação de revestimentos finos. Esta afirmação é suportada por vários trabalhos realizados na área da tribologia, descritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Trabalhos realizados na análise de revestimentos gasosos em moldes.

Autor	Descrição
[66]	A aplicação de filmes de diamante, com tecnologia CVD e filmes intermédios de PVD, em substratos de aço, conduziram a uma maior resistência à abrasão em comparação com substratos do mesmo material isentos de revestimento.
[67]	Testes de desgaste foram realizados para determinar a resistência de um revestimento TiAlSiN depositado sobre aço, com recurso a partículas abrasivas de alumina e carboneto de silício. O revestimento apresentou um incremento da resistência à micro-abrasão significativo.
[68]	Com a aplicação de um revestimento de TiB ₂ num molde de injeção de polipropileno reforçado com fibra de vidro, verificou-se que o revestimento apresenta uma boa adesão ao substrato em aço AISI P20. A resistência à abrasão aumentou 42 vezes, quando comparado com um molde não revestido. Após 90000 ciclos, verificou-se um desgaste pouco significativo do revestimento.
[69]	A análise de revestimentos aplicados pela tecnologia PVD no revestimento de moldes de injeção, indica que um revestimento de TiAlSiN oferece 25 vezes mais resistência à abrasão e que um revestimento de CrN apresenta 58 vezes mais resistência à abrasão, quando comparados com um substrato do mesmo material, sem revestimento.
[70]	A redução da rugosidade da superfície de uma matriz de extrusão de materiais poliméricos permitiu reduzir o fenómeno de ‘pele de tubarão’, um defeito característico de escoamentos irregulares de polímeros. Este fenómeno é caracterizado por ondulações nas superfícies do extrudido e é considerado um defeito de produção.
[71] e [72]	A aplicação de um revestimento TiAlN pelo processo PVD sobre matrizes utilizadas para o processo de estampagem de folha de flandres na indústria alimentar, permitiu reduzir o desgaste das mesmas e, também, reduzir o coeficiente de atrito.
[73]	Na injeção de plásticos reforçados com fibra de vidro e com a aplicação de revestimentos por PVD nas matrizes de injeção manifestou um impacto positivo no processo de injeção. Em ensaios laboratoriais, o revestimento de CrN/TiAlCrSiN foi o que demonstrou um melhor desempenho geral e o revestimento de TiAlN demonstrou a melhor resistência à abrasão.

2.7 Ensaios *Scorch*

A análise de compostos de borracha através de ensaios *scorch* permite compreender as condições de pré vulcanização desses compostos [74]. Este parâmetro é de extrema relevância para compostos de borracha que sejam utilizados em processos de componentes que fazem parte do pneu em verde. O pneu em verde resulta do processo de construção do pneu, estando em condições de ser transportado para o processo de vulcanização. Portanto, na produção

desses componentes, pretende-se uma pré vulcanização residual, ou nula. A eliminação de pré vulcanização nos componentes do pneu garante uma maior qualidade e a correta adesão entre os mesmos.

O tempo de Scorch é medido através de um viscosímetro de Mooney (Figura 9) e que respeite o procedimento de teste descrito na norma ASTM D 1646-94. O tempo de Scorch (t_5) é definido como o tempo necessário para que o composto aumente cinco unidades (unidades Mooney) acima da viscosidade mínima atingida (Figura 10). Contudo, assim que, a partir da viscosidade mínima, qualquer incremento da viscosidade indica que se iniciou a reação de vulcanização, havendo o início da reticulação [75, 76].

Os ensaios *Scorch* ajudam também a compreender o impacto que as condições de armazenagem representam no comportamento dos compostos de borracha. Além disso, fornecem informações sobre a influência que determinados componentes têm na mistura do composto de borracha. É comum, na indústria, efetuarem-se alterações aos compostos de borracha devido aos custos e, por vezes, essas alterações geram impactos posteriormente na produção, podendo mesmo originar a rejeição de lotes de composto, atrasando e aumentando os custos de produção (Tabela 8).

Tabela 8 - Estudos científicos relacionados com as propriedades de vulcanização de compostos de borracha e ensaios Scorch.

Autor	Descrição
[77]	Neste trabalho, utilizaram-se três tipos de borracha para estudar o efeito que a temperatura provoca no tempo de vulcanização. Os ensaios foram realizados num viscosímetro com matriz e rotor bicónicos, e com amostras de massa igual a 27 ± 3 g, respeitando a norma ASTM D 1646-81. Com estes ensaios, determinou-se que, para as amostras analisadas, o tempo de <i>scorch</i> aumenta exponencialmente com o decréscimo da temperatura. Além disso, conclui-se que, a adição de negro de fumo diminui o tempo de <i>scorch</i> , sendo este fenómeno particularmente significativo a baixas temperaturas, i.e., a temperaturas inferiores a 100°C.
[78]	Neste trabalho, analisou-se o efeito que a relação entre enxofre e aceleradores têm no comportamento de dois compostos de borracha natural diferentes. Os ensaios de <i>scorch</i> foram feitos com um intervalo de temperatura entre 100°C e 180°C. Concluiu-se que, quanto maior for a temperatura, menos impacto têm os aceleradores no tempo de <i>scorch</i> . Portanto, a temperaturas de cura mais baixas (inferiores a 140°C), a concentração de acelerador tem um impacto mais significativo no tempo de <i>scorch</i> .
[79]	Com este trabalho, estudou-se o efeito que a humidade impõe nas propriedades de um composto à base de SBR (fabricado pela <i>Firestone</i>). Os ensaios de <i>scorch</i> foram realizados à temperatura de 160 °C. Concluiu-se que a adição de humidade ao composto favorece o processo de pré vulcanização e, portanto, os tempos de <i>scorch</i> diminuem com o aumento da concentração de humidade. A presença de humidade desencadeia uma reação de hidrólise no acelerador, provocando a aceleração das reações de reticulação.

Autor	Descrição
[80]	A presença de um elevado teor de humidade em borracha sintética provocou a redução do tempo de cura, aumentando assim a taxa de cura. O estudo realizado indica ainda que o tempo de armazenamento da borracha é um fator a ter em conta, pois influenciará a percentagem de humidade presente na mesma.
[81]	A utilização de sílica e negro de fumo como cargas afeta as propriedades de cura do composto. A crescente adição destes elementos à mistura gera um aumento da viscosidade e da reticulação. No composto com negro de fumo, observou-se uma redução do tempo de cura com o incremento do teor desse elemento. Por outro lado, o composto com sílica apresentou um tempo de cura crescente com o aumento do teor de sílica, devido à adsorção dos agentes de cura, i.e., dos aceleradores.
[82]	Com este trabalho, avaliou-se o impacto que o negro de fumo tem durante o tempo de cura de um composto de borracha. O incremento da quantidade de negro de fumo gera um aumento na viscosidade de <i>Mooney</i> e no binário máximo atingido no ensaio, porque este elemento é uma carga sólida e, portanto, quanto maior for a sua presença no composto, menor será a proporção de borracha presente no composto. No composto analisado, uma presença superior a 10 phr de negro de fumo provoca a diminuição do tempo de <i>scorch</i> .
[83]	O tempo de <i>Scorch</i> e o tempo de cura ótimo para compostos de borracha natural com negro de fumo, diminui com o incremento de negro de fumo. Devido à elevada área superficial do negro de fumo, gera-se uma elevada energia térmica durante o processo de cura. Devido ao excesso de calor, a reação de vulcanização inicia-se mais rapidamente.

CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA, DO PROCESSO, E ANTEVISÃO DE SOLUÇÕES

3.1 Caracterização da empresa

3.2 Caracterização do processo

3.3 Caracterização do problema

3.4 Tempestade de ideias e diagrama de Ishikawa

3.5 Análise crítica de possíveis soluções

3 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA, DO PROCESSO, E ANTEVISÃO DE SOLUÇÕES

3.1 Caracterização da empresa

A Continental AG foi fundada em Hannover, Alemanha, em outubro de 1871. A sua produção baseava-se em componentes de borracha flexível e pneus para carruagens e bicicletas. Por sua vez, em 1938, surge a Mabor que, devido a atrasos provocados pela segunda guerra mundial, apenas inicia a sua produção em 1946, dando origem à primeira fábrica de pneumáticos em Portugal.

A Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A., nasceu a dezembro de 1989, em Lousado. O seu nome provém da união de duas empresas de referência na manufatura da borracha, a Mabor, a nível nacional, e a Continental AG, a nível mundial.

Em 1990 iniciou-se a construção das instalações da atual Continental-Mabor sendo a mais moderna das, então, 21 unidades da Continental. Este programa permitiu aumentar a produção média diária de 5000 pneus, em 1990, para os 20000 pneus por dia, em 1994. Atualmente, a produção média diária é de 56000 pneus, sendo que cerca de 98 % dessa produção se destina à exportação.

Na produção da empresa é possível encontrar um vasto portefólio de produtos que variam quer em medidas, quer em tipos, quer em marcas. A Continental Mabor produz pneus para SUV's (*Sport Utility Vehicle*), veículos de alto desempenho, pneus *ContiSeal*, pneus *ContiSilent*, pneus para veículos ligeiros, pesados, e pneus para veículos agrícolas. Devido à grande diversidade destes veículos, a produção inclui pneus de jante 14" até 22".

O grupo Continental, para além de pneus, é especialista na produção e desenvolvimento de sistemas eletrónicos, mobilidade elétrica, tecnologias de segurança, sistemas de travagem e tecnologias de transmissão de potência.

Atualmente, a Continental AG é composta por 244582 colaboradores espalhados por 56 países e que operam ao longo de cinco divisões: Chassis e segurança, *Powertrain*, Interior, Pneus e *ContiTech*. A divisão de pneus representa cerca de 25% da receita total do grupo Continental AG.

A divisão de pneus opera em 12 países e com 13 fábricas, conforme ilustra a Figura 30.

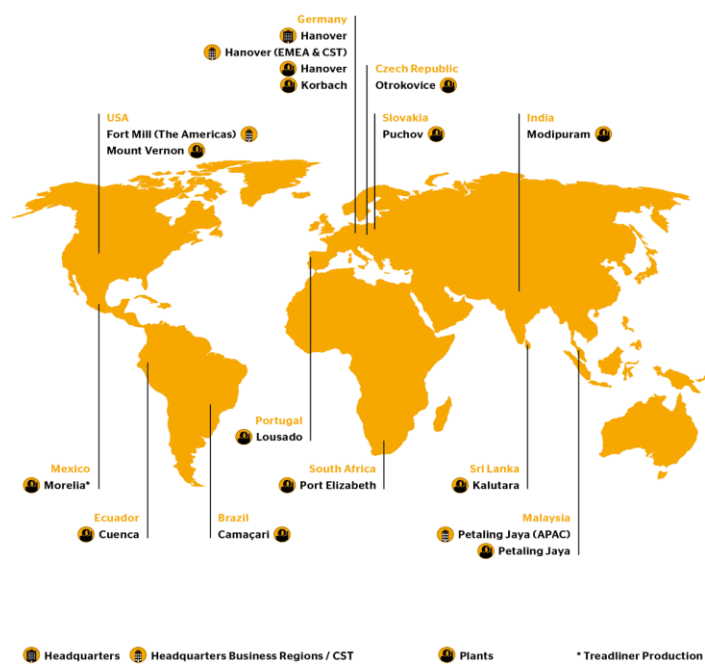


Figura 30 - Mapa das fábricas Continental relativas à divisão de pneus [7].

Em Portugal, o grupo Continental é formado por cinco empresas (Tabela 9).

Tabela 9 - Empresas pertencentes ao grupo Continental, em Portugal.

Grupo Continental em Portugal	
Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A.	Fabrico de pneus para veículos de passageiros e para o setor de agricultura e todo o terreno.
Continental Pneus Portugal S.A.	Comercialização dos pneus fabricados pela Continental Mabor.
Continental Teves Portugal – Sistemas de travagem, Lda.	Produção de componentes têxteis. Montagem de rodas para veículos produzidos pela Autoeuropa.
Continental Lemmerz Portugal – Componentes para Automóveis, Lda.	Produção de sistemas de travagem para o setor automóvel.
Indústria Têxtil do Ave S.A.	Produção de componentes têxteis.

Das 13 fábricas do grupo Continental AG na divisão de pneus, a fábrica portuguesa já venceu o prémio *Quality Award* - prémio que visa reconhecer a melhor fábrica, a nível da qualidade, do grupo Continental na divisão de pneus. Atualmente, a fábrica funciona com três turnos diários, constituídos por uma equipa de 2060 colaboradores.

Na Figura 31 é possível observar a vista aérea das instalações da Continental Mabor.



Figura 31 - Vista aérea da Continental Mabor [7].

3.2 Caracterização do processo

O *cap ply* pode ser fabricado de duas formas distintas:

- Calandragem de tecido têxtil e corte nas *mini-slitters*;
- Cintas produzidas nas *Cap strips*.

Nesta dissertação, o processo de fabrico de *cap ply* foi analisado nas *Cap strips*.

O processo de fabrico de *cap ply* através de uma *cap strip* inicia-se pelo *creel* (Figura 32). O *creel* é a estação onde as bobinas de corda têxtil são posicionadas e desenroladas. Esta estação possui mobilidade lateral para que seja possível mover o *creel* entre os dois conjuntos de bobinas. Com este mecanismo, é possível colocar um conjunto de bobinas em produção, enquanto que no outro lado do *creel*, se efetua o carregamento do mesmo com novas bobinas. O carregamento de bobinas pode durar cerca de uma hora, daí a vantagem em ser possível movimentar o *creel*. O *creel* possui um sistema mecânico de tambor/correia em cada bobina, que oferece um binário resistente ao sentido de rotação das bobinas, funcionando como um sistema de travagem e controlo da força de desenrolamento.



Figura 32 – *Creel* com bobinas posicionadas.

Após o *creel* estar carregado com bobinas posicionadas segundo uma determinada sequência, que depende do material a produzir, as cordas são desenroladas até à chapa guia perfurada (Figura 33). Esta chapa de alumínio possui 200 furos alinhados simetricamente entre si e com olhais cerâmicos, que visam reduzir a abrasão provocada tanto na chapa como nas cordas. Com este equipamento, é possível alinhar todas as cordas provenientes do *creel* de forma a que fiquem corretamente orientadas em direção ao cabeçote.



Figura 33 - Chapa perfurada com olhais cerâmicos.

Para a correta impregnação das cordas com composto de borracha, é necessário utilizar uma fieira (Figura 34) que permite posicionar as cordas de forma a produzir até 16 tiras de *cap ply* em simultâneo. A fieira possui duas ranhuras perpendiculares à direção de deslocamento das cordas têxteis. Quando o operador termina a operação de posicionamento das cordas na fieira, a mesma é colocada de novo no cabeçote da máquina. O encaixe da fieira no cabeçote permite a ligação entre as ranhuras da fieira e os canais de escoamento de composto de borracha do cabeçote. A zona final da fieira controla as dimensões geométricas finais das cintas de *cap ply*, conferindo-lhes o aspeto e dimensão final.

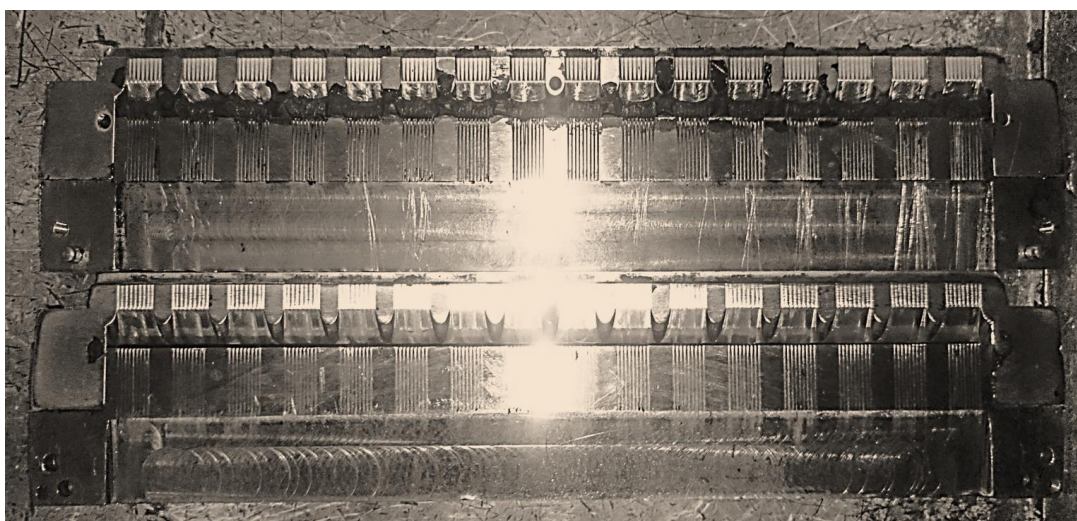


Figura 34 - Fieira para produção de 16 cintas de *cap ply* em simultâneo.

O cabeçote é o componente que recebe composto de borracha provindo da bomba de engrenagens e extrusora. No seu interior, o canal ligado à bomba de engrenagens é subdividido em dois canais que vão alimentar as ranhuras da fieira (Figura 35).



Figura 35 - Vista interior do cabeçote.

Este componente da *Cap strip* é constituído por dois elementos, i.e., o cabeçote possui uma parte fixa (observada na Figura 35) e uma parte móvel (Figura 36). A parte móvel é comandada por quatro cilindros hidráulicos que permitem controlar o movimento e fecho do cabeçote. Relativamente ao controlo de temperatura, apenas a parte móvel possui sondas de temperatura e um mecanismo de geração de calor, que será posteriormente analisado em maior detalhe. A parte fixa não possui canais de alojamento de mecanismos de geração de calor, contudo, o corpo da máquina que suporta o cabeçote possui uma serpentina localizada em volta da parte fixa, e que está conectada a uma unidade de controlo de temperatura, verificando a temperatura do fluido que por lá se desloca.

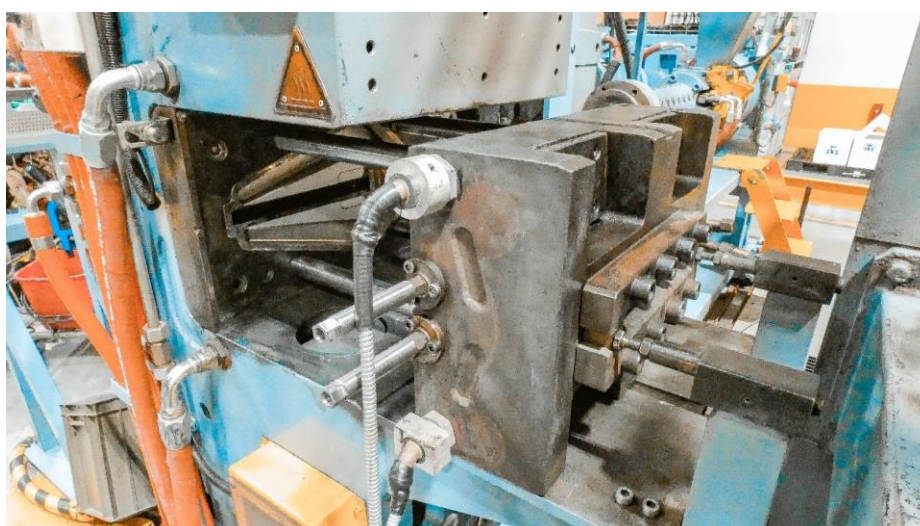


Figura 36 - Vista da parte móvel e parte fixa do cabeçote. A parte móvel possui duas resistências de aquecimento.

Quando o cabeçote se encontra fechado, i.e., com a parte móvel e parte fixa em contacto mútuo, existe uma superfície de contacto reduzida (Figura 37) que permite maximizar a força de fecho. Com este detalhe, a área de superfície em contacto é reduzida em 55,6% quando comparada

com a área da superfície de contacto entre ambas as partes, caso existisse contacto entre a totalidade das superfícies da face de contacto.



Figura 37 - Pormenor da superfície de vedação no interior do cabeçote.

Dado que este componente se encontra fechado quando a *Cap strip* está em funcionamento, torna-se de difícil compreensão a forma como todas as peças são montadas e quais as suas funções. Através da Figura 38 é possível obter uma melhor compreensão de como os componentes mencionados anteriormente, trabalham em conjunto. Antes do fecho do cabeçote, as cordas são posicionadas na fieira, sendo posteriormente montada a segunda parte da fieira, restringido assim o posicionamento das cordas. De seguida, a fieira é colocada na parte fixa do cabeçote, através de encaixe mecânico, e, finalmente, é executado o fecho do cabeçote através dos cilindros hidráulicos. O processo de manipulação da fieira no interior de cabeçote é realizado com recurso a suportes de PVC, evitando assim que as hastes dos cilindros se danifiquem.



Figura 38 - Demonstração da montagem das cordas na fieira durante a abertura do cabeçote.

Para a alimentação do cabeçote com composto de borracha, é utilizada uma extrusora (Figura 39) com pinos. Este equipamento permite aquecer o composto de borracha até uma determinada temperatura e, graças à sua ação mecânica (rotação do fuso), o composto é forçado a deslocar-se em direção ao cabeçote. A presença de pinos na parede da extrusora favorece a homogeneização do composto de borracha a ser extrudido.



Figura 39 - Extrusora Berstorff® GE-120.

A alimentação da extrusora é feita pela tremonha, sendo alimentada de composto de borracha. Na estação de alimentação de composto de borracha (Figura 40) existe um sistema de rolos motorizados que controlam o avanço do composto, mantendo a tremonha alimentada e sem que haja contacto da tira de composto de borracha com o solo, fonte de impurezas. Mais, em conjunto com o sistema de rolos existe ainda o detetor de metais, que deteta eventuais partículas metálicas presentes no composto de borracha. Este detetor é testado diariamente pelos operadores, de forma a garantir o bom funcionamento da *Cap strip*.



Figura 40 - Estação de alimentação da tremonha.

Dada a natureza dos compostos de borracha, a sua extrusão exige pressões elevadas. Essas pressões elevadas induzem um desgaste mais intenso na extrusora, assim como a obrigatoriedade de aquisição de uma extrusora com outras dimensões. Este problema é

contornado através da instalação de uma bomba de engrenagens (Figura 41) entre a extrusora e o cabeçote. Essa bomba é então responsável pelo incremento de pressão no interior do cabeçote, assim como no controlo de caudal mássico de composto de borracha que flui para o interior do cabeçote.



Figura 41 - Bomba de engrenagens.

Após a impregnação das cordas têxteis com composto de borracha, as mesmas passam por um conjunto de oito tambores de arrefecimento (Figura 42) de forma a diminuir a temperatura das cintas de *cap ply*. Este arrefecimento é necessário para que seja possível fazer o enrolamento das cintas em bobinas, sem que ocorra a adesão entre as cintas de *cap ply*. De uma forma geral, as cintas de *cap ply* entram no circuito de tambores a 100°C e saem a 22°C.



Figura 42 - Tambores de arrefecimento.

Na última estação de uma *Cap strip*, ocorre o enrolamento das cintas de *cap ply* (Figura 43) em bobinas. O enrolamento é controlado de forma a oferecer a mesma força de enrolamento das cintas, através do motor acoplado ao eixo que suporta a bobina.



Figura 43 - Estação de enrolamento de cintas de *cap ply*.

Em cada unidade de enrolamento de *cap ply* existe um sensor (Figura 44), que faz a leitura e escrita do código da receita referente ao componente a ser fabricado, para que, as bobinas não sejam instaladas, por engano, nas máquinas de construção. Além deste sistema, cada bobina é acompanhada por uma folha descritiva com todos os detalhes da produção, assim como três riscas coloridas que seguem uma codificação específica definida pela empresa.



Figura 44 - Unidade de enrolamento de *cap ply*.

Dependendo do tipo de *cap ply* a ser produzido, existe um valor definido para o comprimento total de enrolamento em cada bobina. Contudo, o peso de cada bobina ronda os 25 kg. Terminado o enrolamento, o operador executa a transferência das bobinas para um carro de transporte (Figura 45).



Figura 45 - Carro de transporte com bobinas de *cap ply* devidamente identificadas.

Cada carro de transporte é colocado numa estufa com temperatura controlada, de forma a controlar a adesividade e a proteger as bobinas de elementos contaminantes, e.g., poeiras e partículas metálicas. Quando é necessário *cap ply* na área de construção, um operador utiliza um rebocador elétrico para transportar o carro de transporte de *cap ply* até ao seu destino.

3.3 Caracterização do problema

O problema proposto consiste em analisar quais os parâmetros que originam vulcanização prematura e falha de impregnação nas cintas de *cap ply*. Durante a produção de *cap ply* existem inúmeros parâmetros do processo que influenciam a qualidade do produto em produção, tais como a velocidade da linha, pressão e temperatura na extrusora, pressão e temperatura na bomba de engrenagens, temperatura do cabeçote, tipo de composto de borracha, entre outros.

Conforme descrito anteriormente, a parte móvel do cabeçote possui duas resistências de aquecimento. Inicialmente, as *Cap strips* faziam as trocas de energia térmica através de circuitos internos com água, funcionando de forma idêntica a um permutador de fluxos não misturados. Mais tarde, a água presente no circuito originou corrosão na parte móvel do cabeçote, provocando a entrada de água para os canais de escoamento de composto de borracha, havendo assim mistura de ambos os fluxos. Numa tentativa de solucionar o problema de uma forma rápida e económica, os departamentos de engenharia responsáveis pela manutenção das *Cap strip*, optaram pela instalação de resistências de aquecimento. No entanto, nada mais foi alterado ao processo, mesmo que o método de troca de energia térmica tenha sido completamente remodelado.

A implementação deste sistema rapidamente originou vulcanização prematura de composto de borracha no interior do cabeçote (Figura 46).



Figura 46 - Composto de borracha vulcanizado nos canais de escoamento do cabeçote.

A presença deste fenómeno acrescenta uma maior dificuldade na limpeza dos canais de escoamento do cabeçote, visto que habitualmente, estes aglomerados de composto encontram-se bem aderidos às paredes dos canais. Esta dificuldade leva a que os operadores utilizem objetos metálicos para auxiliar na remoção destes aglomerados. Após várias operações de limpeza, é frequente visualizar riscos na superfície dos canais de escoamento, provocados precisamente pelos objetos metálicos, danificando assim o cabeçote. Além de provocar um desequilíbrio da rugosidade das paredes dos canais, o revestimento técnico existente na superfície do cabeçote também acaba danificado.

Durante a fase de produção, surgem, ocasionalmente, cintas defeituosas devido à presença de partículas macroscópicas de composto de borracha vulcanizado na fieira. Estas partículas podem surgir no composto de borracha durante o processo de mistura ou pela separação de pequenas partículas da superfície dos canais de escoamento do cabeçote. Devido à direção do escoamento de composto de borracha no interior do cabeçote, é fácil compreender que o composto tem de contactar primeiramente com os aglomerados de composto de borracha vulcanizada, antes de chegar à fieira e contactar com as cordas têxteis. A natureza deste escoamento a altas pressões origina, ocasionalmente, o transporte de partículas de composto de borracha vulcanizadas até à fieira. Dado que a fieira possui, na sua saída, dimensões reduzidas, verifica-se a obstrução ao escoamento de composto de borracha na zona de impregnação, resultando daí cintas de *cap ply* defeituosas (Figura 47).



Figura 47 - Presença de duas cintas de *cap ply* defeituosas devido à existência de aglomerados de composto de borracha na fieira.

Habitualmente, este problema é contornado através do aumento da pressão no interior do cabeçote, gerada pela bomba de engrenagens, forçando a extração das partículas de composto de borracha vulcanizadas, do interior da fieira. Não funcionando, é necessário abrir o cabeçote e efetuar a limpeza dos canais de escoamento e da fieira.

A produção de cintas de *cap ply* com defeito pode ainda ter como origem a falha de impregnação, i.e., quando o controlo de temperatura é ineficaz, pode provocar um aumento da viscosidade do composto de borracha, de tal forma que o escoamento de composto se torna demasiado lento para acompanhar a velocidade da linha das cordas têxteis (Figura 48).



Figura 48 - Produção de *cap ply* com quatro cintas defeituosas devido à falha de impregnação de borracha.

Este fenómeno acontece, geralmente, durante o arranque da produção, onde o cabeçote se encontra ainda com temperaturas ligeiramente abaixo das temperaturas ideais de funcionamento. Na Figura 48 é possível observar que as cintas defeituosas se situam do lado esquerdo, i.e., estão mais próximas da bomba de engrenagens. Já na Figura 47, as cintas defeituosas estão localizadas na extremidade oposta, i.e., são as cintas mais longínquas em relação à bomba de engrenagens. Estes detalhes são importantes para analisar dados futuros presentes neste relatório.

Dado que o *nylon*® é uma das matérias primas mais dispendiosas para a produção de pneus, é possível concluir que todos estes defeitos originam elevadas quantidades de *scrap* e, consequentemente, custos elevados. Mais, os tempos de paragem para solucionar os defeitos descritos podem ser elevados (entre 10 e 20 minutos, habitualmente), agravando ainda mais todos os custos gerados. A paragem de uma *Cap strip* é ainda acompanhada por um acréscimo do dispêndio energético, uma vez que ocorre o arrefecimento do cabeçote e é necessário elevar a sua temperatura para que o novo arranque da máquina ocorra sem qualquer problema.

Do ponto de vista da segurança no trabalho, o controlo de temperatura do cabeçote requer um especial cuidado, dado que durante a preparação da fieira (Figura 38) o operador necessita de colocar as mãos e braços na zona interna do cabeçote. As temperaturas elevadas aumentam o risco de acidentes, tais como eventuais queimaduras na pele dos operadores.

Tabela 10 - Descrição das causas consideradas como críticas para a ocorrência de composto de borracha vulcanizado e falha de borracha.

Causa	Descrição
Programação do autômato	No início do projeto, um dos requisitos iniciais foi a verificação da programação do autômato que comandava o controlo de temperatura do cabeçote, em função de todas as outras variáveis. Rapidamente foi perceptível que o controlo se encontrava em constante alteração e, por isso, tornou-se evidente que existia uma dificuldade em estabelecer um controlo correto e estável para que se reduzissem, ou eliminassem, os problemas relacionados com o controlo de temperatura. Como tal, se existir um controlo da máquina incorreto, os problemas descritos podem facilmente surgir.
Velocidade da linha	A velocidade da linha é um dos parâmetros definidos para a produção de <i>cap ply</i> . Este parâmetro controla a velocidade a que as cintas de <i>cap ply</i> saem da fieira. Dado que é na fieira que surge o contacto entre composto de borracha e cordas têxteis, existe a possibilidade de a velocidade linear das cordas não ser compatível com a velocidade de escoamento de composto de borracha, i.e., supondo que a velocidade de deslocamento das cordas é muito superior à velocidade de escoamento de composto de borracha na fieira, então podem ocorrer falhas de borracha nas cintas de <i>cap ply</i> .
Método de aquecimento	Os problemas apresentados tornaram-se mais persistentes após a substituição do método de aquecimento do cabeçote. Na parte móvel do cabeçote, houve a necessidade de substituir o método de aquecimento inicial, o qual se baseava na circulação de água pelo interior da parte móvel, por duas resistências de aquecimento. Esta substituição permitiu travar a existência de corrosão nos canais de circulação de água. Contudo, este método tem particularidades e diferenças de extrema importância em relação ao sistema inicial, pelo que é necessário adaptar o novo método, ao processo de fabrico da forma mais eficaz possível.

3.5 Análise crítica de possíveis soluções

Na fase inicial do projeto, efetuou-se uma abordagem a possíveis soluções, tais como:

- Substituição das duas resistências de aquecimento pelo circuito de água, retornando assim, ao sistema de origem das *Cap strip*;
- Utilização de fluidos não corrosivos na circulação dos canais do cabeçote, de forma a evitar a oxidação dos mesmos.

Em suma, foi discutida a possibilidade de voltar ao sistema original de controlo de temperatura das *Cap strip*, mas com a troca do fluido que circula nos canais do cabeçote. Uma das alternativas seria a utilização de uma mistura de água com etilenoglicol, o que iria diminuir o risco de oxidação e também permitir a subida de temperatura da mistura acima dos 100°C sem ocorrer vaporização. Outra alternativa passava pela utilização de uma solução à base de óleo. Contudo, essa hipótese exigiria a troca das TCU (Unidades de Controlo de Temperatura), uma vez que as atuais TCU's não possuem características para operar com tal fluido.

MÉTODOS

4.1 Ensaios laboratoriais

4.2 Análise numérica

4.3 Termografia

4.4 Análise da rugosidade

4.5 Ensaios de extrusão

4.6 Arduino®

4 MÉTODOS

Após o enquadramento teórico desta dissertação, importa agora iniciar a componente prática do trabalho desenvolvido, de forma a cumprir os objetivos definidos, a qual seguiu a sequência descrita na Figura 50.

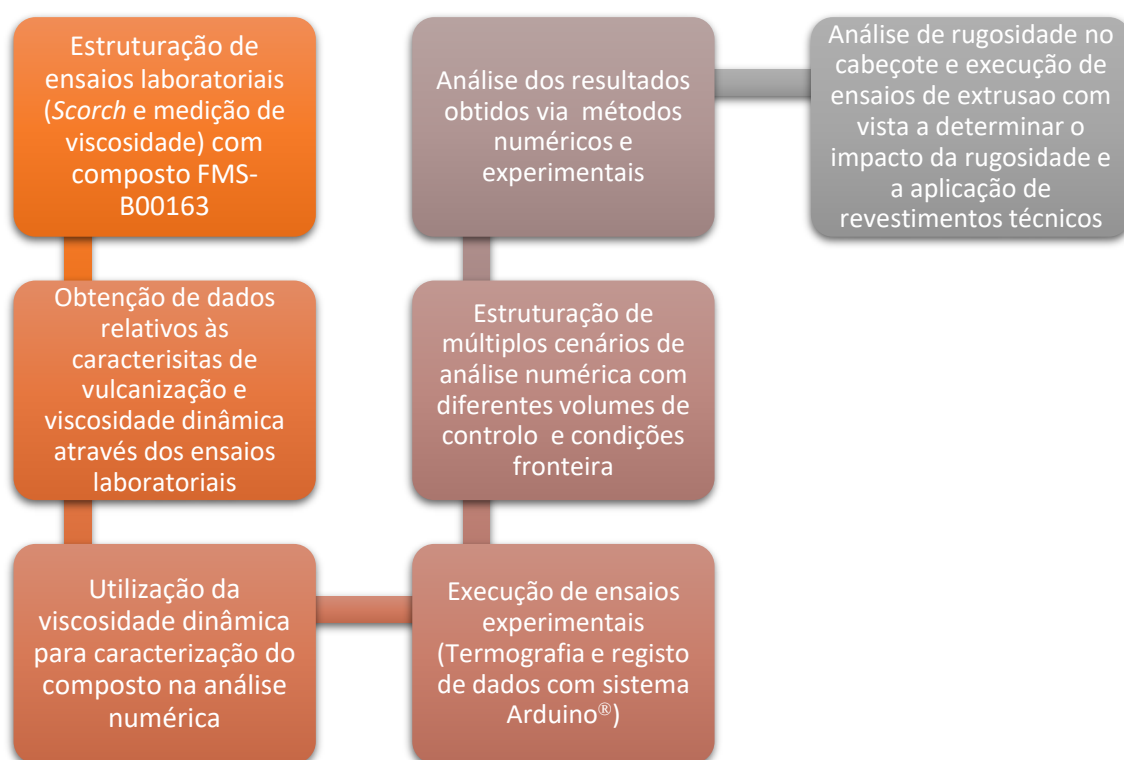


Figura 50 - Procedimento utilizado para a metodologia desenvolvida.

A sequência de ações utilizadas na metodologia foi desenvolvida com base na literatura utilizada. A literatura, apesar de não conter trabalhos muito semelhantes ao desenvolvido, permitiu obter noções sobre algumas práticas utilizadas na resolução de problemas na indústria de polímeros. Uma vez que os problemas de falha de impregnação e de composto de borracha vulcanizada estão logicamente associados ao composto de borracha, foi necessário executar ensaios laboratoriais que permitissem obter os dados necessários à sua caracterização. Desta forma, foi possível determinar a viscosidade dinâmica do composto de borracha e o seu comportamento relativamente à vulcanização, compreendendo assim, as condições propícias à ocorrência de vulcanização prematura.

Seguidamente, foram estruturadas as análises numéricas em combinação com resultados experimentais, que permitiram obter dados essenciais para o estabelecimento de condições

fronteira. Concluídas as análises numéricas, os resultados foram analisados e, comparados com ensaios experimentais. Com base nesses resultados, as possíveis soluções foram discutidas.

Em último lugar, foram efetuadas medições de rugosidade da superfície interna do cabeçote, em paralelo com ensaios de extrusão, para determinar o impacto de revestimentos técnicos e de diferentes rugosidades sobre o escoamento de composto de borracha.

4.1 Ensaios laboratoriais

Para dar seguimento a qualquer tipo de análise, é necessário efetuar uma caracterização dos materiais envolvidos. Os materiais poliméricos apresentam um comportamento diferente dos materiais mais vulgarmente utilizados na indústria, principalmente por serem altamente influenciados pelas variações de temperatura.

Os ensaios de *Scorch* são aqueles que medem o binário resistente do disco cilíndrico metálico (rotor) que está envolvido com composto de borracha dentro da cavidade do viscosímetro de Mooney. Quando o composto de borracha é colocado no viscosímetro de Mooney a uma temperatura à qual possa ocorrer vulcanização, verifica-se um incremento do binário lido pelo aparelho, podendo-se assim controlar e determinar as temperaturas e tempos a que a vulcanização se inicia. Estes testes seguem as normas ISO 289-1 (2014)[84] e ASTM D 1646-04 (2019) [85], as quais foram utilizadas para estabelecer um método de teste.

Em paralelo com a determinação das características de vulcanização, foi também necessário determinar a viscosidade do composto de borracha em função da taxa de corte. Estes dados são fundamentais para caracterizar o comportamento do composto no *software* de análise numérica através da equação polimérica de segunda ordem (*Second order polymer equation*). O analisador de processamento de borracha foi o equipamento utilizado para a análise de viscosidade do composto recorrendo à norma ISO 13145 [86].

Para os ensaios de *Scorch* e de medição de viscosidade, foi retirada uma amostra de FMS – B00163 (composto utilizado na produção de *cap ply*. FMS indica *Final Master Strainer*, i.e., é um composto preparado para ser utilizado na produção), processado pela *Strainer 02* (máquina com filtros metálicos que visa remover objetos estranhos do composto), carga 021-024, produzido a 30/03/2019 às 15:11h e com o código SAP: 3058277. Essa amostra foi ainda cortada em duas partes de igual dimensão. Cada uma dessas partes foi utilizada para o corte de múltiplas amostras para os ensaios referidos. A amostra principal foi dividida em duas, para que uma parte fosse utilizada diretamente para o corte de amostras e a outra parte fosse processada pelo moinho presente no laboratório. O processamento pelo moinho permitiu obter uma homogeneização das amostras e também submeter as amostras a tensões de corte e temperatura mais elevada, simulando assim a passagem pela extrusora e bomba de engrenagens. Dado que na análise numérica a extrusora e bomba de engrenagens foram suprimidas, estas amostras transmitem dados mais próximos daqueles que seriam de esperar no composto de borracha no interior do cabeçote.

Respeitando o disposto na norma ASTM D 1646-04, a amostra que foi processada pelo moinho permaneceu em repouso num ambiente a temperatura controlada ($23 \pm 3^{\circ}\text{C}$) durante cerca de 15 horas, não excedendo as 24 horas máximas impostas.

O procedimento para a obtenção das amostras principais para ambos os ensaios encontra-se descrito na Tabela 11.

Tabela 11 - Procedimento para a obtenção das amostras principais para os ensaios de *Scorch* e ensaios de medição de viscosidade.

Etapa	Descrição	Representação
1	Corte da amostra de FMS – B00163 em duas partes idênticas.	
2	Preparação do moinho para processamento de uma das partes da amostra.	
3	Processamento da amostra no moinho	
4	Colocação da amostra em repouso durante um mínimo de 30 minutos e um máximo de 24 horas, a uma temperatura ambiente controlada ($23 \pm 3^{\circ}\text{C}$).	

Do processamento descrito na Tabela 11 resultam duas amostras de grande dimensão e que foram posteriormente cortadas em várias amostras de menor dimensão para os ensaios de *Scorch* e de medição de viscosidade.

4.1.1 Ensaios de Scorch

Dado que durante o processo de fabrico de *cap ply* as temperaturas do composto se situam, habitualmente, nos 100°C, as temperaturas definidas para os ensaios de Scorch foram de 80°C, 90°C, 100°C, 110°C e 120°C. Esta escolha de temperaturas foi inicialmente idealizada com o auxílio da responsável do laboratório e técnicos da produção, na medida em que as mesmas deveriam permitir perceber o comportamento do composto de borracha a temperaturas elevadas e a temperaturas baixas, quando comparadas com a temperatura média de produção. Caso os resultados não fossem suficientes, optar-se-ia por realizar mais ensaios a diferentes temperaturas.

4.1.1.1 Preparação de amostras

Para o ensaio em causa, cada amostra é constituída por duas partes, sendo uma delas um disco cilíndrico de composto de borracha (Figura 51 – a)), e a outra, um disco cilíndrico de composto de borracha com um furo passante no centro. O furo passante permite a colocação dessa parte da amostra no rotor (Figura 51 – b)). Foi ainda definido que, para cada temperatura de ensaio, iriam ser processadas três unidades de cada uma das amostras principais.



Figura 51 - Amostras para os ensaios de Scorch. a) Amostras não processada pelo moinho. b) Amostras processadas pelo moinho.

O corte das amostras da Figura 51 foi realizado com recurso a uma prensa mecânica manual com uma matriz de diâmetro interior de 40 mm (Figura 52).



Figura 52 - Prensa mecânica manual para corte de amostras.

A nomenclatura utilizada para identificação das amostras seguiu o seguinte formato: S1M, onde S representa o nome do ensaio a ser realizado (*Scorch*), o número representa a numeração da amostra, variando entre 1 e 15 e a última posição indica o tipo de processamento da amostra, i.e., amostras com M indicam que foram processadas pelo moinho e amostras sem M indicam que não foram processadas pelo moinho.

4.1.1.2 Execução do ensaio

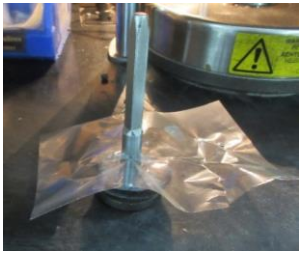
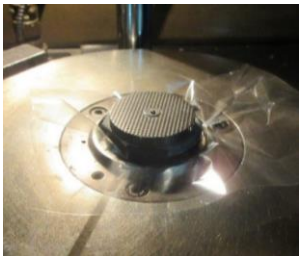
Após a preparação das amostras, procedeu-se à programação dos ensaios na plataforma digital da empresa. Nessa plataforma definiu-se a seguinte sequência de ensaios (Tabela 12):

Tabela 12 - Sequência de ensaios de Scorch.

Ordem	Amostra	Composto	Ensaio	Duração
1	S1	FMS – B00163	Scorch a 80°C	30 minutos
2	S1M	FMS – B00163	Scorch a 80°C	30 minutos
3	S2	FMS – B00163	Scorch a 80°C	30 minutos
4	S2M	FMS – B00163	Scorch a 80°C	30 minutos
5	S3	FMS – B00163	Scorch a 80°C	30 minutos
6	S3M	FMS – B00163	Scorch a 80°C	30 minutos
7	S4	FMS – B00163	Scorch a 90°C	30 minutos
8	S4M	FMS – B00163	Scorch a 90°C	30 minutos
9	S5	FMS – B00163	Scorch a 90°C	30 minutos
10	S5M	FMS – B00163	Scorch a 90°C	30 minutos
11	S6	FMS – B00163	Scorch a 90°C	30 minutos
12	S6M	FMS – B00163	Scorch a 90°C	30 minutos
13	S7	FMS – B00163	Scorch a 100°C	30 minutos
14	S7M	FMS – B00163	Scorch a 100°C	30 minutos
15	S8	FMS – B00163	Scorch a 100°C	30 minutos
16	S8M	FMS – B00163	Scorch a 100°C	30 minutos
17	S9	FMS – B00163	Scorch a 100°C	30 minutos
18	S9M	FMS – B00163	Scorch a 100°C	30 minutos
19	S10	FMS – B00163	Scorch a 110°C	30 minutos
20	S10M	FMS – B00163	Scorch a 110°C	30 minutos
21	S11	FMS – B00163	Scorch a 110°C	30 minutos
22	S11M	FMS – B00163	Scorch a 110°C	30 minutos
23	S12	FMS – B00163	Scorch a 110°C	30 minutos
24	S12M	FMS – B00163	Scorch a 110°C	30 minutos
25	S13	FMS – B00163	Scorch a 120°C	30 minutos
26	S13M	FMS – B00163	Scorch a 120°C	30 minutos
27	S14	FMS – B00163	Scorch a 120°C	30 minutos
28	S14M	FMS – B00163	Scorch a 120°C	30 minutos
29	S15	FMS – B00163	Scorch a 120°C	30 minutos
30	S15M	FMS – B00163	Scorch a 120°C	30 minutos

A Tabela 13 indica o procedimento de preparação do equipamento para análise de cada amostra.

Tabela 13 - Procedimento para a colocação da amostra no viscosímetro.

Etapa	Descrição	Representação
1	Colocação da amostra com furo no eixo do rotor.	
2	Aplicação do filme de poliéster sobre a amostra e no eixo do rotor.	
3	Colocação do rotor na base inferior do viscosímetro.	
4	Colocação da amostra sem furo no topo do rotor e seguida da aplicação do filme de poliéster.	
5	A base superior desce ao encontro da base inferior e dá-se início ao ensaio de <i>Scorch</i> .	

O filme de poliéster tem como principal função evitar a adesão do composto às paredes das bases do viscosímetro, facilitando assim a remoção da amostra após o ensaio. Este material possui um ponto de fusão elevado quando comparado com as temperaturas de ensaio, significando que o mesmo não se degrada durante o ensaio.

A Figura 53 representa uma amostra extraída do viscosímetro após conclusão do ensaio. A extração do filme de poliéster e da amostra é feita com recurso a um punção de latão (à direita na Figura 53) que, devido à sua baixa dureza, evita danos no rotor.



Figura 53 - Amostra removida do viscosímetro após conclusão do ensaio.

4.1.2 Medição de viscosidade

A medição da viscosidade do composto em estudo visa essencialmente suportar a análise numérica realizada. Dado que se pretende estudar o funcionamento das máquinas *Cap strip*, nas quais o composto de borracha se situa em torno dos 100°C, os ensaios foram efetuados para as mesmas temperaturas dos ensaios de Scorch, i.e., a 80°C, 90°C, 100°C, 110°C e 120°C.

4.1.2.1 Preparação de amostras

Para o ensaio em causa, a preparação de amostras é mais simples quando comparada com as amostras utilizadas nos ensaios de *Scorch*. Cada amostra é constituída apenas por um disco cilíndrico. Nestes ensaios, a massa da amostra deverá ser de $6 \pm 0,050$ g.

4.1.2.2 Execução do ensaio

Os ensaios de medição de viscosidade são extremamente automatizados. O equipamento utilizado (Alpha Technologies® RPA 2000) (Figura 54) possui um prato robotizado no qual são distribuídas as amostras de acordo com a sequência de programação.



Figura 54 - Alpha Technologies® RPA 2000.

A cada ensaio, uma ventosa pneumática (Figura 55) transporta a amostra do prato de amostras para a cavidade de análise. Após a conclusão do ensaio, o filme de poliéster é tracionado e a amostra é, conseqüentemente, removida da cavidade, de forma a dar lugar a uma segunda amostra. Desta forma, a máquina torna-se mais independente e permite ser mais eficaz em termos de tempo despendido.

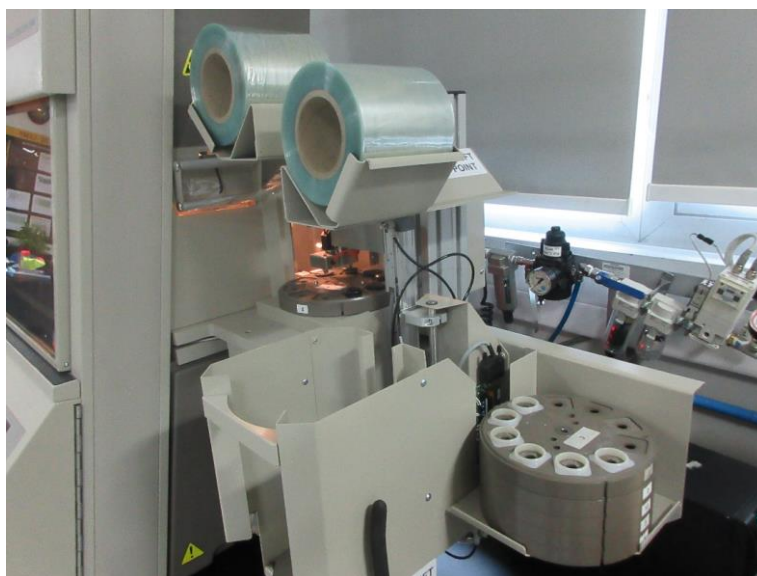


Figura 55 - Sistema robotizado de alimentação de amostras.

4.2 Análise numérica

A compreensão do comportamento do fluido e das trocas de energia no interior do cabeçote através de métodos experimentais é de extrema complexidade, ou até mesmo impossível. Para contornar esta dificuldade e aliar a engenharia à informática, recorreu-se a análises numéricas

para simular o funcionamento de uma *Cap strip* e observar os resultados, de forma a retirar conclusões.

As técnicas de análise numérica são bastante complexas e nem sempre permitem obter resultados suficientemente precisos, principalmente quando os domínios de controlo são de grandes dimensões e o fluido em análise é mais complexo. Atualmente, são mais comuns os estudos em que se analisam fluidos como a água ou o ar, e têm sido alvo de fortes investigações, melhorando assim a caracterização desses fluidos e a precisão dos resultados.

Neste projeto, o *software* de análise numérica utilizado foi o Autodesk® CFD 2019 (Versão 19.1). Aliada à complexidade das análises numéricas, está a necessidade de utilização de recursos de alto desempenho. Regra geral, este *software*, e tantos outros, requerem cerca de 2 GB por cada milhão de elementos. Caso essa regra não se cumpra, é possível que a análise não seja executada com sucesso. Para o projeto em causa, as especificações do *hardware* utilizado estão representadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Especificações do *hardware* utilizado nas análises numéricas.

Especificações	
Processador	Intel® i5-6300 HQ
Placa gráfica	Nvidia® GeForce GTX 950m
Memória RAM	8 GB DDR4
Disco Rígido	HDD 1000 GB 7200 RPM

Desta forma, a malha utilizada fica restringida a um máximo de, aproximadamente, 4 milhões de elementos.

A malha deve conter um número mínimo de elementos que assegure a convergência de resultados, contudo, quanto mais elementos existirem, maior será o custo em termos de recursos computacionais. Acresce que para obter uma malha funcional, não devem existir vazios ou interferência entre os componentes presentes no modelo. A concentração de elementos deverá ser superior nas zonas onde é expectável observar-se grandes gradientes das variáveis em análise, e.g., temperatura e velocidade, e nas zonas de interesse, em relação ao restante volume do modelo.

A caracterização do composto de borracha como fluido foi feita de forma a se aproximar o máximo possível do cenário real. Alguns dados necessários para a caracterização do fluido foram retirados através de análises laboratoriais e os restantes dados que não foram possíveis obter por via experimental, foram retirados da plataforma *MatWeb*.

4.2.1 Domínio de controlo

O primeiro passo para o desenvolvimento de uma análise numérica passa por definir o domínio de controlo que será estudado. No caso deste projeto, pretendeu-se estudar o desempenho do cabeçote durante o processo de fabrico. Por isso, e de forma a limitar o volume do domínio de controlo devido às restrições impostas pelo *hardware* utilizado, optou-se por desenhar um modelo tridimensional no SOLIDWORKS® constituído apenas pelo cabeçote e pela estrutura da máquina que suporta o mesmo. O *software* Autodesk® CFD 2019 não permite modelar domínios de controlo. Ainda foi adicionado o circuito interno por onde flui o fluxo de água, as resistências

de aquecimento e a fiação. A supressão da extrusora e da bomba de engrenagens foi substituída pela aplicação de condições fronteira na entrada de fluido no cabeçote. Estas condições fronteira foram fáceis de obter devido à monitorização, já existente, dos parâmetros de pressão e temperatura na bomba de engrenagens. Normalmente, as formas curvilíneas alocam uma maior concentração de elementos que constituem a malha. Por isso, e sempre que possível, deve-se evitar a modelação de chanfros que não influenciem a análise em questão. Habitualmente, essas simplificações requerem um elevado espírito crítico por parte do engenheiro, de forma a perceber o que é ou não é relevante para a análise numérica, i.e., quais as simplificações que podem ser feitas, de forma a reduzir o número de elementos gerados sem comprometer o resultado das análises.

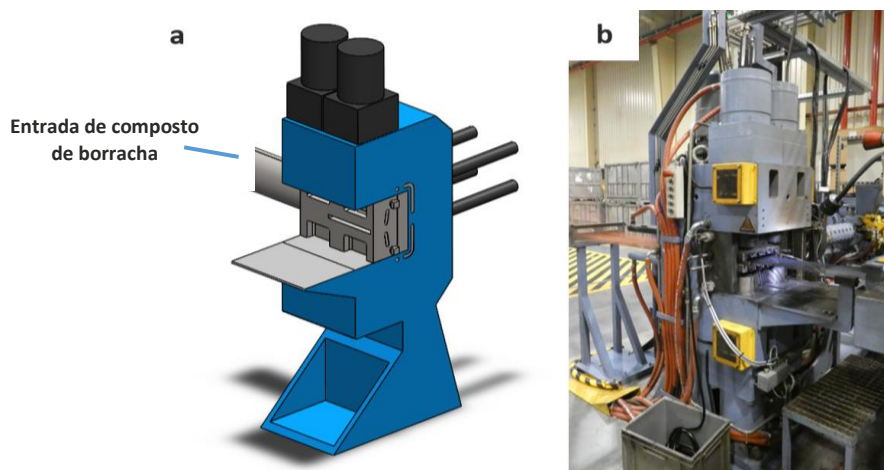


Figura 56 – a) Modelo tridimensional de um cabeçote pertencente a uma *Cap strip*. b) Cabeçote real de uma *Cap strip*.

Através da comparação entre a Figura 56 - a) e a Figura 56 - b), é possível verificar várias diferenças entre o modelo real e o modelo computacional, nomeadamente ao nível dos boleados ao longo das arestas externas. Ainda, na parte superior, existem dois orifícios retangulares que pertencem ao sistema hidráulico controlador do fecho do cabeçote e que foram omitidos no modelo computacional, por não serem uma região de interesse. Os cilindros hidráulicos (representados a preto na Figura 56 – a)), foram modelados pelo facto de serem corpos metálicos, e, portanto, bons condutores de energia térmica, podendo contribuir significativamente para a dissipação de energia térmica. O cabeçote foi modelado com maior precisão (menos simplificações), mantendo-se a maioria das arestas externas. A entrada do cabeçote foi aumentada no seu comprimento, em cinco vezes o tamanho do diâmetro interno da entrada do cabeçote, de forma a permitir a estabilização do fluxo de fluido (recomendado pelo manual do utilizador da Autodesk®). O ANEXO 10 – Desenho técnico do cabeçote de uma *Cap strip*, contém o desenho técnico de um cabeçote de uma *Cap strip*. O desenho técnico corresponde à *Cap strip* mais recente (*Cap strip* 4 – CS#04) adquirida pela empresa, mas possuindo dimensões muito semelhantes às restantes máquinas *Cap strip*, sendo os seus desempenhos muito idênticos. A principal diferença entre a CS#04 e as restantes máquinas (CS#01, CS#02 e CS#03) situa-se no *creel* e na zona de enrolamento, sendo estas mais automatizadas. Contudo, a zona de análise relacionada com este projeto está focalizada no cabeçote e, por isso, as dimensões descritas no desenho técnico serviram de base para o desenvolvimento do modelo tridimensional, em paralelo com medições experimentais.

Após a conclusão da elaboração do modelo tridimensional, o mesmo foi importado para o *software* comercial de análise numérica de dinâmica de fluidos computacional, o Autodesk® CFD 2019 (versão 19.1).

De seguida, são apresentadas as simulações finais efetuadas. Ao longo do projeto foram elaboradas inúmeras simulações, com alterações ao nível do número de iterações, do tipo de análise, do intervalo de tempo entre cada iteração, do tamanho da malha, dos modelos de turbulência, entre outros fatores. Várias simulações levaram a resultados incoerentes, i.e., velocidades de escoamento superiores a 1000 m/s ou temperaturas acima dos 10000°C, quando as condições fronteira aparentemente não remetiam para esses valores. Estes insucessos surgiram, maioritariamente, por uma definição incorreta de condições fronteira, atribuição errada de propriedades dos materiais, configuração do *Solver* erradas, modelos de turbulência inadequados e, por vezes, seleção errada de unidades.

Como tal, este projeto tornou-se bastante desafiante devido à necessidade requerida em termos de espírito crítico, de forma a compreender aquilo que é lógico e próximo do real, e daquilo que sai completamente fora do contexto em análise. Foi sempre tido em conta que a utilização de um *software* de análise numérica apenas funciona segundo os parâmetros introduzidos pelo utilizador, e a conclusão dos resultados que daí advêm depende exclusivamente do utilizador, sendo também importante aliar a análise numérica a atividades experimentais capazes de relacionar os dados teóricos com os dados reais.

4.2.1.1 Circuito de água

A modelação dos canais por onde circula o fluido (água) que funciona como transportador de energia térmica baseou-se no ANEXO 10 – Desenho técnico do cabeçote de uma *Cap strip* e na análise física do cabeçote (Figura 57). Por parte do Departamento de Engenharia 3, foi possível obter a informação de que os canais têm a forma de serpentina.

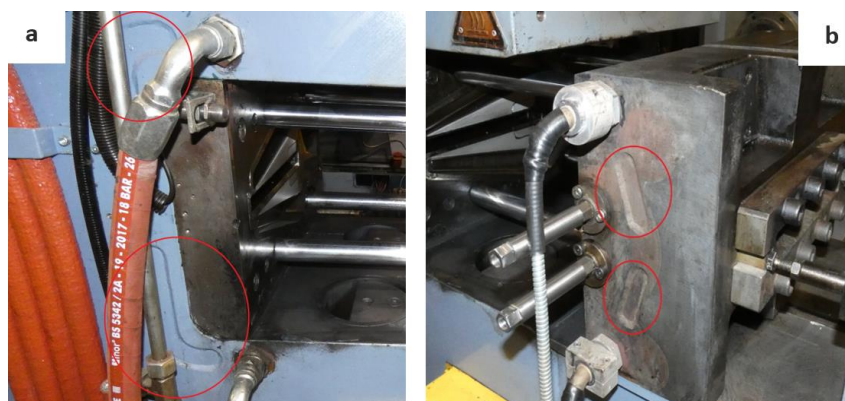


Figura 57 - Detalhes referentes à geometria dos canais do circuito de refrigeração da *Cap strip*. a) Local dos canais na estrutura de suporte do cabeçote. b) Local dos canais no cabeçote.

A observação da Figura 57, aliada ao conhecimento de processos de fabrico, permite ter uma perceção da geometria dos canais por onde circula o fluido de refrigeração. Utilizando um pouco o conceito de engenharia inversa, considera-se que os canais deverão ter sido fabricados através de um conjunto de vários furos passantes por ambos os corpos (cabeçote e estrutura de suporte do cabeçote), e que foram posteriormente maquinados de forma a estabelecer a ligação entre

si. Finalmente, deverão ter sido soldadas chapas de forma a tapar e vedar as cavidades que fazem a ligação entre os vários furos, formando então canais em serpentina.

Com estas suposições, foi realizada a modelação do canal de fluxo de água relativo à estrutura de suporte do cabeçote e ao cabeçote (Figura 58). No caso de instalação de resistências de aquecimento, as mesmas são roscadas na entrada e saída do canal de fluxo do cabeçote, ficando uma grande parte do volume do canal com ar.

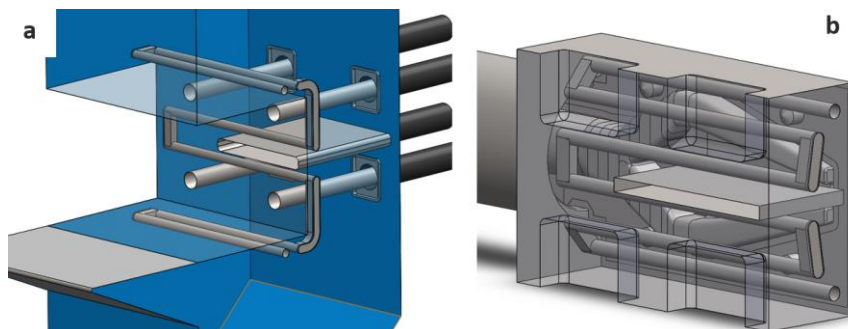


Figura 58 – Canais de fluxo de água na (a) estrutura de suporte do cabeçote e (b) no cabeçote.

4.2.2 Cenário 1 – Cabeçote com resistências de aquecimento

A primeira simulação elaborada retrata, em parte, o cenário de produção atual da empresa, i.e., o funcionamento da *Cap strip* controlada termicamente com o circuito de água na estrutura do cabeçote e com as resistências de aquecimento no cabeçote. Com esta simulação, pretendeu-se analisar o gradiente de temperatura em toda a geometria do cabeçote, e também a magnitude da velocidade relativa ao escoamento do composto de borracha. O *software* utilizado é bastante intuitivo, possuindo um ambiente de trabalho simples e que permite aplicar uma determinada lógica para a colocação de dados no projeto (Figura 59).

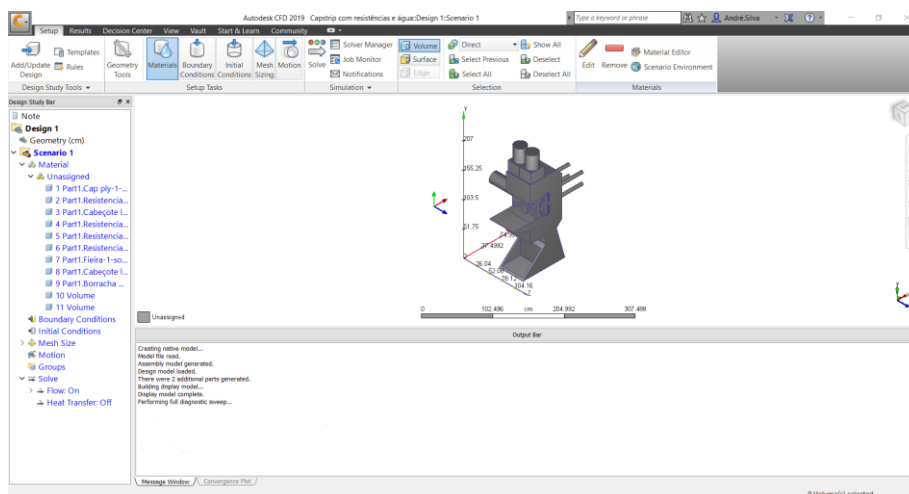


Figura 59 - Ambiente de trabalho após importação do modelo tridimensional.

Conforme se pode observar na Figura 59, no menu superior existem várias ferramentas para a criação do caso de estudo. Seguindo a sequência de comandos existente nesse menu, começou-se por definir os materiais envolvidos no domínio de controlo, seguido da atribuição das condições fronteira e condições iniciais. De seguida, foram definidos os parâmetros de malha.

Por último, foi necessário configurar o *Solver* para executar a análise. Nas próximas páginas, a configuração do caso de estudo será abordada em detalhe.

Entre as várias funcionalidades oferecidas pelo *software* de análise numérica, uma que se destaca é a ferramenta *Void Fill*, que permite preencher cavidades sem a necessidade de criar, anteriormente, um modelo tridimensional referente ao volume dessa cavidade. Visto que todos os elementos, sejam eles, ar, água, metais, não metais, entre outros, têm de ser representados por sólidos (volumes) no domínio de controlo, é evidente que esta ferramenta se torna muito útil, reduzindo o tempo de modelação necessário em vários casos.

Conforme já analisado, existem canais internos no cabeçote e na estrutura de suporte do cabeçote, e que possuem formas geométricas algo trabalhosas em termos de modelação. Com a ferramenta *Void Fill*, bastou selecionar a aresta da entrada e saída do canal e selecionar o comando *Fill Void* (Figura 60), para que o *software* preenchesse toda a cavidade referente ao canal com um volume. Note-se que, no modelo tridimensional, os canais modelados se encontravam somente como canais sem qualquer volume interno (Figura 58).

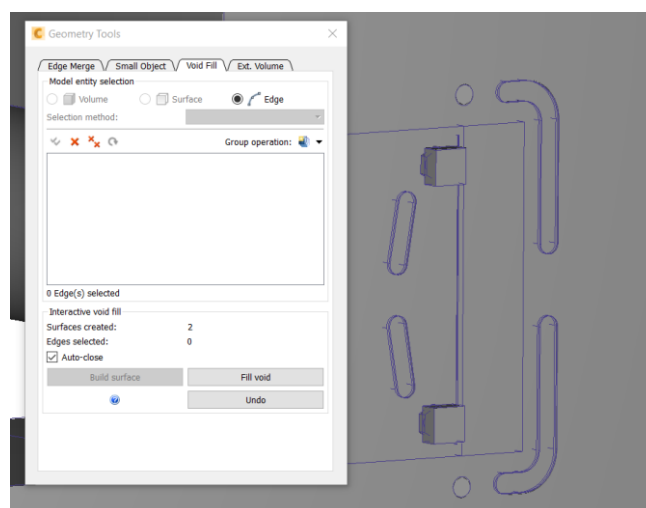


Figura 60 - Ferramenta *Void Fill* para a criação de um volume no canal interno da estrutura de suporte do cabeçote.

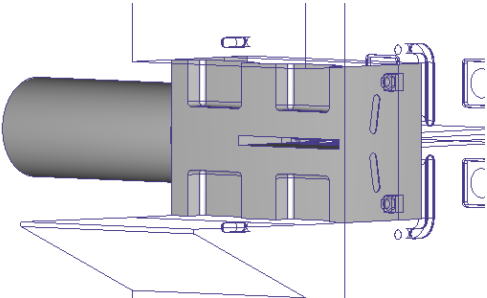
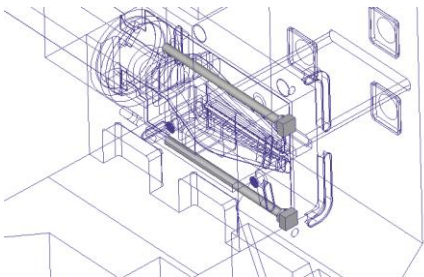
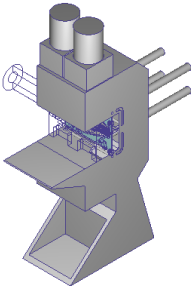
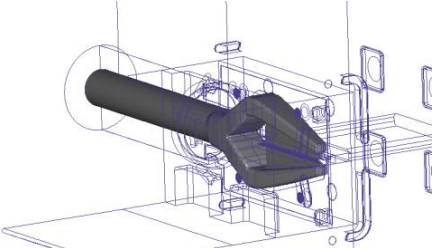
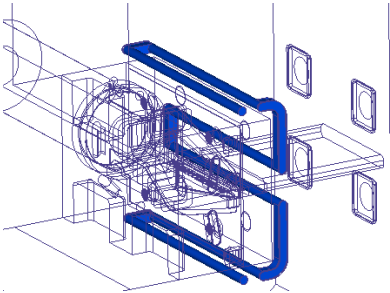
A mesma ferramenta foi utilizada para a modelação do volume no canal do cabeçote, onde na entrada e saída do canal se encontram as resistências de aquecimento, só que, desta vez, as arestas selecionadas são referentes às extremidades das resistências de aquecimento. Portanto, o canal fica preenchido com três volumes, sendo dois referentes às resistências de aquecimento e, o último, referente ao ar presente na restante cavidade.

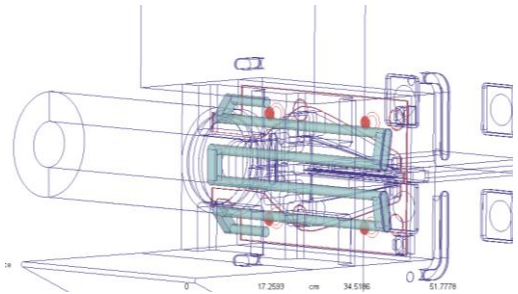
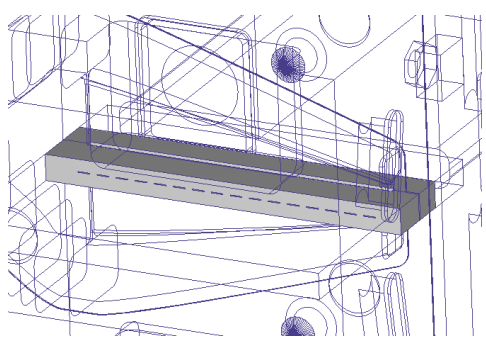
Após o domínio de controlo conter os vários volumes coincidentes entre si, é possível atribuir a cada um desses volumes, o seu material, i.e., atribuir a cada um dos volumes o material a que o mesmo corresponde na realidade.

4.2.2.1 Materiais

No cenário 1, o domínio de controlo modelado consiste na *Cap strip* com duas resistências de aquecimento. Os materiais atribuídos ao domínio de controlo global estão representados na Tabela 15.

Tabela 15 - Materiais atribuídos a cada volume do domínio de controlo para o cenário 1.

Componente	Material	Representação
Cabeçote	Aço ao carbono	
Resistências de aquecimento	Aço ao carbono	
Estrutura de suporte do cabeçote	Aço ao carbono	
Composto de borracha	FMS-B00163	
Volume interno do canal da estrutura de suporte do cabeçote	Água	

Componente	Material	Representação
Volume interno do canal do cabeçote	Ar	
Fieira	Aço ao carbono	

Na atribuição de materiais, é ainda possível definir as resistências de contacto entre superfícies, as quais dependem em grande parte da rugosidade superficial das superfícies de contacto. No cabeçote, o fecho dos dois blocos que o constituem é realizado através de quatro cilindros hidráulicos, originando uma pressão de fecho total de, aproximadamente, 200 bar. A área de contacto correspondente é de 53 642,27 mm² (área a azul na Figura 61).

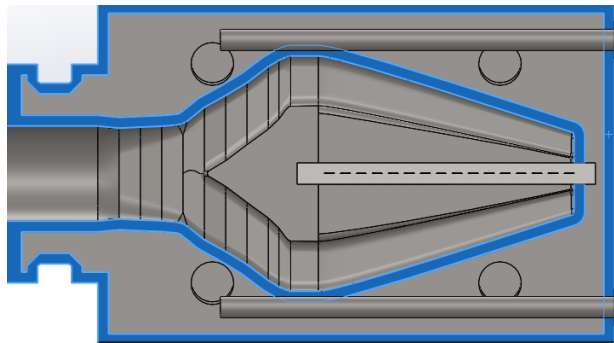


Figura 61 - Área de contacto entre os dois blocos que constituem o cabeçote.

Recorrendo à bibliografia, foi possível obter uma gama de valores de resistência de contacto para aços e com pressões de contacto de 10 000 kN/m², e obteve-se uma gama de 0,7 – 4,0 W/m²·K [31]. Dado que a pressão de contacto representa o dobro da pressão de contacto indicada na literatura, o valor utilizado na análise numérica foi de 0,7 W/m²·K, visto que, quanto maior a pressão de contacto, menor será a resistência de contacto.

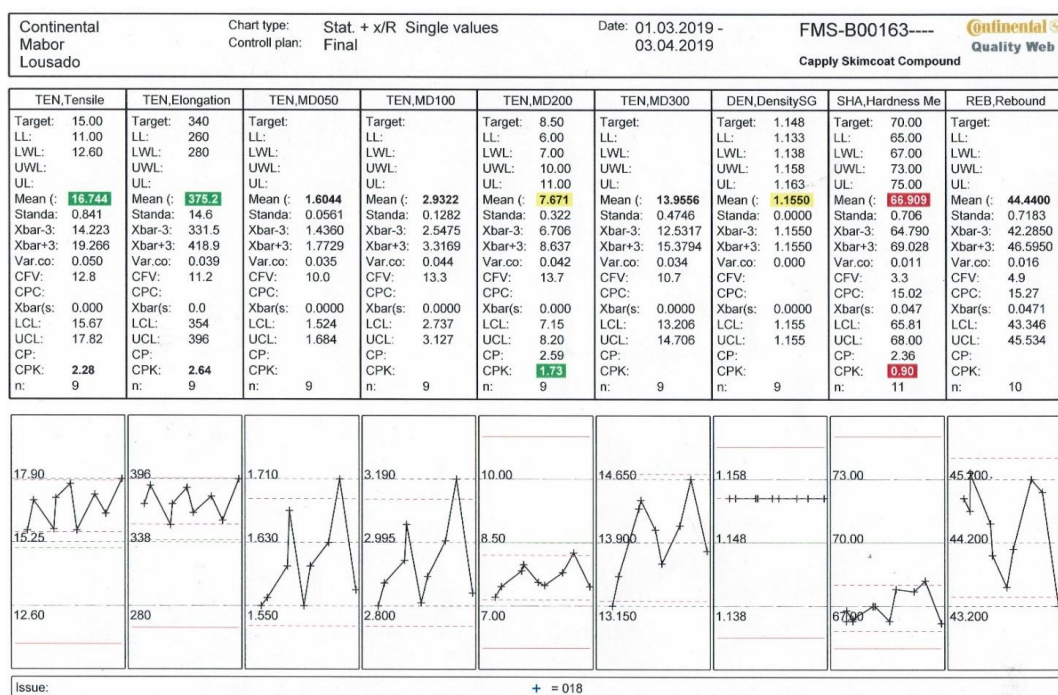


Figura 64 - Propriedades mecânicas do composto FMS-B00163.

Após a recolha de todas as propriedades, as mesmas foram importadas para o *software* de análise numérica (Figura 65).

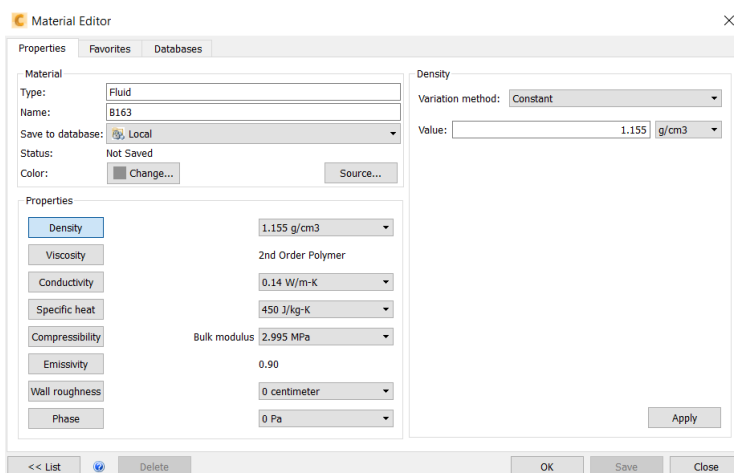


Figura 65 - Propriedades atribuídas ao fluido FMS-B00163.

O aço ao carbono foi selecionado como material principal para grande parte dos componentes sólidos. O aço ao carbono atribuído trata-se de um material já definido pela Autodesk®. Na impossibilidade de determinar em concreto quais os metais utilizados para o fabrico da *Cap strip* (dados exclusivos ao fabricante da *Cap strip*), optou-se por utilizar o material já incluído no *software* (Autodesk® CFD 2019) por conter as propriedades mecânicas, térmicas e elétricas bem definidas.

Habitualmente, as resistências de aquecimento são fabricadas com ligas níquel-cromo (Inconel®) bastante resistentes à oxidação e adequadas a serviços onde se registam

temperaturas e pressões elevadas. Como as resistências de aquecimento apenas funcionam como uma fonte de calor e como o tipo de liga utilizada era uma incógnita, optou-se por utilizar também o aço ao carbono na definição do material a usar (Figura 66).

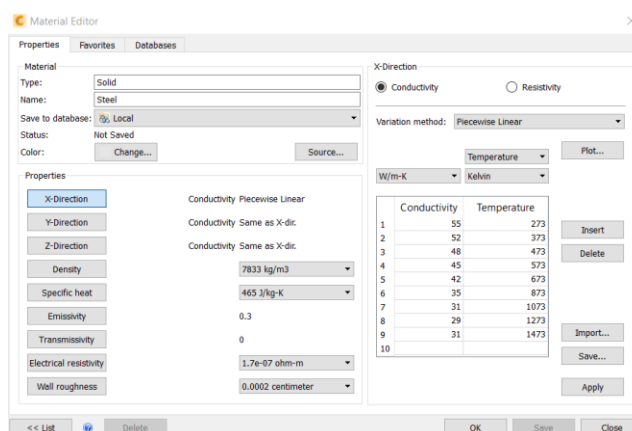


Figura 66 - Propriedades do material aço ao carbono.

Os restantes elementos (ar e água) foram também definidos segundo a base de dados fornecida pelo *software* (Figura 67 e Figura 68).

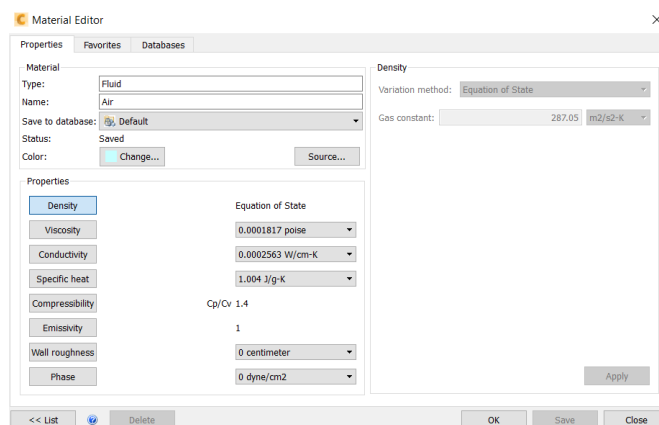


Figura 67 - Propriedades do material ar.

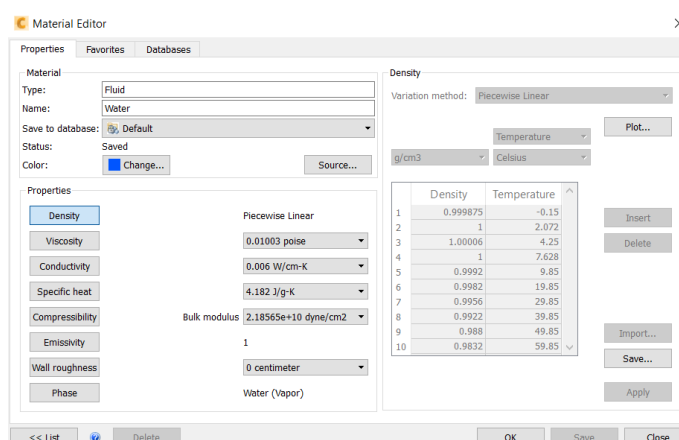


Figura 68 - Propriedades do material água.

Além da atribuição dos materiais, é necessário ainda definir o comportamento das propriedades desses materiais em função do ambiente para cada cenário, i.e., é necessário identificar se as propriedades variam ou se são constantes. Portanto, para aumentar a eficácia e precisão das análises, todos os materiais foram assumidos como variáveis (“Variable” – Figura 69). Isto é particularmente importante para o composto de borracha, cuja viscosidade é altamente dependente da temperatura e taxas de corte (Figura 69).

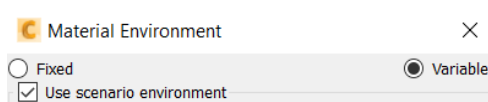


Figura 69 - Opção de designação das propriedades dos materiais entre constante e variável.

4.2.2.2 Condições fronteira

As condições fronteira atribuídas foram baseadas na análise dos ficheiros Log obtidos diretamente da máquina. Estes ficheiros contêm os dados das várias pressões, velocidades e temperaturas, que são registados com um intervalo de tempo de 30 segundos (Figura 70).

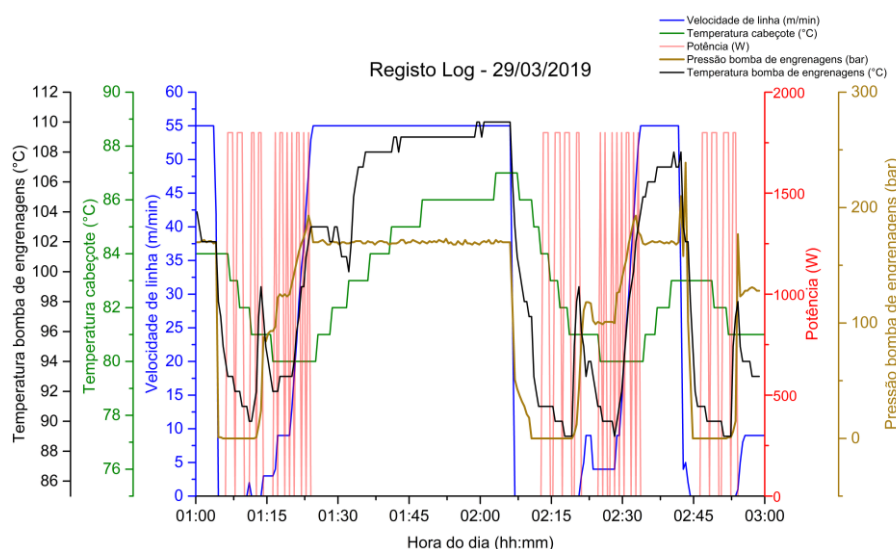


Figura 70 - Registro de parâmetros da *Cap strip 3* no dia 29/03/2019.

Conforme se pode observar na Figura 70, existem múltiplos picos de potência cujos valores oscilam entre 0 W e 1800 W (por cada resistência), assim como, à velocidade da linha de 55 m/min, a temperatura da bomba de engrenagens situa-se entre 108°C e 110°C. A pressão da bomba de engrenagens ronda os 170 bar.

É importante ainda referir que, habitualmente, as resistências de aquecimento acionam nos momentos em que o cabeçote se encontra aberto (ou seja, em situações de manutenção da fieira) e, portanto, não há qualquer tipo de escoamento de composto de borracha. Contudo, quando o cabeçote é fechado, para dar início à produção de *cap ply*, as resistências de aquecimento continuam a atingir picos de potência de 1800 W, até atingirem um determinado valor alvo de temperatura (*setpoint*). Nesta fase do projeto, o controlo de temperatura é completamente desconhecido e, portanto, não existia um conhecimento acerca da lógica por detrás do mesmo. Contudo, foram feitos vários esforços de forma a iniciar um estudo científico para o estabelecimento de um controlo de temperatura adequado.

Consultando os registos de *scrap* diário, foi detetado um registo referente ao dia 29/03/2019 com os seguintes detalhes (Tabela 16).

Tabela 16 - Registo de *scrap* referente ao dia 29/03/2019.

Data	Máquina	Quantidade	Custo	Imperfeição
29/03/2019	Cap strip 3	3 kg	8,06 €	Borracha vulcanizada

Apesar de ter sido impossível determinar, ao certo, a hora do dia em que ocorreu a paragem e geração de sucata (Tabela 16) devido a composto de borracha vulcanizada, possivelmente a mesma ocorreu no período das 2:40h (Figura 70).

Esta conclusão pode ser retirada através da observação da Figura 70, em que às 2:30 h se dá início à produção de *cap ply* (velocidade da linha > 0 m/min) e essa produção apenas dura, aproximadamente 10 minutos, ao fim dos quais se observa uma paragem abrupta da produção. Isto deve-se essencialmente à geração de calor excessiva por parte das resistências de aquecimento, mesmo à velocidade máxima da linha, o que origina composto de borracha vulcanizado.

Por vezes, as resistências de aquecimento permaneciam vários minutos a potências de 1800 W à velocidade máxima da linha, originando situações idênticas à descrita na Tabela 16.

O conhecimento dos valores de pressão e temperatura na bomba de engrenagens são bastante úteis, visto que a bomba de engrenagens foi suprimida do domínio de controlo. Assim, estes valores de pressão e temperatura foram atribuídos à entrada de fluido no cabeçote através de condições fronteira. A potência, apesar de apresentar algumas oscilações cujos intervalos de tempo não são conhecidos em detalhe (devido ao registo se efetuar apenas de 30 em 30 segundos), foi assumida com o valor constante de 1800 W.

As restantes condições fronteira que devem ser conhecidas são o caudal mássico de composto de borracha e o valor do coeficiente de convecção.

O caudal mássico pode facilmente ser conhecido através dos dados da receita. Dado que existiam quatro receitas distintas, significa que também existiam quatro caudais mássicos distintos.

Sabendo a área total da secção da cinta de *cap ply* (A_{cinta}), e subtraindo a área correspondente às cordas têxteis (A_{cordas}), obteve-se a área total de composto de borracha ($A_{composto}$), que é dada por,

$$A_{composto} = A_{cinta} - A_{cordas} \Leftrightarrow A_{composto} = \left[L \times e - n \times \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right] \times 10^{-6} \quad (28)$$

onde n representa o número de cordas têxteis e $A_{composto}$ a área de composto [m²]. As restantes variáveis, em mm, estão representadas na Figura 71, onde t representa a espessura, ℓ .

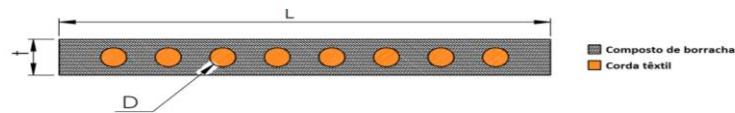


Figura 71 - Representação esquemática da secção transversal de uma cinta de *cap ply*.

Sabendo a área correspondente ao composto de borracha e a velocidade da linha, facilmente se obtém o caudal mássico de composto de borracha, que é calculado por,

$$\dot{q} = A_{\text{composto}} \times (v \times 60) \times N \times (\rho \times 10^3) \quad (29)$$

em que $\dot{q}$ representa o caudal mássico total [kg/h], v a velocidade da linha [m/min], ρ a densidade do composto [g/cm³] e N o número de cintas de *cap ply* em produção. A Tabela 17 representa os caudais mássicos para cada receita de *cap ply*.

Tabela 17 - Caudais mássico para as várias receitas de *cap ply*.

Receita	Variáveis	Valores	$\dot{q}$ [kg/h]
982540000200	L	10 mm	349,75 kg/h
	D	0,53 mm	
	ℓ	0,75 mm	
	V	55 m/min	
	ρ	1,155 g/cm ³	
	n	8 cordas	
	N	16 cintas	
982540000400	L	10 mm	376,04 kg/h
	D	0,70 mm	
	ℓ	1,1 mm	
	V	45 m/min	
	ρ	1,155 g/cm ³	
	n	9 cordas	
	N	16 cintas	
982540000800	L	10 mm	296,77 kg/h
	D	0,40 mm	
	ℓ	0,65 mm	
	V	55 m/min	
	ρ	1,155 g/cm ³	
	n	13 cordas	
	N	16 cintas	
982540001100	L	10 mm	360,15 kg/h
	D	0,88 mm	
	ℓ	1,3 mm	
	V	40 m/min	
	ρ	1,155 g/cm ³	
	n	8 cordas	
	N	16 cintas	

Dado que a maior parte do volume de produção de *cap ply* se trata da receita 982540000200, decidiu-se utilizar o valor de caudal mássico correspondente a essa receita para a análise numérica. De notar que, independente da receita, os problemas analisados neste projeto ocorriam em todas as restantes receitas com uma frequência muito similar.

A última condição fronteira que requer cálculo analítico, trata-se do coeficiente de convecção. Habitualmente, na mecânica de fluidos computacional, é modelado um volume em torno do domínio de controlo, e ao qual é atribuído, como material, o ar. Este método requer que esse volume seja parte integrante da malha, tornando a malha maior, de forma a efetuar os cálculos numéricos e simular a convecção. No *software* utilizado neste projeto, esse método pode ser substituído pelo cálculo prévio do coeficiente de convecção e medição da temperatura de referência (temperatura do ar onde está inserido o domínio de controlo), e posterior atribuição desses dados através da condição fronteira *Film coefficient* nas superfícies sujeitas a convecção. Este método permite reduzir a dimensão da malha global, reduzindo assim o tempo de computação e um dispêndio superior de memória RAM (*Random Access Memory*).

No ambiente fabril onde estão situadas as *Cap strip*, não existe convecção forçada, devido ao seu ambiente isolado e de pouca movimentação, estando o ar praticamente estático. O coeficiente de convecção natural habitualmente situa-se entre os 2 W/m²·K e os 25 W/m²·K [31]. O coeficiente de convecção estimado foi calculado da seguinte forma:

- **Dados**

$$T_p = 95^\circ\text{C} \quad T_\infty = 25^\circ\text{C} \quad L_{\text{ref}} = 350 \text{ mm}$$

- **Temperatura de referência**

$$T_{\text{ref}} = \frac{T_p + T_\infty}{2} = \frac{95 + 25}{2} = 120^\circ\text{C} = 393\text{K} \quad (30)$$

De onde se retira [31],

$$\text{Pr} = 0,690$$

$$k = 33,7 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\nu = 26,41 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

- **Número de Grashof**

$$\text{Gr} = \frac{g \times \beta \times \Delta T \times L_{\text{ref}}^3}{\nu^2} \quad (31)$$

$$\text{Gr} = \frac{9,81 \times \frac{1}{393} \times (368 - 298) \times 0,35^3}{(26,41 \times 10^{-6})^2} = 1,0741 \times 10^8$$

- **Número de Rayleigh**

$$\text{Ra} = \text{Gr} \times \text{Pr} \quad (32)$$

$$Ra = 1,07431 \times 10^8 \times 0,690 = 7,411 \times 10^7$$

- **Correlação de McAdams**

$$\overline{Nu}_L = 0,59 \times Ra^{\frac{1}{4}} \quad ; 10^4 < Ra < 10^9 \quad (33)$$

$$\overline{Nu}_L = 0,59 \times (7,411 \times 10^7)^{\frac{1}{4}} = 54,74$$

- **Coeficiente de convecção médio**

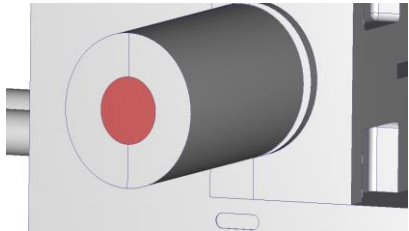
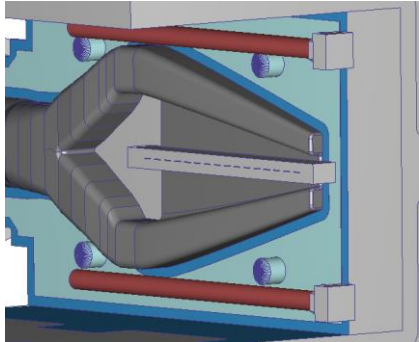
$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h} \times L_{ref}}{k} \quad (34)$$

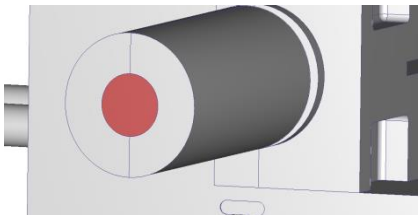
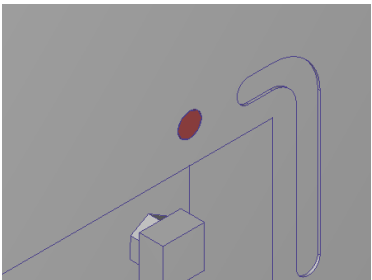
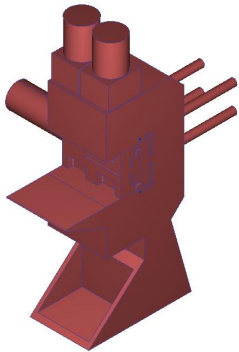
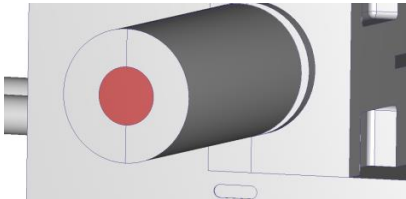
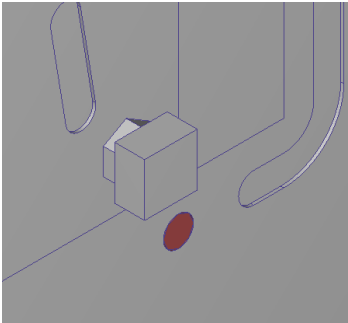
$$54,74 = \frac{\bar{h} \times 0,35}{33,8 \times 10^{-3}} \Leftrightarrow \bar{h} = 5,29 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

onde T_p [°C] representa a temperatura da superfície, T_∞ [°C] a temperatura ambiente, Pr o número de Prandtl, Ra o número de Rayleigh, Gr o número de Grashof, $\overline{Nu}_L$ o número de Nusselt, β o coeficiente de expansão térmica volumétrica [°C⁻¹], ν a viscosidade cinemática [m²/s], L_{ref} o comprimento característico [m] e $\bar{h}$ o número de Nusselt [W/m².K].

Com base nos cálculos efetuados e observações registadas, foram definidas as condições fronteira a aplicar na análise numérica (Tabela 18).

Tabela 18 - Condições fronteira aplicadas ao cenário 1.

Condição	Magnitude	Representação
Caudal mássico na entrada do cabeçote	350 kg/h	
Potência calorífica gerada nas resistências de aquecimento (por volume)	1800 W	

Condição	Magnitude	Representação
Temperatura de entrada do fluido	110°C	
Pressão nas saídas da feira	0 Pa	
Pressão na saída do canal de água	0 Pa	
Convecção nas superfícies externas	$h = 5,3 \text{ W} / \text{m}^2 . \text{K}$ $T_{ar} = 25^\circ \text{C}$	
Pressão de entrada no cabeçote	170 bar	
Caudal volumétrico e temperatura de entrada no canal de água	$\dot{q} = 0,1 \text{ m}^3 / \text{h}$ $T_{in} = 95^\circ \text{C}$	

4.2.2.3 Condições iniciais

Para simplificar a análise numérica e evitar simular uma situação de arranque de máquina (onde, habitualmente, não se registam ocorrências de composto de borracha vulcanizada), definiram-se várias condições iniciais que visam garantir determinadas temperaturas logo no início da análise. Isto permitiu reduzir com bastante impacto o número de iterações e, consequentemente, o tempo e computação.

Através de imagens termográficas (Figura 72), foi possível observar o gradiente de temperatura global durante o funcionamento da *Cap strip* à velocidade máxima da linha, o que auxiliou na escolha das condições iniciais a aplicar. Desta forma, optou-se por atribuir uma temperatura inicial de 35°C à estrutura de suporte do cabeçote, 95°C ao cabeçote, resistências de aquecimento e fieira, e 100°C ao composto de borracha.



Figura 72 - Imagem termográfica do cabeçote com a *Cap strip* em funcionamento à velocidade máxima da linha.

4.2.2.4 Malha

A definição da malha em qualquer análise numérica de fluidos é um dos passos mais importantes, e que tem um forte impacto na precisão dos resultados obtidos. No Autodesk® CFD 2019 existe a possibilidade de definir a malha manualmente ou em modo automático. O modo automático de definição da malha efetua uma análise topológica da geometria em análise e determina o tamanho da malha e a distribuição de elementos em cada aresta, superfície e volume. O algoritmo considera ainda as zonas de curvatura, gradientes e a proximidade entre volumes do modelo. Isto permite definir uma malha mais densa nas zonas onde é necessário, e uma malha menos densa nas zonas onde é permitido. Este modo reduz o tempo de definição da malha que poderia demorar horas (ou até dias), em apenas alguns minutos.

Dada a complexidade do domínio de controlo que contém múltiplas geometrias curvilíneas, principalmente no canal de escoamento de composto de borracha, optou-se por gerar uma malha pelo modo automático e, de seguida, executar a mesma análise reduzindo o fator de tamanho de malha de 1 para 0,7 (*"Size adjustment"* - Figura 73). Este procedimento é altamente recomendado pela Autodesk, e caso a diferença de resultados obtidos com ambas as malhas seja inferior a 5%, significa que a malha automática de fator 1 é adequada à análise em causa. Com esta ferramenta, os elementos utilizados são os tetraedros com quatro nós. Cada um dos nós possui cinco graus de liberdade (u, v, w, P, T) para fluxos laminares e sete graus de liberdade para fluxos turbulentos ($u, v, w, P, T, K, \varepsilon$).

A Figura 73 apresenta os parâmetros utilizados para a elaboração da malha, para o cenário 1.

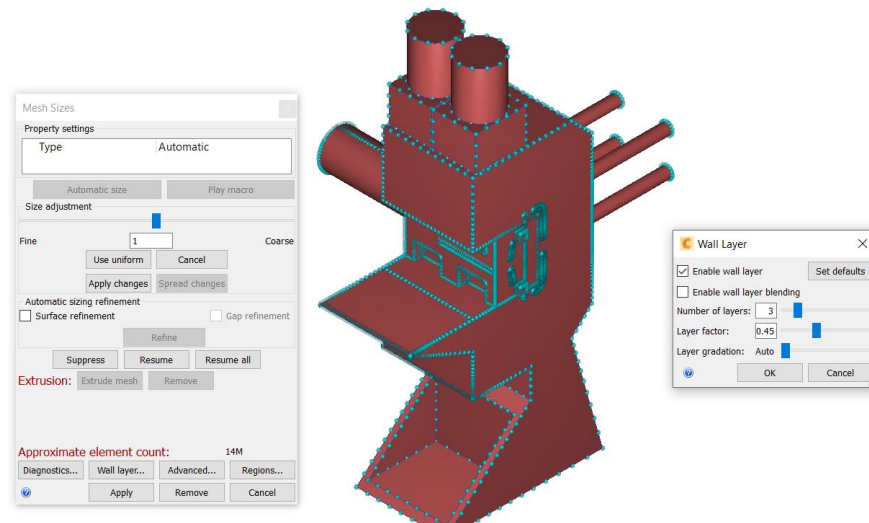


Figura 73 - Dimensões e parâmetros de malha para o cenário 1.

Conforme se pode observar, nas arestas existem vários pontos que identificam a posição de cada nó. Se o fator de tamanho de malha for reduzido de 1 para um valor menor, observa-se uma redução da distância entre esses pontos. Mais, é possível denotar que a geometria do cabeçote contém um maior número de pontos (ou nós) nas suas arestas, quando comparado com a estrutura de suporte do cabeçote. Isto significa que o *software* identificou com sucesso as zonas geométricas onde é expectável observar fortes variações de gradientes de temperatura e velocidade, assim como os locais onde existe contacto entre fluido e sólidos, e também as regiões de geometria curvilínea.

Outra funcionalidade incorporada na definição da malha é a função de camadas nas paredes (*Wall Layers*). Esta ferramenta permite adicionar camadas de elementos ao longo das interfaces entre fluidos e sólidos. Isto permite obter uma distribuição mais suave de elementos pelas paredes, o que é extremamente importante para a previsão correta de fluxo de fluido e de temperaturas.

4.2.2.5 Solver

No *solver*, definem-se todas as condições físicas que estão presentes na análise, assim como o seu tipo (transiente ou regime estacionário).

Numa análise em regime estacionário, as variáveis não se alteram com o tempo, ao contrário do que acontece com uma análise transiente, em que as variáveis vão assumindo magnitudes diferentes ao longo do tempo. Ou seja, uma análise em regime estacionário é utilizada para descobrir o estado de um sistema em que não se observam variações no comportamento e as propriedades (exemplo, temperatura ou velocidade) são constantes, apesar de ainda existir escoamento de fluxos ou movimentos. Em suma, é como se se atingisse um estado de equilíbrio.

Na situação do caso de estudo em análise, pretende-se avaliar a forma como as propriedades variam ao longo do tempo e simular o acionamento das resistências de aquecimento durante um certo período de tempo, para que se possa compreender a distribuição térmica, principalmente no cabeçote.

Conforme apresentado na Figura 74, o tipo de análise escolhido foi a análise transiente com um espaço de tempo de 1 segundo. O espaço de tempo recomendado pela Autodesk® para análises transientes varia entre 0,1 s e 1 s, o número de iterações em cada espaço de tempo calculado deverá situar-se entre as 5 e as 10 iterações. De forma a reduzir os tempos de computação, utilizaram-se 5 iterações.

O *software* permite ainda guardar determinados resultados, i.e., guardar espaços de tempo intervalados em alguns segundos (atribuídos pelo utilizador). Neste caso, e de forma a reduzir o volume de dados gerados pela simulação (dado que a capacidade de armazenamento do *hardware* utilizado é relativamente reduzida), efetuou-se a gravação de dados a cada 10 s correspondentes à análise (Figura 74).

Por último, basta definir os espaços de tempo a executar. Neste caso, pretendeu-se simular o funcionamento da *Cap strip* durante 10 minutos, o que se traduz em 600 períodos de tempo, com um espaço de tempo de 1 segundo.

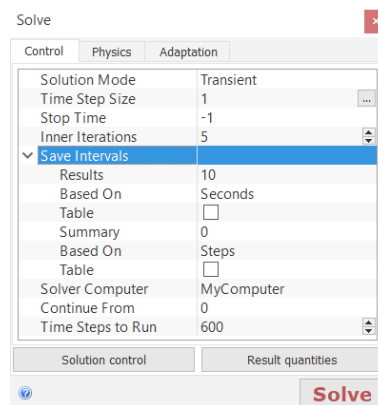


Figura 74 - Parâmetros do *solver* para o cenário 1.

Relativamente à parte física, ativou-se a opção de fluxo, de forma a indicar que se pretende calcular os fluxos existentes no domínio de controlo, definindo-os ainda como fluidos incompressíveis. De forma a analisar qualquer gradiente de temperatura, é necessário ativar as transferências de calor. É também possível definir a orientação da aceleração gravítica e a sua magnitude.

Por último, efetuou-se um cálculo analítico, de forma a auxiliar a escolha do modelo de turbulência a optar. Para isso calculou-se o número de Reynolds, descrito pela equação (35):

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (35)$$

onde u representa a velocidade média do fluido [m^2/s], L o comprimento característico [m] e μ a viscosidade dinâmica [$Pa.s$].

A viscosidade para o valor de frequência de 100 rad/s (visto que o composto de borracha é submetido a pressões de 170 bar e 100 rad/s é um valor típico do processo de extrusão, podendo atingir outros valores entre 100 rad/s e 1000 rad/s [88]) e a 100°C é igual a 1344 Pa.s, e o

diâmetro da entrada de fluido é de 90 mm, pelo que apenas é necessário determinar a velocidade. Da Tabela 17 pode-se retirar que o caudal mássico de composto de borracha, para a receita em análise (982540000200), corresponde a aproximadamente 350 kg/h, e com uma densidade de 1155 kg/m³. Com estes dados, é então possível calcular o número de Reynolds:

$$\dot{q} = \rho \times v \times A \Leftrightarrow \quad (36)$$

$$\frac{350}{3600} \times \frac{1}{1155} = v \times \pi \times (45 \times 10^{-3})^2 \Leftrightarrow$$

$$v = 0,01323 \text{ m/s}$$

Seguindo a equação (35),

$$Re = \frac{1155 \times 0,01323 \times 0,09}{1344} = 0,00102$$

Sabendo que para $Re < 2300$ se está perante fluxos laminares, para $Re > 4000$ se está perante fluxos turbulentos, e que para valores intermédios se regista um fluxo transiente de regime laminar para turbulento ([31]), então o fluxo em análise é altamente laminar.

A Figura 75 representa os dados colocados no *solver*.

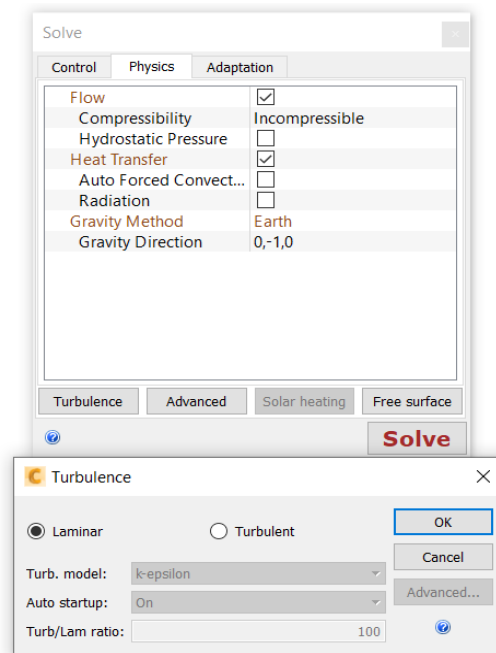


Figura 75 - Definições do *solver* relativos à aba "Física".

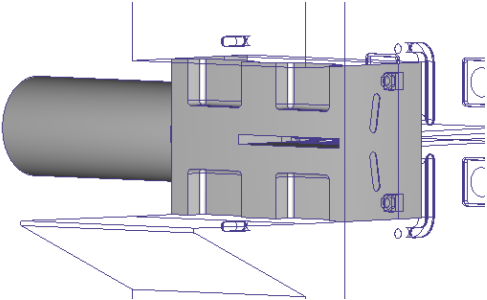
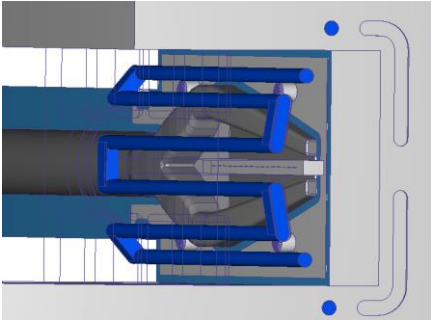
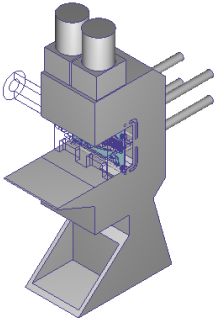
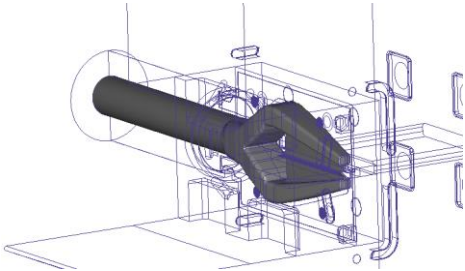
4.2.3 Cenário 2 – Cabeçote com circuito de água

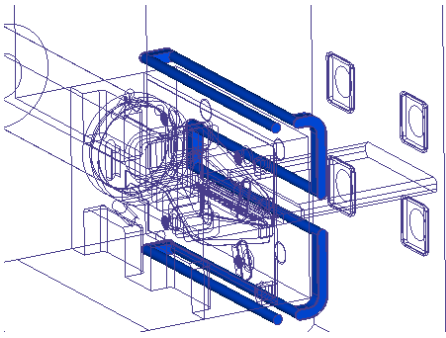
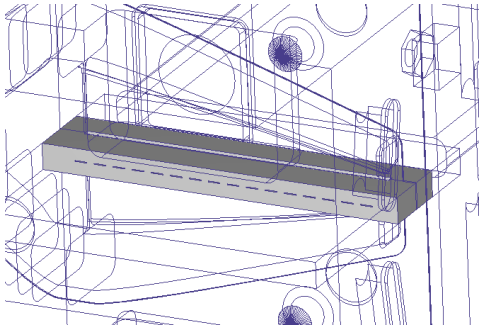
Além do cenário 1, foi ainda estruturado um novo cenário em que se exclui a presença das resistências de aquecimento e se substitui as mesmas por água. Com esta análise, pretendeu-se comparar o sistema antigo, que esteve implementado na empresa, com o sistema atual.

4.2.3.1 *Materiais*

Os materiais utilizados neste cenário possuem as mesmas propriedades que as referidas no cenário 1. Contudo, a atribuição desses materiais aos volumes do domínio de controlo é ligeiramente diferente. A Tabela 19 identifica os materiais que foram atribuídos a cada volume.

Tabela 19 - Materiais atribuídos a cada volume para o cenário 2.

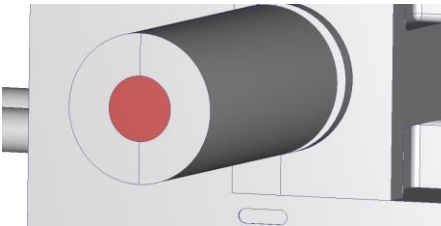
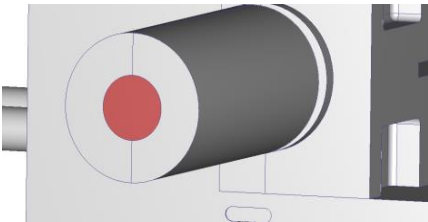
Componente	Material	Representação
Cabeçote	Aço ao carbono	
Volume interno do canal do cabeçote	Água	
Estrutura de suporte do cabeçote	Aço ao carbono	
Composto de borracha	FMS-B00163	

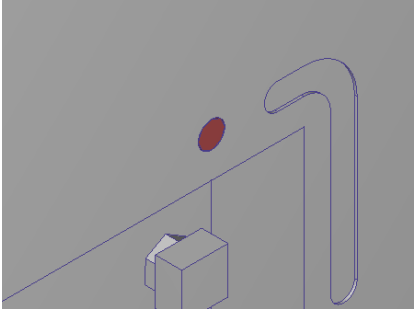
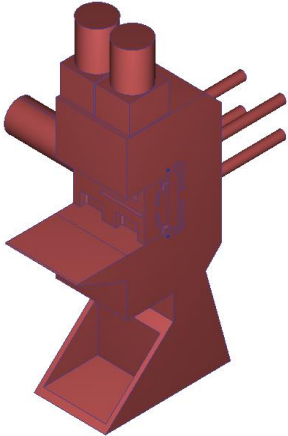
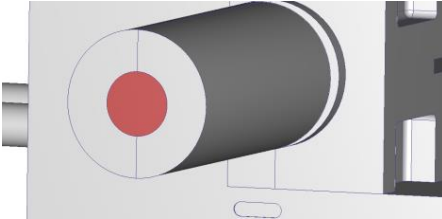
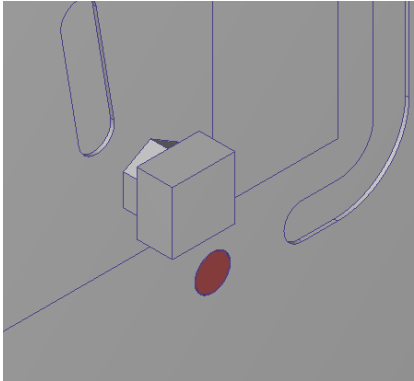
Componente	Material	Representação
Volume interno do canal da estrutura de suporte do cabeçote	Água	
Fieira	Aço ao carbono	

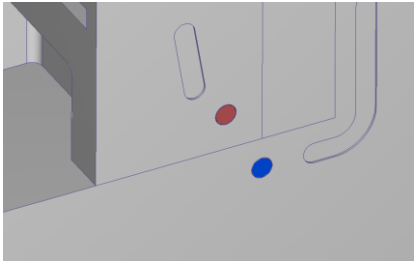
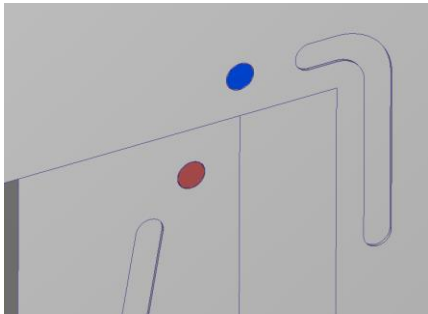
4.2.3.2 Condições fronteira

As condições fronteira aplicadas ao cenário 2 são muito idênticas às aplicadas no cenário 1. A única diferença passa pela eliminação da geração de calor por parte das resistências de aquecimento, e substituição das mesmas pelo circuito de água e pela condição de caudal mássico e temperatura na entrada do canal pertencente ao cabeçote. A Tabela 20 resume todas as condições fronteira aplicadas ao cenário 2.

Tabela 20 - Condições fronteira aplicadas ao cenário 2.

Condição	Magnitude	Representação
Caudal mássico na entrada do cabeçote	350 kg/h	
Temperatura de entrada do fluido no cabeçote	110°C	

Condição	Magnitude	Representação
Pressão nas saídas da fieira	0 Pa	
Pressão na saída do canal de água da estrutura de suporte do cabeçote	0 Pa	
Convecção nas superfícies externas	$h = 5,3 \text{ W} / \text{m}^2 . \text{K}$ $T_{ar} = 25^{\circ} \text{C}$	
Pressão de entrada no cabeçote	170 bar	
Caudal mássico e temperatura de entrada no canal de água	$\dot{q} = 0,1 \text{ m}^3 / \text{h}$ $T_{in} = 95^{\circ} \text{C}$	

Condição	Magnitude	Representação
Caudal volumétrico à entrada do canal de água no cabeçote	$\dot{q} = 0,1 \text{ m}^3 / \text{h}$ $T_{in} = 95^\circ\text{C}$	
Pressão na saída do canal de água no cabeçote	0 Pa	

As temperaturas de entrada de água nos canais do cabeçote e da estrutura de suporte do cabeçote foram selecionadas de acordo com as TCU (*Temperature Control Unit* - Unidade de Controlo de Temperatura)(Figura 76), cujo valor alvo (*setpoint*) se encontrava nos 95°C. O caudal volúmico foi definido de forma a assumir o valor constante de 100 litros por hora, valor que seria idêntico àquele que se encontra em funcionamento.



Figura 76 - Controlador de temperatura da unidade de controlo de temperatura.

4.2.3.3 Condições iniciais

Tal como as condições fronteira, as condições iniciais são também idênticas às condições iniciais do cenário 1, à exceção da temperatura inicial das resistências de aquecimento, que neste

cenário foram excluídas. Portanto, atribuiu-se 95°C ao cabeçote, a ambos os circuitos de água e à fieira. Ao composto de borracha foi atribuída uma temperatura inicial de 100°C e, à estrutura de suporte do cabeçote, uma temperatura de 35°C.

4.2.3.4 Malha

Novamente, analogamente ao cenário 1, a malha definida para o cenário 2 foi elaborada com recurso à ferramenta automática, em que o fator de tamanho de malha foi posteriormente reduzido para 0,7, numa segunda análise, de forma a verificar se a variação dos resultados se situava abaixo dos 5%, verificando assim a convergência de resultados. Para tal, foram criadas duas opções de cenário, uma contendo o fator de tamanho de malha igual a 1, e a segunda contendo esse mesmo fator igual a 0,7.

4.2.3.5 Solver

O *solver* foi também definido exatamente igual àquele representado no cenário 1 (Figura 74 e Figura 75). Apesar de terem sido removidas as resistências de aquecimento, a opção *Heat transfer* (transferência de calor) mantém-se ativa, dado que, apesar de não existir uma fonte de geração de calor, existem trocas de calor entre o cabeçote e a água que circula nos canais, funcionando o cabeçote de forma idêntica a um permutador de fluxos não misturados. Sendo assim, as trocas de calor estão presentes e a transferência de calor tem de se manter ativada para que se verifiquem alterações ao nível dos gradientes de temperatura.

4.2.4 Cenário 3 – Componente do cabeçote com circuito de água

Um terceiro cenário foi estabelecido para avaliar, essencialmente, o gradiente de temperatura numa situação semelhante à condição de cabeçote aberto. Para isso, utilizou-se o modelo representado na Figura 56 -a), mas suprimindo todos os volumes à exceção da parte móvel do cabeçote e do volume de água que está inserido nos canais do cabeçote (Figura 77).

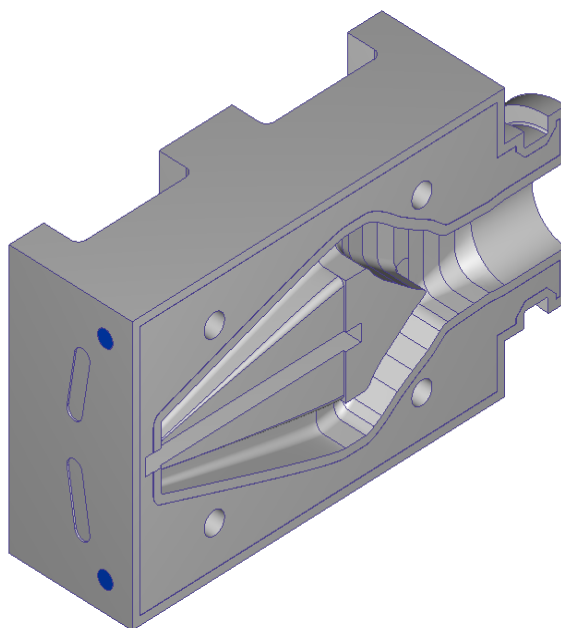
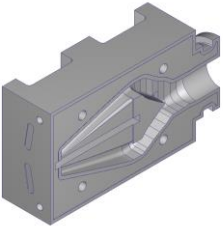
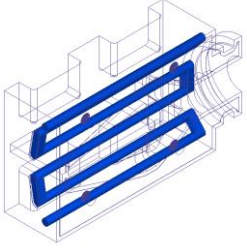


Figura 77 – Domínio de controlo para a simulação do cenário 3.

4.2.4.1 *Materiais*

Neste cenário, não foi necessário atribuir o fluido FMS-B00163 a qualquer volume, visto que, sendo uma simulação do cenário de cabeçote aberto, não existe qualquer volume de composto presente nos canais de escoamento do cabeçote. Portanto, neste cenário apenas foi necessário atribuir dois materiais (Tabela 21).

Tabela 21 - Materiais utilizados para o cenário 3.

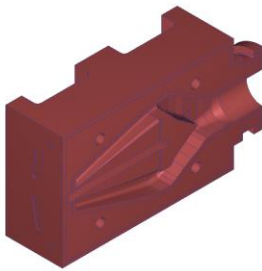
Componente	Material	Representação
Cabeçote (parte móvel)	Aço ao carbono	
Volume de água	Água	

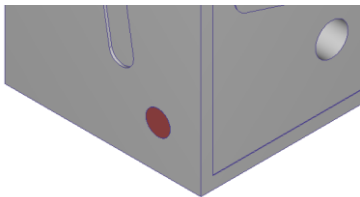
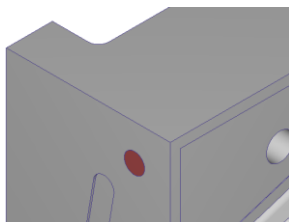
As propriedades detalhadas dos materiais descritos, estão presentes na Figura 66 e Figura 68.

4.2.4.2 *Condições fronteira*

Uma vez que este cenário inclui apenas dois volumes, o número de condições fronteira a aplicar também é menor. Em suma, é necessário definir a convecção natural, o caudal volumétrico de água, e temperatura à entrada e pressão à saída do escoamento de água (Tabela 22).

Tabela 22 - Condições fronteira aplicadas ao cenário 3.

Condição	Magnitude	Representação
Convecção natural nas superfícies externas do cabeçote	$h = 5,3 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ $T_{ar} = 25^\circ \text{C}$	

Condição	Magnitude	Representação
Caudal volumétrico e temperatura de entrada no canal de água	$\dot{q} = 0,1 \text{ m}^3 / \text{h}$ $T_{in} = 95^\circ\text{C}$	
Condição	Magnitude	Representação
Pressão na saída do canal de água	0 Pa	

4.2.4.3 Condições iniciais

Neste cenário, apenas se atribuiu uma condição inicial, nomeadamente, a definição da temperatura inicial do volume do cabeçote e da água para 90°C . Desta forma, esperava-se observar um ligeiro aumento de temperatura, devido à entrada de água a 95°C (condição fronteira) no cabeçote e, ao fim de alguns minutos, verificar o gradiente de temperatura.

4.2.4.4 Malha

Tal como no cenário 1 e 2, a malha definida para o cenário 3 foi executada através da ferramenta automática incluída com o *software* utilizado, efetuando novamente a redução do fator de malha de 1 para 0,7, de forma a se verificar, ou não, uma variação dos resultados obtidos abaixo dos 5%.

4.2.4.5 Solver

Apesar de vários volumes terem sido suprimidos, o *solver* para o cenário 3 permaneceu igual ao *solver* do cenário 1 e 2, visto que a física subjacente ao cenário elaborado se mantém igual. De uma forma geral, as únicas alterações, em comparação com o cenário 1 e 2, são referentes ao domínio de controlo, condições fronteira e condições iniciais.

No cenário 3, decidiu-se manter o período de 10 minutos de simulação (600 espaços temporais de 1 segundo) de forma a simular uma situação de arranque da máquina, em que o cabeçote se mantém aberto durante um período de tempo semelhante ao definido, até que o mesmo seja fechado e se inicie a produção.

4.2.5 Cenário 4 – Componente do cabeçote com resistências de aquecimento

À semelhança do cenário 3, o cenário 4 foi contruído de forma a verificar o gradiente de temperatura no volume da parte móvel do cabeçote (Figura 78), em situação de cabeçote aberto.

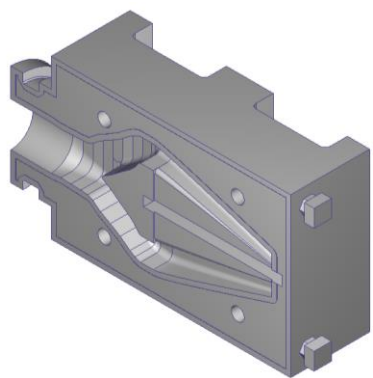


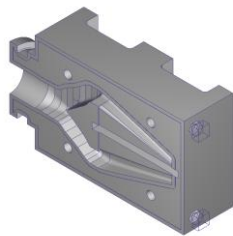
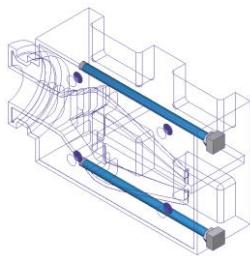
Figura 78 - Parte móvel do cabeçote com resistências de aquecimento. Modelo utilizado no cenário 4.

Neste cenário, o domínio de controlo é constituído pela parte móvel do cabeçote e pelas duas resistências de aquecimento.

4.2.5.1 *Materiais*

Conforme se pode verificar pelo domínio de controlo, neste cenário não existe qualquer fluxo de fluido, pelo que os materiais água, FMS-B00163 e ar não são atribuídos a qualquer volume. No domínio de controlo existem três corpos, sendo dois deles iguais entre si. Portanto, os materiais atribuídos encontram-se descritos na Tabela 23.

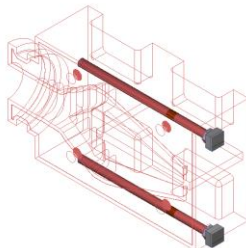
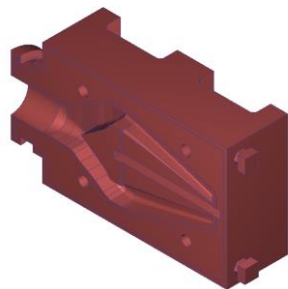
Tabela 23 - Materiais atribuídos ao cenário 4.

Componente	Material	Representação
Cabeçote	Aço ao carbono	
Resistências de aquecimento	Aço ao carbono	

4.2.5.2 *Condições fronteira*

As condições fronteira (Tabela 24) aplicadas ao cenário 4 retratam a geração de calor por parte das resistências de aquecimento, e também a dissipação de parte desse calor para o exterior, com a atribuição da condição *Film coefficient* nas superfícies externas do cabeçote.

Tabela 24 - Condições fronteiras aplicadas ao cenário 4.

Condição	Magnitude	Representação
Potência calorífica gerada nas resistências de aquecimento (por volume)	1800 W	
Convecção natural nas superfícies externas do cabeçote	$h = 5,3 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ $T_{ar} = 25^\circ\text{C}$	

4.2.5.3 Condições iniciais

De forma a simular a situação de cabeçote aberto, atribuiu-se uma temperatura inicial de 90°C a todos os volumes presentes no domínio de controlo, i.e., à parte móvel do cabeçote e às duas resistências de aquecimento.

4.2.5.4 Malha

Tal como nos cenários anteriores, a malha definida para o cenário 4 foi elaborada através da ferramenta automática, efetuando ainda a redução do fator de malha de 1 para 0,7, de forma a verificar se a diferença entre os resultados obtidos supera os 5%, ou não.

4.2.5.5 Solver

Apesar de no cenário 4 não existir fluxo de fluidos, o *solver* permaneceu com as mesmas definições dos cenários anteriores. Optou-se por escolher o regime laminar, em detrimento de um modelo de turbulência, visto que a convecção natural corresponde a uma situação de regime laminar. Apesar de a mesma não ser modelada, mas sim substituída por uma condição fronteira, o regime laminar deve ser igualmente atribuído na mesma na definição de turbulência do *solver*.

No cenário 4 decidiu-se manter o período de 10 minutos de simulação (600 espaços temporais de 1 segundo) de forma a simular uma situação de arranque de máquina em que o cabeçote se mantém aberto durante um período de tempo semelhante ao definido e em regime de aquecimento.

4.2.6 Cenário 5 – Aquecimento viscoso

Ao longo do projeto, foi constatado que existia uma dúvida em relação à geração de calor provocada pelas tensões de corte no composto de borracha, aquando do seu escoamento. De facto, o aquecimento viscoso, i.e., a geração de calor resultante da ação mecânica sobre um fluido, produz elevadas tensões de corte e forças de atrito sobre as camadas adjacentes (e.g. paredes do canal de escoamento), resultando num processo irreversível de geração de calor.

4.2.6.1 Materiais

Para esta simulação, a estrutura de suporte do cabeçote foi suprimida, assim como os mecanismos de troca de energia térmica (água e resistências de aquecimento), resultando apenas no cabeçote e composto de borracha. Por isso, os materiais utilizados foram o aço ao carbono para o cabeçote, e FMS-B00163 para o composto de borracha.

4.2.6.2 Condições fronteira

Para visualizar o fenómeno de aquecimento viscoso, foi necessário isolar o domínio de controlo, i.e., impedir que fontes de calor externas causassem um impacto direto nos resultados da distribuição térmica. Para isso, a convecção natural não foi considerada, assim como qualquer geração de calor, ao contrário do que se observava nos cenários anteriores.

Assim, foi atribuída uma temperatura de entrada de 110°C e um caudal mássico de 350 kg/h à entrada de composto de borracha, e uma pressão de 0 Pa na sua saída.

4.2.6.3 Condições iniciais

Dado que a temperatura de entrada é de 110°C, então a temperatura inicial do cabeçote e do composto de borracha foi definida como 110°C. Assim, as possíveis gerações de calor seriam perceptíveis nos resultados, ao invés de esse mesmo calor ser transferido entre volumes do domínio de calor, dificultando a observação de qualquer alteração térmica por parte do aquecimento viscoso.

4.2.6.4 Malha

Identicamente ao que foi utilizado nos cenários anteriores, a malha definida para o cenário 5 foi elaborada através da ferramenta automática, efetuando ainda a redução do fator de malha de 1 para 0,7, de forma a verificar se a diferença entre os resultados obtidos supera os 5%, ou não.

4.2.6.5 Solver

No cenário 5, decidiu-se colocar um período 5 minutos de simulação transiente (300 espaços temporais de 1 segundo), com 5 iterações internas em cada espaço de tempo. À semelhança do cenário 1 e 2, o modelo de turbulência utilizado foi o regime laminar (dado o número de Reynolds característico do fluxo de escoamento), e foi ativada a transferência de calor.

4.3 Termografia

A utilização de câmaras termográficas para monitorização e estudo de determinados processos de fabrico, permite obter dados relativos à distribuição de temperatura em múltiplos tipos de superfícies. Contudo, a precisão desses dados e a interpretação dos mesmos, depende

essencialmente da condição das superfícies analisadas. A regulação da emissividade assume, por isso, um fator fulcral.

A obtenção de imagens termográficas foi feita através de uma câmara termográfica (Fluke Ti480 PRO), com capacidade de efetuar medições de -10°C até aos 1000°C e com uma precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Seguindo a tabela de emissividades, presente no manual de operação da câmara termográfica, optou-se por selecionar a emissividade correspondente a uma superfície de aço com superfície rugosa. Isto traduz-se numa emissividade de 0,95. Esta opção é a situação mais aproximada do cenário real, em que as superfícies do cabeçote são em aço e com uma cor mais escura devido à passagem de composto de borracha (que contém negro de fumo), à exceção dos canais de escoamento de composto, que possuem uma superfície polida e diferente das restantes superfícies do cabeçote.

4.4 Análise da rugosidade

Numa fase inicial do caso de estudo discutiu-se, entre membros do departamento de apoio técnico à produção, a possibilidade de que a rugosidade superficial dos canais de escoamento de composto de borracha do cabeçote estivesse a produzir algum impacto e que influenciasse o escoamento de borracha, assim como a discussão acerca da possibilidade de o cabeçote possuir um revestimento técnico.

Para se avaliar a qualidade das superfícies dos canais de escoamento de composto, utilizou-se um rugosímetro portátil (Marh® Perthometer M2) (Figura 79). A utilização de um rugosímetro portátil foi a opção selecionada para o estudo das superfícies dado que, os cabeçotes presentes em todas as quatro *Cap strip* estão em constante funcionamento, e também, devido à sua elevada massa, o transporte e desmontagem seriam bastante morosos e dispendiosos. Contudo, uma das principais dificuldades relativas à utilização do equipamento, deveu-se à instalação do rugosímetro no cabeçote. O posicionamento do rugosímetro é um fator importante para o registo de dados precisos, visto que, o surgimento de vibrações no equipamento pode deturpar os valores registados. Os dados fornecidos pelo rugosímetro são:

- R_t – Altura total do perfil de rugosidade, resultante da diferença entre o maior pico e o maior vale registado.
- R_z – Média aritmética das alturas máxima do perfil, medidos em cinco comprimentos de referência consecutivos.
- R_a – Rugosidade média aritmética, sendo a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento medido.



Figura 79 - Rugosímetro (Mahr® Perthometer M2).

As medições foram efetuadas no cabeçote da *Cap strip 1*, *Cap strip 2*, e também numa parte fixa de cabeçote em estado novo, presente em armazém. De seguida, fez-se um planeamento relativo às medições. Estabeleceu-se nove locais de medição (Figura 80) e, em cada um desses pontos, seriam efetuadas três medições. A escolha destes nove locais permitiu obter os valores de rugosidade em locais onde os gradientes de velocidade são diferentes, visto que a velocidade de escoamento pode afetar a qualidade das superfícies dos canais de escoamento a longo prazo.

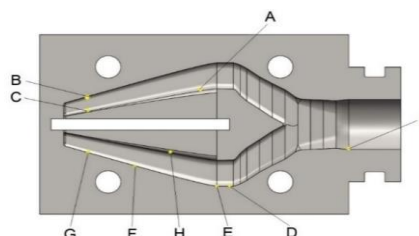


Figura 80 - Locais de medição da rugosidade.

4.5 Ensaios de extrusão

Conforme se referiu anteriormente, a observação do escoamento de composto de borracha no interior do cabeçote não se pode efetuar de forma direta. Possivelmente, com recurso a tecnologia mais avançada e dispendiosa, poderia ser possível obter dados interessantes relativos a esse escoamento. Contudo, numa ótica de manter os custos reduzidos, iniciou-se o projeto para o desenvolvimento de uma ferramenta que permitisse visualizar o escoamento de composto em superfícies com rugosidades superficiais distintas.

4.5.1 Equipamento

Antes de se iniciar o desenho da ferramenta, discutiu-se o local onde se poderia implementar qualquer tipo de acessório que permitisse fazer o escoamento do composto de borracha. No final da discussão, chegou-se a acordo que o melhor local seria através da colocação de um dispositivo ligado diretamente à saída da bomba de engrenagens. A bomba de engrenagens contém um sistema de fecho controlado por um cilindro hidráulico, o qual permite garantir uma pressão de contacto elevada entre o cabeçote e a bomba de engrenagens (Figura 81).



Figura 81 - Bomba de engrenagens.

Contudo, para colocar um equipamento ligado à bomba de engrenagens, o mesmo teria de apresentar uma geometria idêntica à entrada do cabeçote, de forma a garantir a estanquicidade entre as faces da bomba e do equipamento. Para isso, desenvolveu-se um adaptador através de um processo de engenharia inversa, i.e., retirando cotas da secção de entrada do cabeçote.



Figura 82 - Elemento de encaixe pertencente ao cabeçote. Permite ligar o cabeçote à bomba de engrenagens.

Recorrendo ao *software* de modelação, foi possível obter uma perspetiva inicial relativamente à montagem do equipamento (Figura 83).

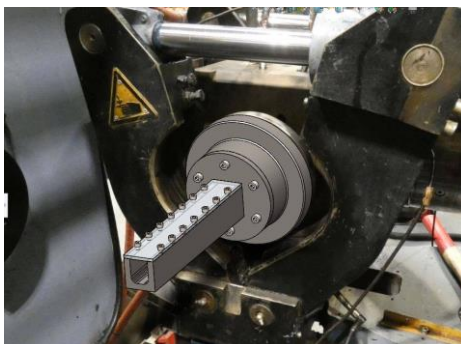


Figura 83 - Combinação do modelo computacional com uma imagem da bomba de engrenagens, de forma a simular a montagem do conjunto.

Transpondo as cotas para o Solidworks®, foi então possível desenhar um adaptador para acoplamento à bomba de engrenagens (ANEXO 11 – Desenho técnico do equipamento para ensaios de extrusão).

Seguido do adaptador, foi também desenhado um canal de escoamento formado por uma calha em U em aço C45E e com uma tampa de policarbonato, para possível observação do escoamento, fixada através de ligações aparafusadas. As dimensões do canal possuem, aproximadamente, as mesmas dimensões do canal de escoamento do cabeçote após a região de bifurcação, resultando no equipamento da Figura 84.



Figura 84 - Equipamento desenvolvido para os ensaios de extrusão.

A tampa foi inicialmente fabricada em ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), uma vez que já se encontrava presente na empresa. Contudo, o colapso da mesma no primeiro ensaio, levou à aquisição de duas tampas em policarbonato, que possui uma temperatura de transição vítrea de, cerca de, 150°C, o que também permitiu duplicar a espessura da tampa. Comercialmente, as placas de policarbonato de maior espessura possuíam 5 mm de espessura, pelo que a utilização de duas placas permitiu obter uma tampa com 10 mm de espessura.

4.5.2 Parâmetros

Todos os ensaios foram executados através do acionamento da bomba de engrenagens a uma velocidade de rotação de 2 rpm, permitindo assim fixar, de forma igual, o caudal mássico debitado pela bomba de engrenagens para cada ensaio. As rugosidades superficiais para cada ensaio foram alteradas com a utilização de diferentes lixas com diferentes granulometrias.

4.6 Arduino®

O mecanismo de troca de energia e o movimento do fluido ocorre num elemento fechado, i.e., no interior do cabeçote. A observação e registo de qualquer parâmetro torna-se extremamente difícil devido à inexistência de contacto e observação direta com a parte interna do cabeçote. De forma a combater este obstáculo, decidiu-se recorrer a processos automatizados para monitorizar a temperatura do fluido (composto de borracha) no interior do cabeçote.

Inicialmente pretendia-se adquirir uma sonda de temperatura e conectar a mesma ao computador de uma das *Cap Strip* presentes na fábrica. Contudo, esta hipótese não se concretizou devido à linguagem de programação utilizada pela empresa construtora das *Cap strip* para a elaboração do *software* próprio utilizado no controlo da máquina, e que era desconhecida por parte dos colaboradores responsáveis pelo segmento de automação.

Após alguma investigação e discussão, iniciou-se a elaboração de um plano para a montagem de um sistema controlado por Arduino®, capaz de monitorizar a temperatura no interior do cabeçote. A utilização de um sistema Arduino® tornou-se particularmente aliciante devido à relativa facilidade de programação, baixo custo do dispositivo e seus módulos, e facilidade de montagem.

Observando atentamente a Figura 85, é possível concluir que em toda a secção do cabeçote da máquina apenas existe uma sonda de temperatura, a qual está colocada após a bomba de engrenagens, na fase inicial do escoamento de composto de borracha no interior do cabeçote. As resistências de aquecimento possuem 360 mm de comprimento, o que revela ser um comprimento curto quando comparado com a largura do cabeçote (485 mm). Esta diferença de comprimentos levanta dúvidas em relação ao controlo de temperatura, visto que sendo as resistências de aquecimento a principal fonte de geração de calor no cabeçote, e estando as mesmas afastadas da sonda de temperatura original do cabeçote, o calor que é detetado por essa sonda é uma incógnita.

De forma a suportar os dados obtidos pela análise numérica com dados experimentais e a perceber efetivamente como se manifesta o gradiente de temperatura no cabeçote, decidiu-se extrair um dos purgadores existentes no cabeçote e utilizar essa cavidade para a colocação de uma sonda de temperatura. Desta forma, evita-se o processo de furação do cabeçote para

colocação de uma sonda de temperatura temporária. Os purgadores são mecanismos que permitem a abertura e fecho de um canal que liga o interior do cabeçote ao exterior. O seu papel principal passa por auxiliar o arranque da *Cap strip*, quando o composto de borracha se encontra a temperaturas mais baixas e apresenta uma dificuldade superior em fluir pela fieira. Na Figura 85 é possível observar o purgador superior em posição de aberto e com composto de borracha a ser extraído.

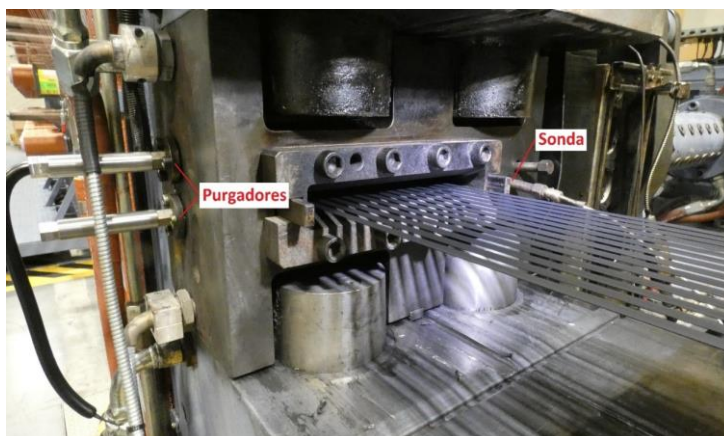


Figura 85 - Localização dos purgadores e sonda de temperatura no cabeçote.

4.6.1 Desenvolvimento do sistema de monitorização de temperatura

Para a montagem do sistema de monitorização de temperatura foi necessário enumerar quais os principais requisitos pretendidos, sendo eles:

- Sensor de temperatura com precisão mínima de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$;
- Sistema de alimentação portátil, de forma a evitar a passagem de fios elétricos até à tomada elétrica mais próxima;
- Registo de dados.

Com base nestes requisitos, procedeu-se à aquisição dos componentes necessários para a montagem do dispositivo de monitorização de temperatura.

Os componentes adquiridos e seus custos são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Componentes e seus custos para montagem do sistema de monitorização de temperatura.

Componente	Custo
Arduino® UNO	N.A.
Sonda RTD PT100 – 100 mm	2,74 €
Amplificador MAX31865	4,39 €
Módulo para cartão microSD	2,83 €
LED	N.A.
Cartão de memória 32 GB	N.A.
Resistência 110 Ω	N.A.
16 Fios	N.A.
Breadboard	N.A.
Banco de energia - 10000mAh	N.A.

Os componentes cujo custo está representado por N.A. (Não Aplicável) referem-se a componentes já existentes na empresa e que não necessitaram de ser adquiridos durante o projeto em causa. Os restantes componentes adquiridos representam um total de 9,96 €, sendo este um valor bastante reduzido.

Após a aquisição dos componentes necessários, procedeu-se à montagem do circuito. O primeiro passo consistiu em definir o modo de funcionamento do amplificador MAX31865, que permite a utilização de sondas RTD PT100 com dois, três ou quatro fios, e faz o ajuste automático para a compensação da resistência dos fios conectores. Dado que a sonda de temperatura escolhida possui três fios, foi necessário soldar os locais indicados na Figura 86.

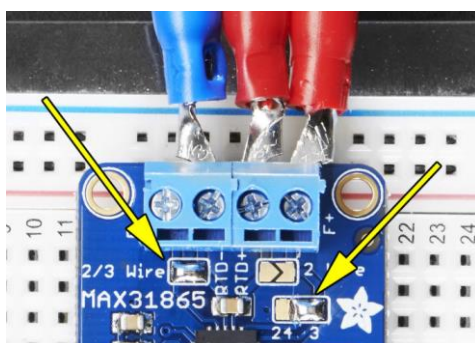


Figura 86 - Pontos de solda no amplificador MAX31865.

Após o estabelecimento do modo de funcionamento do amplificador, é possível efetuar a montagem de todo o circuito. Utilizando o *software* Fritzing®, consegue-se montar todos os componentes de uma forma virtual, antes da montagem prática propriamente dita. Ao fim de múltiplas tentativas, o esquema de montagem final obtido encontra-se representado na Figura 87.

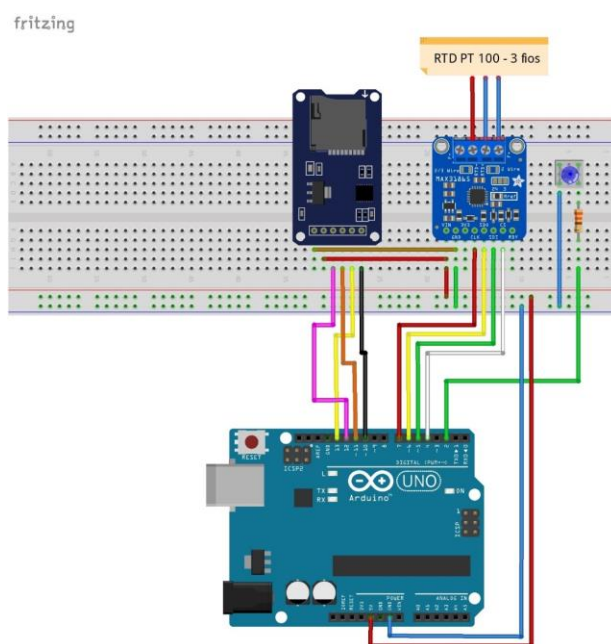


Figura 87 - Esquema de montagem do sistema de monitorização de temperatura.

Com o esquema apresentado, é possível alimentar, programar e controlar todos os módulos através do Arduino® UNO, ler e gravar dados com o módulo para cartões microSD, registrar o valor da resistência dada pela sonda de temperatura RTD PT100 (que é posteriormente convertido) e o LED (diodo emissor de luz) azul permite ainda emitir um sinal luminoso a cada instante que é efetuado um registo do valor de temperatura.

Em paralelo com a montagem do circuito elétrico, foi ainda desenvolvida toda a linguagem de programação. O programa final desenvolvido encontra-se no ANEXO 5 – Programa de leitura e registo de temperatura.

4.6.2 Particularidades do programa desenvolvido

O programa desenvolvido contém algumas condições definidas que visam satisfazer os requisitos necessários para o registo de dados, entre os quais:

- O tempo entre cada leitura e registo efetua-se com um espaçamento de 30 segundos e o número de medições foi definido como 2880, de forma a corresponder a 24 horas (Figura 88);

```
double tempo = 30000;      //TEMPO DE INTERVALO DE LEITURA [ms].  
int medicoes=2880;         // NÚMERO DE MEDIÇÕES A FAZER [-].
```

Figura 88 - Programação correspondente à definição do número de medições e intervalo entre cada medição.

- Inicialmente o banco de energia desligava-se antes de efetuar a segunda leitura. Este fenómeno ficava a dever-se à presença de um mecanismo característico de alguns bancos de energia em que ao fim de 30 segundos se desligam, de forma a conservar energia, caso a corrente debitada fosse inferior a 90 mA. Este problema foi contornado através do acionamento do LED durante dois segundos a cada medição efetuada (Figura 89), provocando um consumo de corrente inferior a 90 mA durante apenas 28 segundos.

```
digitalWrite(ledpin, LOW);  
delay(tempo-2000);  
digitalWrite(ledpin, HIGH);  
delay(2000);
```

Figura 89 - Programação correspondente ao acionamento do dispositivo LED.

Cada medição é efetuada de 30 em 30 segundos porque a *Cap strip* contém um programa de registo de dados (Log de dados) que faz registos no mesmo intervalo de tempo. Desta forma, adaptando o programa Arduino® ao programa da *Cap strip*, torna possível o cruzamento de dados.

4.6.3 Projeto e instalação dos componentes

Para a colocação da sonda no cabeçote, seria necessário projetar um adaptador capaz de substituir o purgador extraído, mantendo a vedação do cabeçote e alojando a sonda de temperatura. Retirado o purgador do cabeçote, e com auxílio de um paquímetro, retiraram-se as cotas correspondentes. Com base nessas cotas, foi desenhado um adaptador semelhante ao purgador, mas com um furo interno igual ao diâmetro da sonda de temperatura RTD PT100 e

com uma rosca para a fixação da mesma. O desenho técnico do adaptador projetado encontra-se no ANEXO 12 – Desenho técnico do adaptador para sonda térmica (Arduino®).

Na Figura 90 é mostrado o adaptador e sonda de temperatura instalados no cabeçote, com a sonda a ter 30 mm de comprimento na secção do canal de escoamento de composto de borracha, assegurando um bom contacto entre o fluido e a sonda.

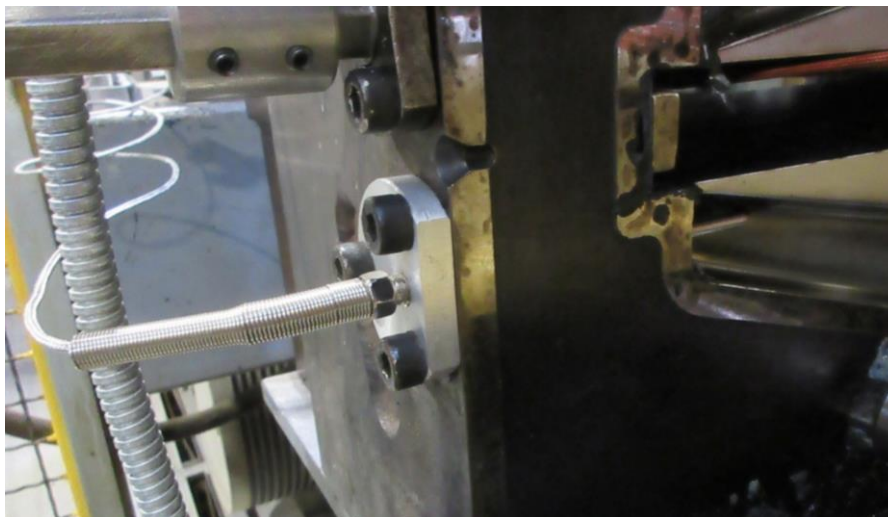


Figura 90 - Adaptador e sonda de temperatura instalados no cabeçote.

Dado que este sistema seria de duração temporária, construiu-se uma caixa em cartão de forma a alojar os componentes do sistema de monitorização, a qual foi provida de dois ímanes que permitiam a fixação temporária da caixa sob a mesa da *Cap strip* (Figura 91).



Figura 91 - Montagem final do sistema de monitorização de temperatura.

RESULTADOS

5.1 Resultados

5.2 Análise crítica dos resultados

5.3 Lições aprendidas

5.4 Soluções implementadas

5 RESULTADOS

5.1 Componente experimental

5.1.1 Ensaios laboratoriais

Neste capítulo, a massa inicial e final das amostras utilizadas nos ensaios *Scorch* e de medição de viscosidade são apresentadas, assim como os resultados obtidos em cada um dos ensaios laboratoriais.

5.1.1.1 Ensaios de *Scorch*

Seguindo as normas referidas no capítulo da metodologia, a massa de cada amostra foi medida com recurso a uma balança. Pretendeu-se atingir uma massa de $11 \pm 0,050$ g para cada amostra. Todas as amostras foram cortadas manualmente de forma a alcançar a massa pretendida. Este processo permite obter resultados mais coerentes, dado que a variação de massa da amostra pode ter um impacto significativo no binário registado pelo equipamento (Monsanto MV 2000E) durante o ensaio. A Figura 92 representa a massa inicial e final para cada uma das amostras com passagem no moinho, com e sem furo interior (Figura 51 – b).

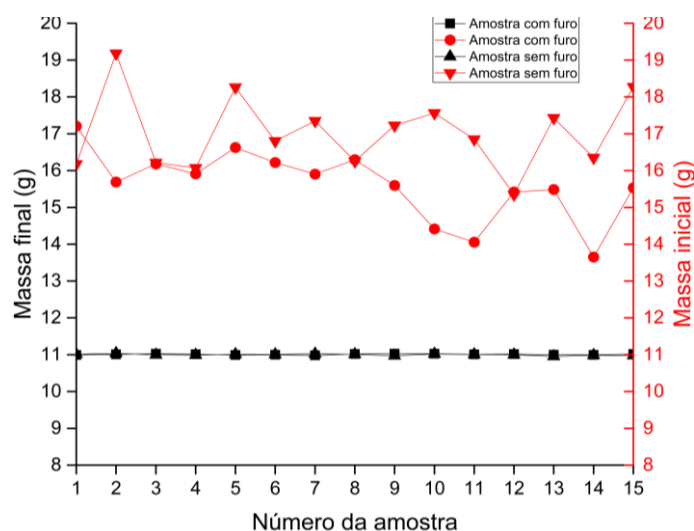


Figura 92 - Massa inicial e final das amostras com passagem no moinho para o ensaio *Scorch*.

A Figura 93 representa a massa inicial e final para cada uma das amostras sem passagem no moinho, com e sem furo interior (Figura 51 – a).

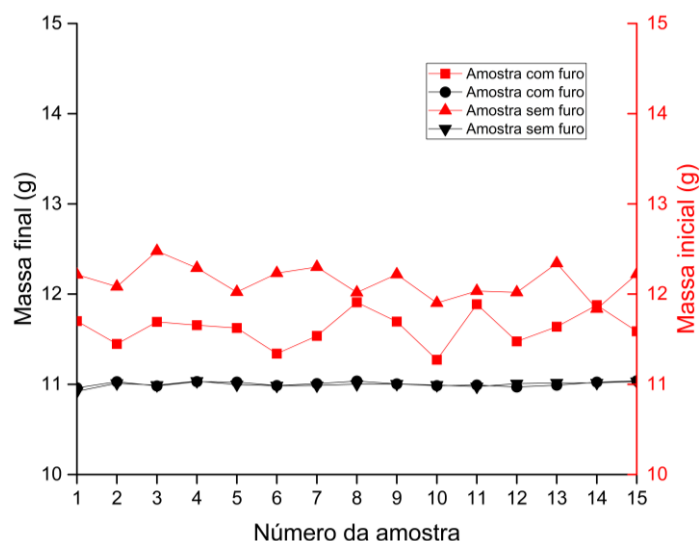


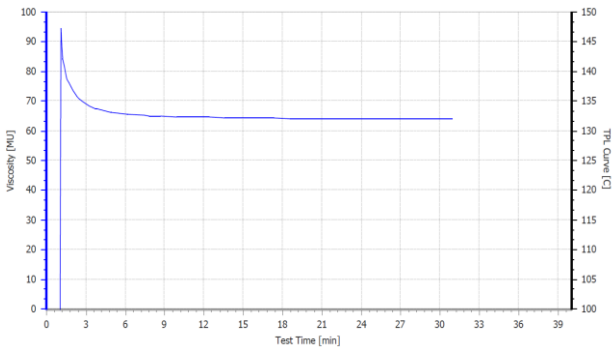
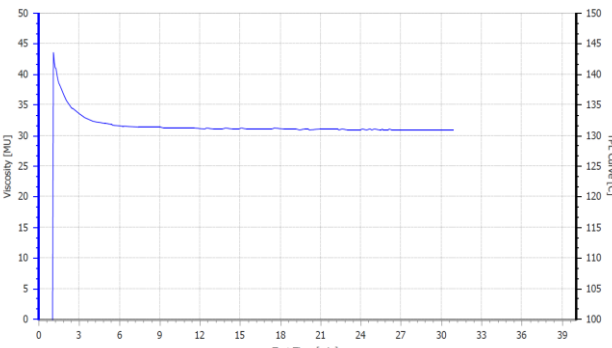
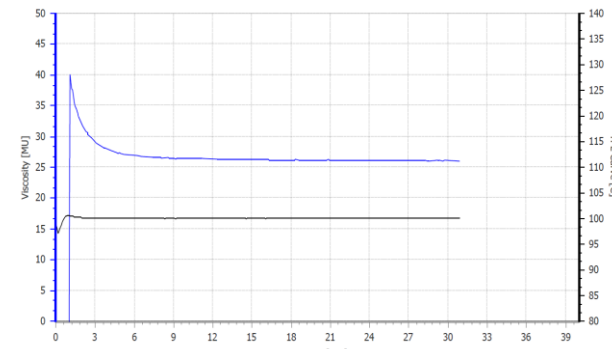
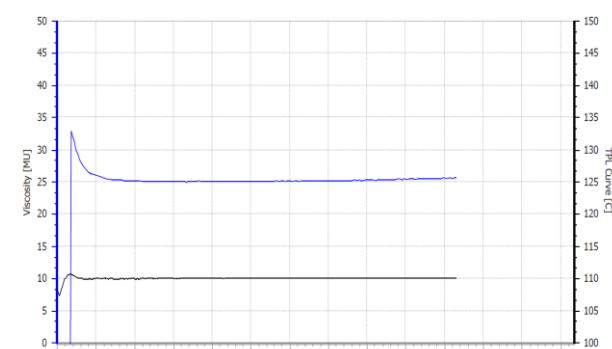
Figura 93 - Massa inicial e final das amostras sem passagem no moinho para o ensaio *Scorch*.

Visualizando a Figura 92 e a Figura 93, é importante referir que as massas iniciais das amostras sem furo são superiores às massas iniciais das amostras com furo, devido exatamente à extração do volume corresponde ao furo. Ainda, de uma forma geral, as amostras com passagem no moinho apresentam uma massa superior em comparação com as amostras que não passaram no moinho. Esta diferença está relacionada com a espessura das amostras principais (Tabela 11). A amostra que passou no moinho apresentou uma espessura superior à amostra que não passou no moinho devido à distância entre rolos utilizada, pelo que as amostras que foram retiradas daí apresentam uma massa e volume superior.

Após a execução de todos os ensaios, os resultados são exportados através da plataforma digital da empresa. Todos os resultados obtidos estão presentes no ANEXO 6 – Relatórios de ensaios *Scorch* – Composto com passagem no moinho e no ANEXO 7 – Relatórios de ensaios *Scorch* – Composto sem passagem no moinho.

Com recurso à Tabela 26 e Tabela 27, é possível retirar conclusões acerca das características de pré vulcanização para o composto de borracha em estudo. As diferenças entre as amostras (processadas e não processadas pelo moinho) para cada temperatura individualmente não foram significativas. Apenas se verificaram diferenças consoante o incremento da temperatura.

Tabela 26 - Resultados obtidos com os ensaios de Scorch para as amostras com passagem no moinho.

Comentário	Resultado
A 80°C, a curva de viscosidade obtida é continuamente decrescente durante os 30 minutos de teste. Dado que não se regista um incremento de viscosidade, a reação de vulcanização a 80°C e ao fim de 30 minutos é inexistente.	
À temperatura de 90°C verifica-se a mesma situação que a 80°C. A reação de vulcanização a 90°C e ao fim de 30 minutos é também inexistente.	
A 100°C, a curva de viscosidade apresenta uma maior estabilização, contudo, não se verifica um aumento da viscosidade. Por isso, a 100°C e ao fim de 30 minutos, a reação de vulcanização é inexistente.	
No ensaio a 110°C verifica-se um mínimo de viscosidade ao fim de 24 minutos de ensaio. Após o ponto de viscosidade mínima, dá-se um aumento positivo da viscosidade. Portanto, a 110°C e ao fim de 24 minutos, verifica-se o início da reação de vulcanização.	

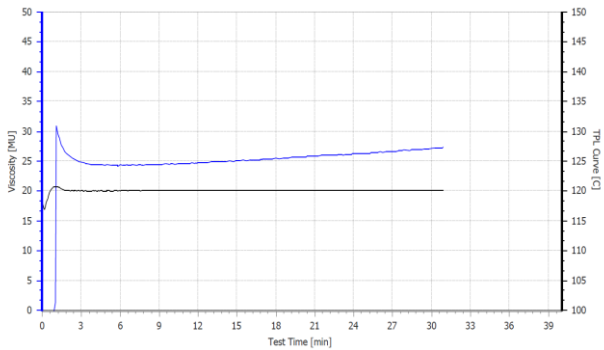
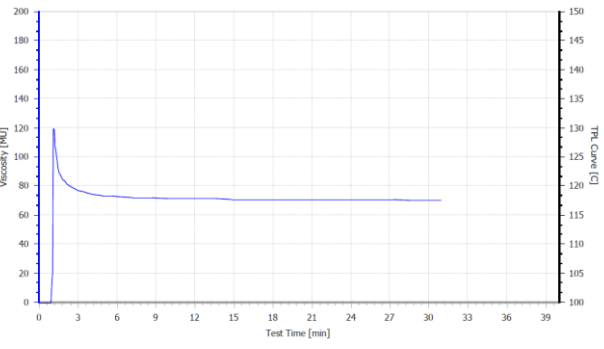
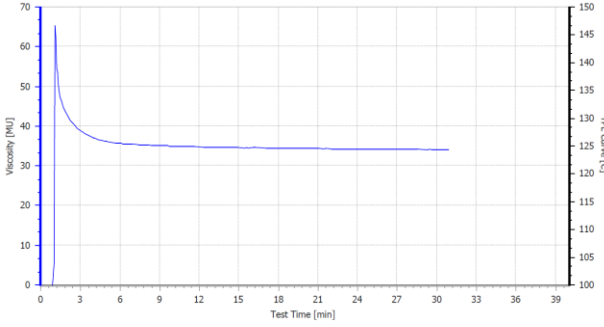
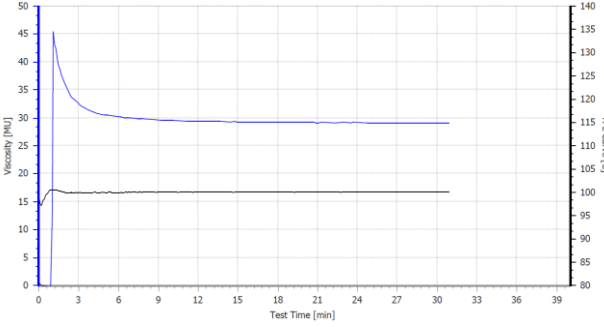
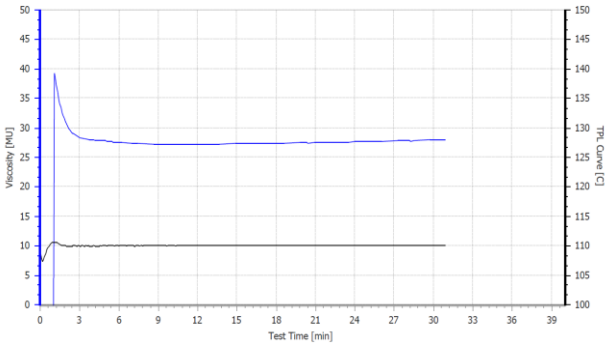
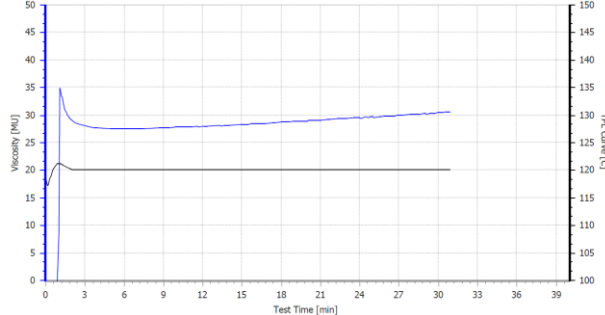
Comentário	Resultado
A 120°C verifica-se um mínimo de viscosidade ao fim de 9 minutos. Após este ponto de viscosidade mínima, ocorre um aumento positivo da viscosidade. Logo, a 120°C e ao fim de 9 minutos, verifica-se o início da reação de vulcanização.	

Tabela 27 - Resultados obtidos com os ensaios de Scorch para as amostras sem passagem no moinho.

Comentário	Resultado
A 80°C, a curva de viscosidade obtida é continuamente decrescente durante os 30 minutos de teste. Dado que não se regista um incremento de viscosidade, a reação de vulcanização a 80°C e ao fim de 30 minutos é inexistente.	
À temperatura de 90°C e ao fim de 30 minutos, reação de vulcanização é também inexistente.	
A 100°C, a curva de viscosidade apresenta uma maior estabilização, contudo, não se verifica um aumento da viscosidade. Por isso, a 100°C e após 30 minutos, a reação de vulcanização é inexistente.	

Comentário	Resultado
No ensaio a 110°C, verifica-se um mínimo de viscosidade ao fim de 20 minutos de ensaio. Após o ponto de viscosidade mínima, dá-se um aumento crescente da viscosidade. Portanto, a 110°C e ao fim de 20 minutos, verifica-se o início da reação de vulcanização.	
A 120°C, observa-se um mínimo de viscosidade ao fim de 9 minutos. Logo, a 120°C e ao fim de 9 minutos, verifica-se o início da reação de vulcanização.	

De acordo com os resultados obtidos, é possível concluir que, para uma duração de 30 minutos, a reação de vulcanização apenas é perceptível para temperaturas de 110°C e 120°C. As diferenças para o composto processado pelo moinho e para o composto não processado pelo moinho não são significativamente grandes, podendo-se assumir que, em termos de pré vulcanização, o processamento no moinho não causou uma alteração significativa. Contudo, dado que o processamento de borracha na *Cap strip* (desde a entrada na tremonha da extrusora até à saída da fieira) demora cerca de 25 minutos (a velocidades de arranque), isto significa que a temperatura de trabalho deverá estar abaixo dos 110°C, para que se evite a ocorrência de vulcanização prematura.

No início de cada ensaio, existe um minuto do ensaio em que não há leitura do valor de viscosidade. Neste intervalo de tempo, o rotor não oscila e tem como objetivo estabilizar a temperatura do ensaio, contudo, a amostra encontra-se no interior do viscosímetro.

A 80°C, o rotor utilizado tinha um diâmetro inferior ao dos restantes ensaios. A temperaturas baixas, o binário registado é relativamente elevado, o que, por vezes, leva à paragem do viscosímetro por atingir o binário máximo permitido. Para evitar esta situação, optou-se por utilizar o rotor de tamanho inferior. Após a análise dos resultados a 80°C e dado que os valores lidos se situavam abaixo do limite máximo do equipamento, trocou-se o rotor pelo rotor de maior dimensão, pois permite obter uma maior precisão nos valores de viscosidade medidos.

5.1.1.2 Medição de viscosidade

No ensaio de medição de viscosidade, a calibração da massa das amostras foi efetuada de forma semelhante à indicada nos ensaios *Scorch*.

Novamente, foi corrigida a massa das amostras para $6 \pm 0,050$ g. A Figura 94 representa os valores das massas iniciais e finais das amostras sem passagem no moinho para os ensaios de medição de viscosidade.

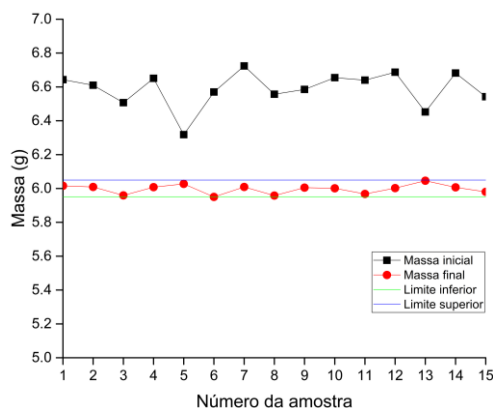


Figura 94 - Massa das amostras sem passagem no moinho para o ensaio de medição de viscosidade.

A Figura 95 demonstra os valores das massas registadas para as amostras com passagem no moinho.

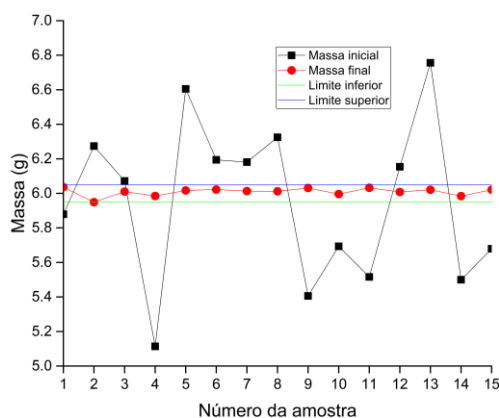


Figura 95 - Massa das amostras com passagem no moinho para o ensaio de medição de viscosidade.

Em algumas amostras, é possível observar uma massa inicial inferior à massa final. Para essas amostras, foi acrescentada uma porção de composto de borracha que foi previamente retirada da amostra principal.

Após a obtenção dos valores pretendidos, os dados foram analisados e constatou-se uma diferença consistente entre as amostras que passaram no moinho e as amostras que não passaram no moinho, no que diz respeito à viscosidade dinâmica (Figura 96, Figura 97, Figura 98, Figura 99 e Figura 100).

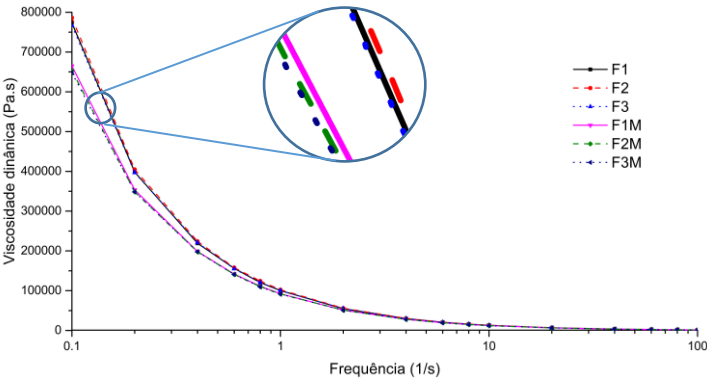


Figura 96 - Viscosidade dinâmica a 80°C.

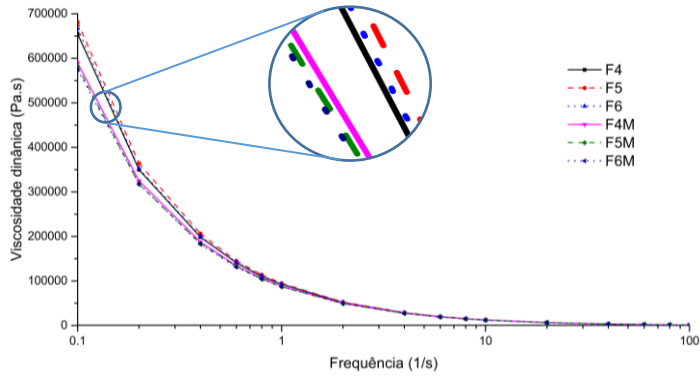


Figura 97 - Viscosidade dinâmica a 90°C.

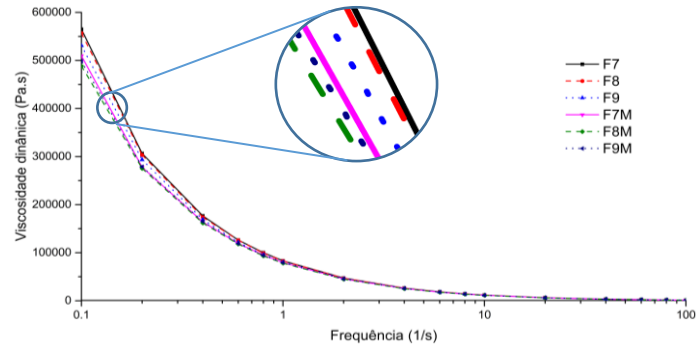


Figura 98 - Viscosidade dinâmica a 100°C.

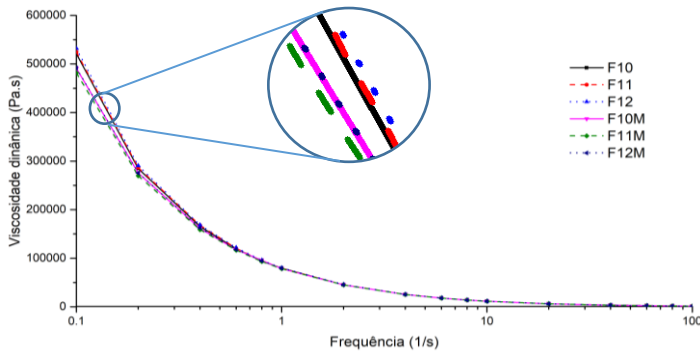


Figura 99 - Viscosidade dinâmica a 110°C.

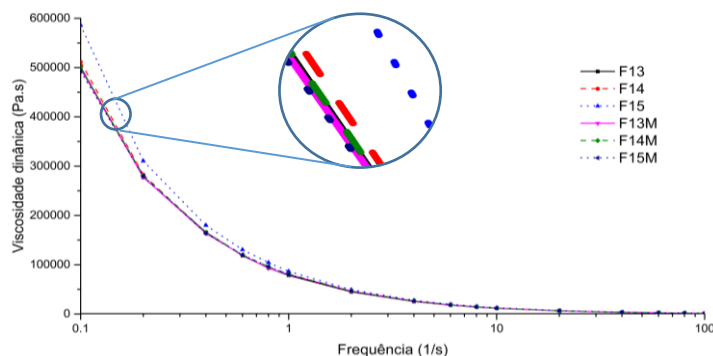


Figura 100 - Viscosidade dinâmica a 120°C.

Conforme a temperatura vai aumentando, a diferença entre a viscosidade dinâmica dos dois tipos de amostra tende a ser nula. Esta diferença é mais visível para frequências inferiores a 1 s^{-1} . A 120°C, a amostra F15 demonstrou um comportamento anormal quando comparada com as outras amostras. Isso poderá ter surgido devido à presença de impurezas, na amostra ou pela presença concentrada de um determinado elemento constituinte do composto FMS-B00163. Os resultados completos obtidos nos ensaios de medição de viscosidade estão situados no ANEXO 8 – Relatórios de ensaios RPA – Composto sem passagem no moinho, e ANEXO 9 – Relatórios de ensaios RPA – Composto com passagem no moinho.

Com os valores obtidos, é possível preencher a folha de cálculo Microsoft Excel® fornecida pela Autodesk®. Para a obtenção dos coeficientes A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 e A_6 da equação (37) (*Second order polymer equation*), é necessário colocar os dados reológicos (Figura 101) obtidos e executar a ferramenta *Solver* do Microsoft Excel®. Os dados de viscosidade dinâmica colocados na folha de cálculo são a média das viscosidades dinâmicas das três amostras para cada temperatura. Dado que se verificou alguma diferença entre as viscosidades dinâmicas entre as amostras processadas pelo moinho e as amostras não processadas pelo moinho, optou-se por utilizar a viscosidade dinâmica referente às amostras que foram processadas pelo moinho. Esta opção visa aproximar a análise numérica à realidade, visto que a análise numérica se focaliza no cabeçote da extrusora, excluindo a bomba de engrenagens e a extrusora. Desta forma, as amostras que foram processadas pelo moinho, de uma certa forma, simulam o processo de homogeneização e de aquecimento que ocorre na extrusora e na bomba de engrenagens. Com isto, os dados obtidos para as amostras processadas pelo moinho deverão ser bastante próximos daqueles que se poderão verificar no composto de borracha à entrada do cabeçote. A equação polimérica de segunda ordem é [89]:

$$\ln(\mu) = A_1 + A_2 \ln(\gamma) + A_3 T + A_4 [\ln(\gamma)]^2 + A_5 [\ln(\gamma)] T + A_6 T^2 \quad (37)$$

$\ln(\mu) = A_1 + A_2 \ln(\dot{\gamma}) + A_3 T + A_4 [\ln(\dot{\gamma})]^2 + A_5 [\ln(\dot{\gamma})]T + A_6 T^2$

Regression Coefficients		Rheology Data			Y		X				Check	
		Shear Viscosity Pa*s	Temperature C	Shear Rate 1/s	ln(viscosity)	ln(shear)	Temperature C	ln(shear)^2	ln(shear)*T	T^2	Check	Error
A1	9.878516511	655488	80	0.1	13.39	-2.30	80	5.30	-184.21	6400	15.5842	16%
A2	-0.820389292	350081	80	0.2	12.77	-1.61	80	2.59	-128.76	6400	15.123	18%
A3	0.100482306	198010	80	0.4	12.20	-0.92	80	0.84	-73.30	6400	14.6456	20%
A4	-0.016826892	141144	80	0.6	11.86	-0.51	80	0.26	-40.87	6400	14.3589	21%
A5	0.001115326	110326	80	0.8	11.61	-0.22	80	0.05	-17.85	6400	14.1521	22%
A6	-0.000613664	91781	80	1	11.43	0.00	80	0.00	0.00	6400	13.9898	22%
		51033	80	2	10.84	0.69	80	0.48	55.45	6400	13.4749	24%
		27922	80	4	10.24	1.39	80	1.92	110.90	6400	12.9439	26%
		19400	80	6	9.87	1.79	80	3.21	143.34	6400	12.6257	28%
		14968	80	8	9.61	2.08	80	4.32	166.36	6400	12.3966	29%
		12212	80	10	9.41	2.30	80	5.30	184.21	6400	12.217	30%
		6473	80	20	8.78	3.00	80	8.97	239.66	6400	11.6484	33%
		3343	80	40	8.11	3.69	80	13.61	295.11	6400	11.0636	36%
		2272	80	60	7.73	4.09	80	16.76	327.55	6400	10.7141	39%

Simulation CFD 2nd Order Polymer Coefficients

Figura 101 - Folha de cálculo para determinação dos coeficientes da equação polimérica de segunda ordem.

Com a ferramenta *Solver*, define-se como objetivo a coluna do erro, atribuindo-lhe o valor zero. De seguida, selecionam-se os seis coeficientes como sendo os valores a alterar. Desta forma, a ferramenta obtém os valores dos coeficientes da equação polimérica de segunda ordem, e de forma a que o erro entre a viscosidade real e teórica seja o mais próximo de zero.

Após várias iterações, até se atingir um patamar de convergência, os valores obtidos são os representados na Tabela 28.

Tabela 28 - Valores dos coeficientes para a equação polimérica de segunda ordem.

Coefficientes	Valor
A_1	+15,69218073
A_2	-0,920446949
A_3	-0,082181351
A_4	-0,016461909
A_5	+0,001074902
A_6	+0,0003860644

Os erros entre os valores obtidos experimentalmente e os valores fornecidos pela equação polimérica de segunda ordem não ultrapassam os 2,0%. Com os dados obtidos, tornou-se possível caracterizar a viscosidade dinâmica do fluido para a análise numérica.

Conforme referido no capítulo do Enquadramento Teórico, existem vários modelos clássicos que definem a viscosidade. Neste projeto, a escolha recaiu sobre um modelo próprio desenvolvido pela Autodesk®. De forma a enquadrar e comparar os modelos clássicos com o modelo utilizado neste projeto, foi elaborada uma folha de cálculo para a obtenção dos coeficientes para o modelo *Carreau*, que segue a equação (16). Os coeficientes foram calculados de forma semelhante aos determinados para a equação polimérica de segunda ordem, i.e., com recurso à ferramenta *Solver* do *software* Microsoft® Excel.

A Tabela 29 resume os coeficientes obtidos para a utilização do modelo *Carreau* em análise numérica.

Tabela 29 - Coeficientes para o modelo *Carreau*.

Coeficientes \ Temperatura	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C
η_{∞}	0	0	0	0	0
η_0	1860329,4	1411642,35	1130525,3	1143580,9	1113068,4
n	0,2008024	0,21631525	0,22480418	0,2300093	0,227264
λ	19.361768	16,9667146	15,99309	16,530981	14,082472

Com base na Tabela 28 e Tabela 29, é possível concluir que a equação polimérica de segunda ordem permite definir a viscosidade para uma dada gama de taxas de corte e, ao mesmo tempo, permite ainda definir a viscosidade a várias temperaturas. Por outro lado, a utilização de modelos clássicos, como o modelo *Carreau*, apenas permite definir a viscosidade em função da taxa de corte e para uma temperatura específica. É possível constatar isto através da comparação de ambas as equações (equações (16) e (37)), em que a equação polimérica de segunda ordem assume a viscosidade em função da taxa de corte e da temperatura, enquanto a equação de *Carreau* apenas relaciona a viscosidade em função da taxa de corte.

Com a utilização da equação polimérica de segunda ordem, esperou-se obter resultados mais precisos em relação às velocidades de escoamento, à viscosidade em escoamento e das tensões de corte nas simulações de análise numérica. A precisão com que é feita a definição da viscosidade é extremamente importante, para que a magnitude da velocidade global seja o mais próxima possível da realidade, sendo este um dado que será importante na análise numérica, conforme se verificará no próximo subcapítulo.

5.1.2 Análise numérica

5.1.2.1 Cenário 1 – Cabeçote com resistências de aquecimento

Para o cenário 1, o número de elementos e nós obtidos são os representados na Tabela 30.

Tabela 30 - Número de elementos e nós para o cenário 1.

Material	Elementos	Nós
Fluido	1585567	508473
Sólidos	2666890	453408
Total	4252457	961881

É possível observar na Tabela 30 que o número de nós pertencentes a materiais fluidos é superior ao número de nós pertencentes a materiais sólidos. Tal facto é verificado devido à análise que o *software* executa durante a definição automática da malha. O *software*, deteta automaticamente as zonas onde é expectável observar mudanças de gradientes, e procede ao refinamento dessas zonas. Dado que existem múltiplas condições fronteira aplicadas ao fluido (FMS-B00163), o *software* aloca um maior número de nós para esse volume do domínio de controlo. De notar ainda que o número de nós é significativamente inferior ao número de elementos, uma vez que vários elementos podem partilhar os mesmos nós entre si.

Relativamente ao escoamento em análise, verificou-se que o cálculo analítico do número de Reynolds, efetuado antes da execução do cálculo numérico, é cerca de 20 vezes inferior ao

número de Reynolds obtido numericamente, uma vez que no cálculo analítico se considera uma velocidade média e uma viscosidade dinâmica diferente (Tabela 31). Dadas as tensões de corte impostas nas condições de escoamento a que o composto de borracha está sujeito, fez-se uma aproximação optando por escolher uma viscosidade dinâmica acima da viscosidade dinâmica calculada pelo *software* CFD.

Tabela 31 - Números de Reynolds obtidos para o cenário 1.

Número de Reynolds	
Cálculo analítico	0,00102
Cálculo numérico	0,02098

No instante de tempo de 600 segundos (Figura 74 – “*Time steps to run*”), obteve-se uma distribuição térmica no domínio de controlo, com maior intensidade no cabeçote e com menor intensidade para a estrutura de suporte do cabeçote, conforme o esperado, visto que a principal fonte de geração de calor se situa no cabeçote (Figura 102).

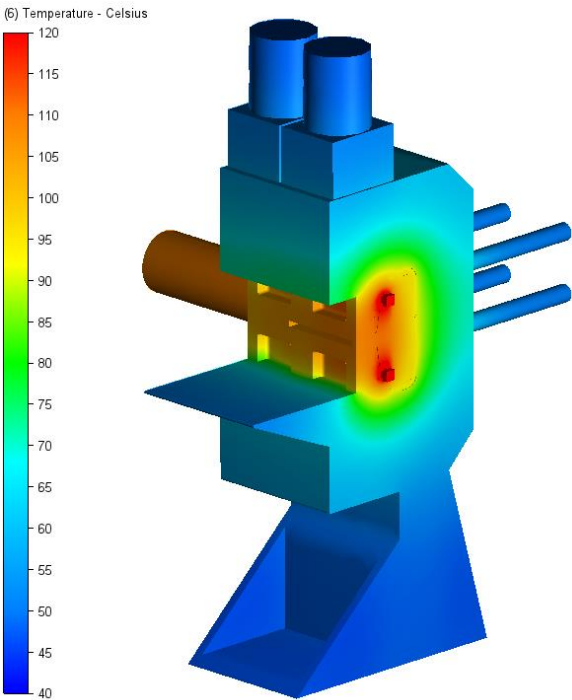


Figura 102 - Gradiente de temperatura para o cenário 1 com refinamento de malha.

Analisando o gradiente de temperatura através de planos, é possível compreender com maior detalhe a distribuição da energia térmica no interior do cabeçote. Traçando um plano imediatamente à esquerda (Figura 103 - a) do plano onde ocorre o contacto entre ambas as partes (parte móvel e fixa) do cabeçote e à direita (Figura 103 - b), é possível verificar que a distribuição térmica é completamente distinta.

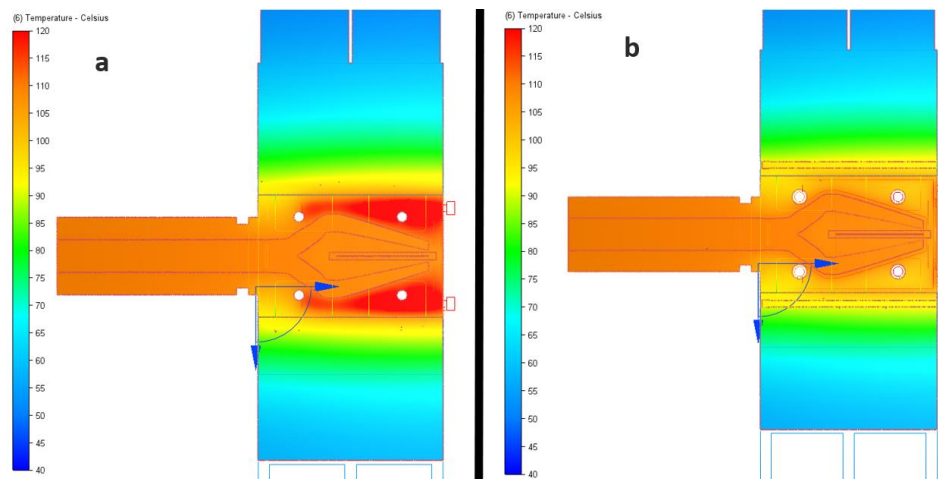


Figura 103 - Vista em corte (a) à esquerda e (b) à direita do plano de contacto entre ambas as partes do cabeçote.

Do lado esquerdo (Figura 103- a) observa-se uma forte geração de calor devido à presença das resistências de aquecimento que produzem uma potência combinada de 3600 W e que geram temperaturas elevadas em torno do canal de escoamento de composto de borracha. Já do lado direito (Figura 103 – b) a distribuição térmica é mais homogênea, não se observando temperaturas acima dos 115°C.

A principal causa relativa à distribuição térmica entre a parte fixa e a parte móvel do cabeçote está diretamente relacionada com o facto de o contacto entre ambas as partes possuir uma área reduzida. A empresa que desenvolveu a *Cap strip* optou por colocar uma saliência com 10 mm de largura (Figura 37) em torno das arestas no interior do cabeçote, para que, com o fecho do mesmo, existisse uma menor área e, consequentemente, uma maior pressão de contacto. Efetivamente, esta solução é benéfica para garantir a estanquicidade do canal de escoamento de composto de borracha. Por outro lado, esta solução gera um vazio que é preenchido com ar à pressão atmosférica e que acaba por atuar como um isolante térmico (Figura 104). Logo, a transferência de calor entre ambas as partes do cabeçote é bastante reduzida, devido ao facto de existir uma superfície de contacto reduzida.



Figura 104 - Vista em corte onde se pode observar a diferente distribuição térmica entre a parte fixa (à esquerda) e parte móvel (à direita) do cabeçote.

Um dos fatores mais importantes a retirar da análise térmica é que o composto de borracha está sujeito a temperaturas acima de 110°C, principalmente na região de fronteira entre fluido-sólido. Conforme analisado nos ensaios laboratoriais, a 110°C o composto revela um período de tempo relativamente curto para que se inicie o processo de vulcanização.

Analisando o documento de análise da simulação fornecido pelo *software*, verificou-se que a temperatura média do volume de controlo é de 102,75°C, com um desvio padrão de 14,87°C.

Utilizando a ferramenta *ISO volumes*, é possível isolar o volume do domínio de controlo sujeito a temperaturas superiores e iguais a 110°C. Esse volume resultante é demonstrado pela Figura 105.

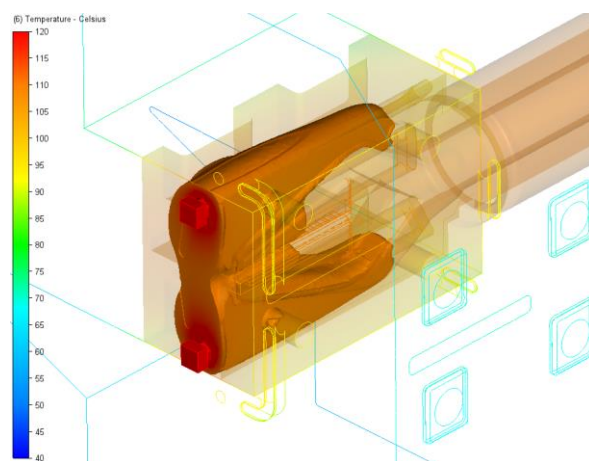


Figura 105 - Volume correspondente a temperaturas superiores ou iguais a 110°C.

Relativamente ao escoamento do composto de borracha, observou-se essencialmente a magnitude da velocidade (Figura 106), a viscosidade dinâmica (Figura 107) e magnitude das tensões de corte (Figura 108).

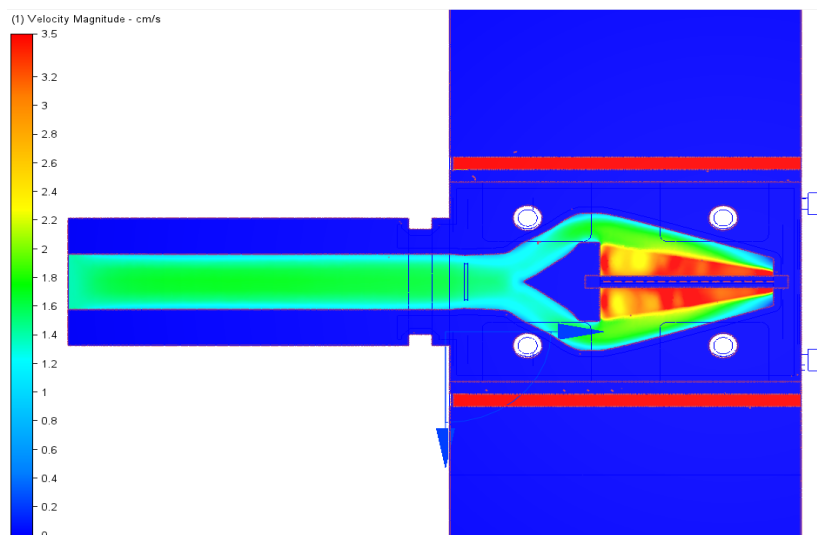


Figura 106 - Magnitude da velocidade para o cenário 1.

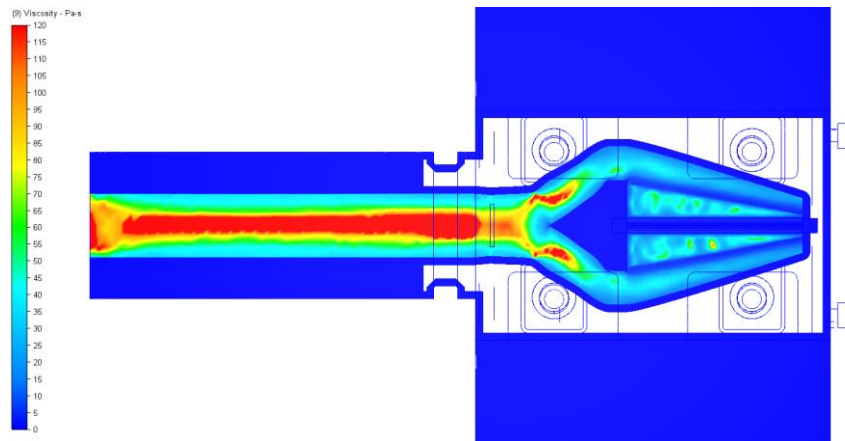


Figura 107 - Viscosidade dinâmica para o cenário 1.

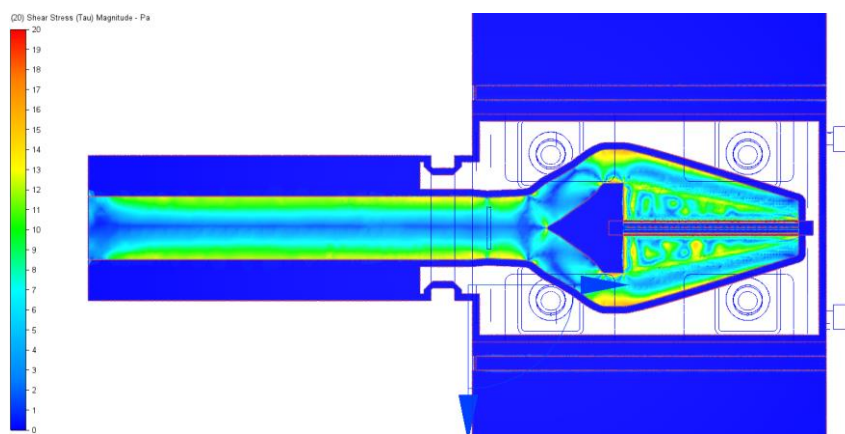


Figura 108 - Magnitude das tensões de corte para o cenário 1.

De acordo com a revisão bibliográfica efetuada, seria de esperar que as tensões de corte fossem de maior intensidade nas paredes dos canais de escoamento, devido ao contacto entre fluido-sólido. Em contraste, a viscosidade dinâmica teria de ser menor junto às paredes dos canais de escoamento, devido às tensões de corte impostas ao fluido, que, devido ao facto de ser um fluido não newtoniano, provocam uma diminuição da viscosidade dinâmica (Figura 8). Tais constatações foram observadas com a análise numérica obtida, onde a viscosidade dinâmica é menor junto às paredes do canal de escoamento, e as tensões de corte são superiores.

Foi ainda utilizada mais uma ferramenta do *software*, a ferramenta *traces*, que permite fazer o rastreamento de partículas desde a entrada de fluido até à sua saída. Aplicando essa ferramenta na entrada do escoamento, obteve-se 673 traços, i.e., obteve-se o trajeto de 673 partículas entre o início e o fim do escoamento de composto de borracha (Figura 109).

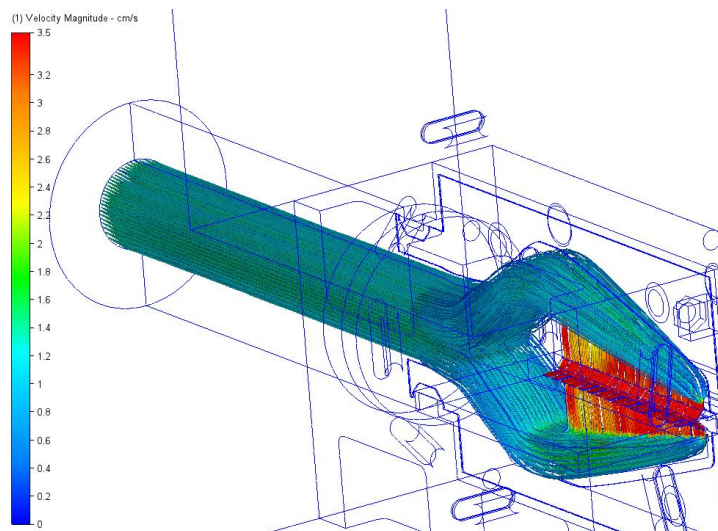


Figura 109 - Rastreamento de partículas para o cenário 1.

Analisando os tempos de residência (tempo que uma partícula de fluido demora desde o início até ao fim do escoamento), constatou-se que o maior tempo de residência corresponde a 3 minutos e 15 segundos. O trajeto que traduz o movimento de maior duração está representado na Figura 110 por uma linha de cor preta.

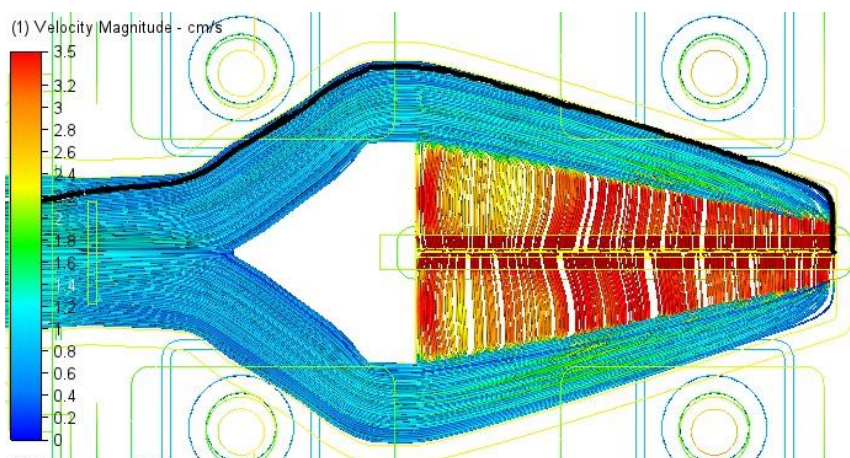


Figura 110 - Partícula com maior tempo de residência para o cenário 1.

Uma forma de analisar o erro existente relativo ao cálculo numérico passa por analisar os resíduos (*Resid In*). Os resíduos podem ser assumidos como uma medida que verifica se um vetor solução (X) satisfaz uma equação matricial. Conforme abordado na revisão bibliográfica, o objetivo passa por resolver um sistema de equações matriciais do tipo,

$$AX = b \quad (38)$$

onde o vetor resíduo, r , é definido como,

$$r = b - AX \quad (39)$$

e para analisar os dados de uma forma mais simples, evitando a análise do vetor resíduo, opta-se pela utilização da norma euclidiana que permite caracterizar o vetor resíduo através de um valor singular, respeitando a seguinte relação:

$$\|r\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^j r_i^2} \quad (40)$$

onde j representa o número de termos do vetor resíduo e r os termos individuais ao quadrado do vetor resíduo. O número de termos é igual ao número de nós.

Se um modelo contiver 1 milhão de nós, com um valor resíduo de 100, significa que o erro médio em cada nó é de 0,1. Caso a propriedade cujo erro corresponde a 0,1 seja a temperatura, isto significa que o erro médio em cada nó é de 0,1°C, o que satisfaz a equação da conservação de energia (equação (68)). Os valores residuais obtidos (Figura 111) e respetivos erros médios para a iteração 600, estão descritos na Tabela 32.

Tabela 32 - Resid In para o cenário 1.

Propriedade	Resíduo	Erro médio
Temperatura	55,019	0,056°C
Velocidade- direção X	835,43	0,852 mm/s
Velocidade- direção Y	243,075	0,249 mm/s
Velocidade- direção Z	259,701	0,265 mm/s

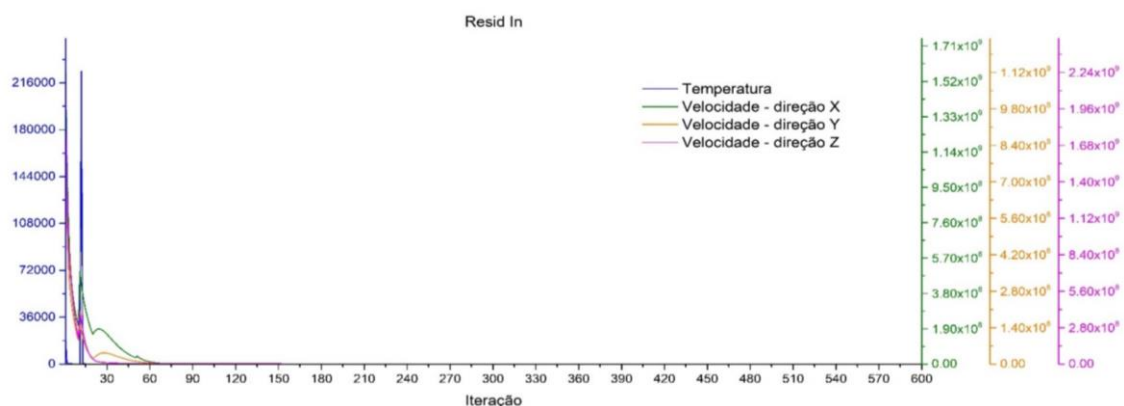


Figura 111 - Valores dos resíduos ponderados obtidos para o cenário 1.

O tempo de cálculo numérico para esta simulação foi de 25 horas e 47 minutos, com um volume de dados de 340,4 GB.

Com os dados obtidos, é possível concluir que os valores dos resíduos e respetivos erros médios são bastante baixos, o que indica que a análise numérica satisfaz as equações governantes.

5.1.2.1.1 Refinamento da malha

Para verificar se a malha inicial se encontra suficientemente refinada, é recomendado pela Autodesk® a clonagem do primeiro cenário, incluindo a malha e, posteriormente, a redução do fator tamanho de malha de 1 para 0,7. Seguindo esse método, a malha refinada contém o número de nós e elementos representados na Tabela 33.

Tabela 33 - Número de nós e elementos para a malha refinada do cenário 1.

Material	Elementos	Nós
Fluido	2842530	889137
Sólidos	4832785	845772
Total	7675315	1734909

O número de Reynolds obtido na entrada de fluxo de composto de borracha foi ligeiramente superior quando comparado com o valor obtido com a malha não refinada, contudo, com uma diferença inferior a 5% (Tabela 34).

Tabela 34 - Comparação do número de Reynolds para o cenário 1 pelos vários métodos.

Número de Reynolds		Diferença
Cálculo numérico	0,02098	2,82%
Cálculo numérico (malha refinada)	0,02158	

Para verificar novamente a diferença de valores, foram selecionados três pontos da malha que pertencem aos mesmos locais de ambas as simulações. Isto permite retirar os resultados desses pontos sem que exista variância da sua magnitude devido a uma localização aleatória. A Tabela 35 resume os resultados de temperatura obtidos para esses nós em ambas as simulações.

Tabela 35 - Resultados de temperatura obtidos para ambas as malhas do cenário 1 e respectivas diferenças.

Coordenadas (X, Y, Z)	Fator tamanho de malha = 1	Fator tamanho de malha = 0,7	Diferença
(0, 100, 176)	109,692°C	109,999°C	0,279 %
(5, 120, 176)	105,971°C	105,792°C	0,169 %
(0, 110, 176)	94,6835°C	94,1975°C	0,515 %

Com base nos dados obtidos na Tabela 35, é possível concluir que a malha inicial (malha com o fator tamanho de malha igual a 1) está suficientemente refinada para que os resultados não sejam dependentes do tamanho de malha. Quanto mais refinada for a malha, até um determinado grau, melhor serão os resultados obtidos. Contudo, é necessário obter um compromisso entre resultados e tempo de computação. Uma malha mais refinada, para um mesmo domínio de controle, exige sempre um maior tempo de computação global para a análise em questão.

O tempo de cálculo numérico para esta simulação foi de 35 horas e 23 minutos, com um volume total de dados de 620,1 GB.

5.1.2.2 Cenário 2 – Cabeçote com circuito de água

Relativamente ao cenário 2, e utilizando a malha com o fator tamanho de malha igual a 1, obteve-se uma malha de semelhante dimensão em termos de número de nós e elementos (Tabela 36), quando comparada com a malha do cenário 1 (Tabela 30), devido às pequenas diferenças no domínio de controle.

Tabela 36 - Número de nós e elementos presentes na malha do cenário 2.

Material	Elementos	Nós
Fluido	2842530	702172
Sólidos	4832785	831408
Total	4277618	927239

O número de Reynolds relativo à secção de entrada de composto de borracha é idêntico ao observado no cenário 1 (Tabela 37). Tal facto corresponde à não alteração das condições fronteira na secção de entrada do escoamento de composto de borracha.

Tabela 37 - Número de Reynolds relativo ao cenário 2.

Número de Reynolds	
Cálculo analítico	0,00102
Cálculo numérico	0,0247781

Observando os resultados referentes ao instante de tempo de 600 segundos, é possível concluir que o sistema de regulação de temperatura do cabeçote evita a concentração de pontos quentes, em contraste com o sistema de duas resistências de aquecimento. É possível constatar ainda que no volume do cabeçote, as temperaturas registadas não ultrapassam os 110°C (Figura 112).

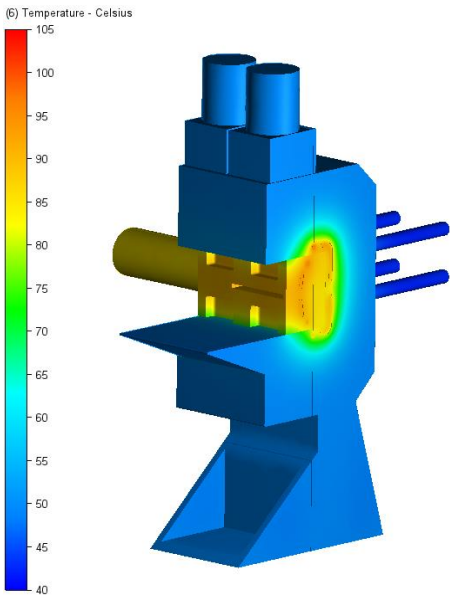


Figura 112 - Gradiente de temperatura no domínio de controlo global para o cenário 2.

Comparando as distribuição da energia térmica entre ambas as partes do cabeçote, é possível constatar que, neste caso, essa distribuição é muito mais homogénea (Figura 113) do que no cenário 1 (Figura 104). Isto deve-se essencialmente à menor geração de calor que existe no cabeçote. No cenário 1, a presença de resistências de aquecimento provocava um gradiente de temperatura superior na parte móvel do cabeçote e, devido à resistência de contacto entre ambas as partes do cabeçote, esse gradiente acabava por não se dissipar com tanta intensidade

para a parte fixa do cabeçote. Neste cenário, a presença de água mantém tanto a parte móvel como a parte fixa do cabeçote em torno dos 90°C, assumindo assim uma distribuição térmica mais uniforme.

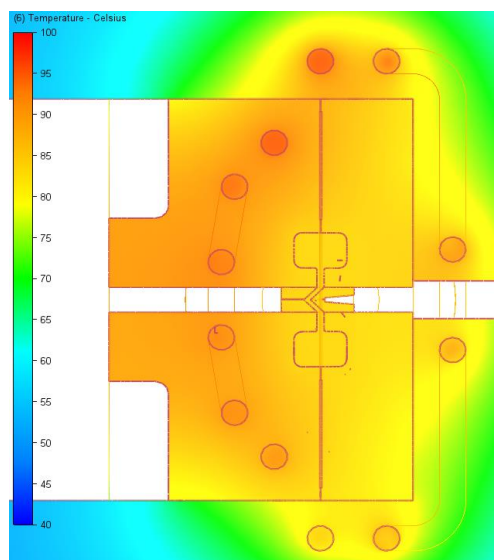


Figura 113 - Vista em corte representativa da distribuição térmica entre a parte fixa (à esquerda) e parte móvel (à direita) do cabeçote.

Em consequência do registo de temperaturas inferiores relativamente ao cenário 1, é possível prever também uma variação em termos de viscosidade dinâmica, velocidade de escoamento e tensões de corte, uma vez que a temperatura tem influência sobre estes parâmetros. Diminuindo a temperatura, observa-se um ligeiro acréscimo da viscosidade dinâmica (Figura 114) e uma redução da velocidade de escoamento (Figura 115) em relação ao cenário 1.

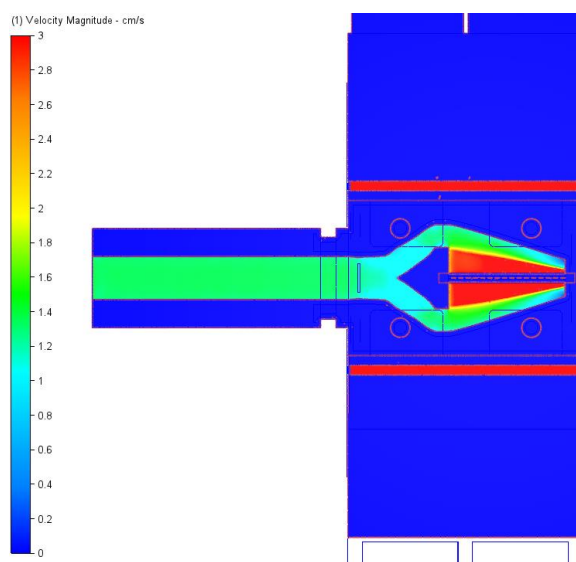


Figura 114 - Magnitude da velocidade para o cenário 2.

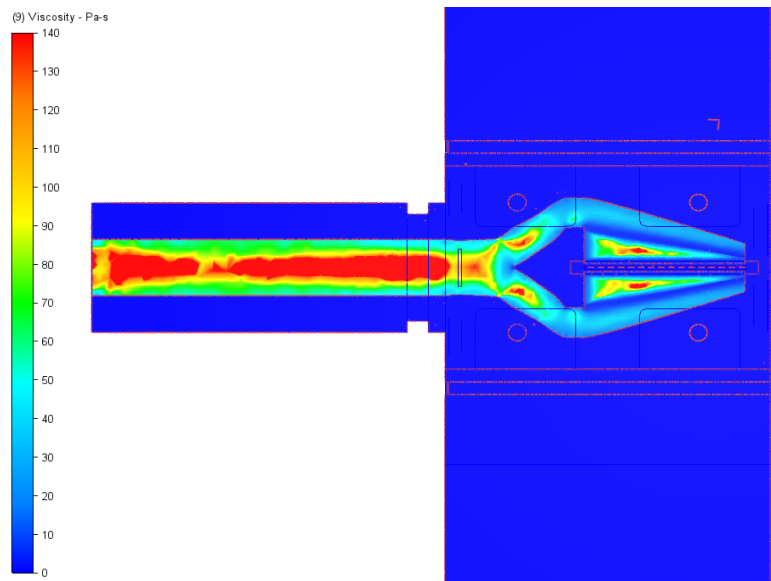


Figura 115 - Viscosidade dinâmica para o cenário 2.

Associada à viscosidade dinâmica, estão as tensões de corte (Figura 116), que demonstram ser bastante idênticas às tensões de corte observadas no cenário 1 (Figura 108). Possivelmente, o parâmetro que gera um maior impacto sobre a viscosidade dinâmica será a temperatura, visto que em termos de tensões de corte, as variações em relação ao cenário 1 são praticamente nulas.

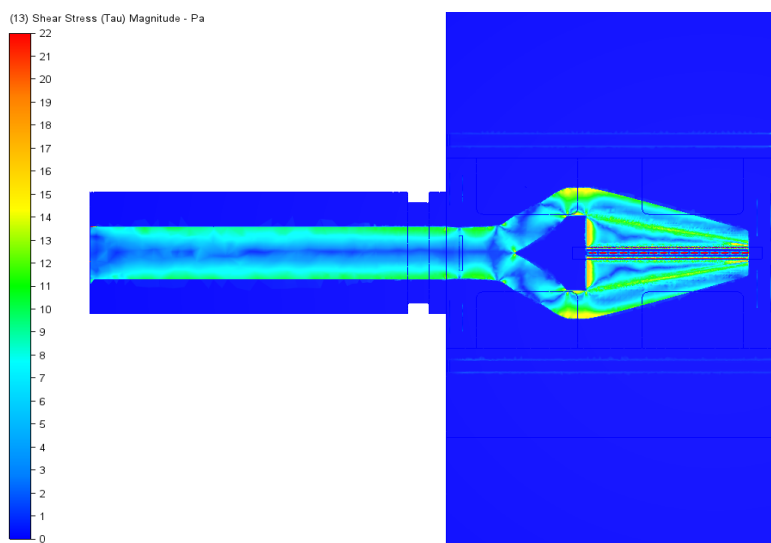


Figura 116 - Magnitude das tensões de corte para o cenário 2.

Recorrendo novamente à ferramenta *traces*, é possível determinar qual a partícula que possui um maior tempo de residência no interior de cabeçote. De entre as 981 partículas rastreadas, a partícula que demonstrou um maior tempo de residência foi a partícula 453, com um tempo de 3 minutos e 43 segundos.

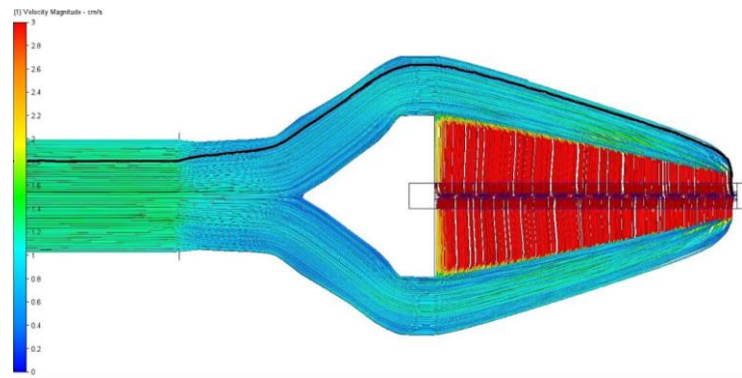


Figura 117 - Trajeto da partícula com maior tempo de residência para o cenário 2.

De forma a verificar a precisão obtida no cálculo numérico, verificaram-se novamente os resíduos obtidos (Figura 118) para a temperatura e a velocidade nos três eixos cartesianos, assim como os respetivos erros médios (Tabela 38). Os resíduos correspondem à última iteração da análise, i.e., à 600ª iteração.

Tabela 38 - *Resid In* para o cenário 2.

Propriedade	Resíduo	Erro médio
Temperatura	2,175	0,00176°C
Velocidade- direção X	16,671	0,0135 mm/s
Velocidade- direção Y	28,318	0,0229 mm/s
Velocidade- direção Z	51,821	0,0418 mm/s

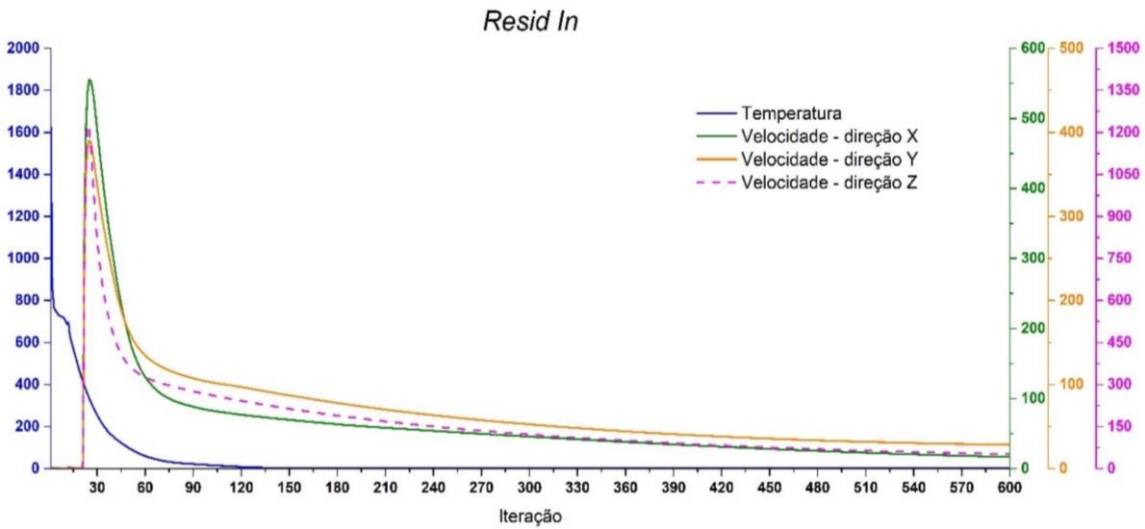


Figura 118 - Valores de *Resid In* para cada iteração.

Sendo assim, os erros médios obtidos para as propriedades analisadas, são suficientemente reduzidos, concluindo assim que a análise numérica realizada tem uma elevada precisão na solução das equações governantes.

O tempo de cálculo numérico para esta simulação foi de 23 horas e 55 minutos, com um volume de dados de 312,7 GB.

5.1.2.2.1 Refinamento da malha

Para verificar se a malha inicial se encontra suficientemente refinada, é recomendado pela Autodesk® a clonagem do cenário inicial, incluindo a malha e, posteriormente, a redução do fator tamanho de malha de 1 para 0,7. Seguindo esse método, a malha refinada contém o número de nós e elementos representados na Tabela 39 que são, logicamente, superiores ao número de nós e elementos com a malha de fator tamanho de malha igual a 1.

Tabela 39 - Número de nós e elementos para a malha refinada do cenário 2.

Material	Elementos	Nós
Fluido	2388695	736398
Sólidos	4779527	840606
Total	7168222	1577004

O número de Reynolds obtido na entrada de fluxo de composto de borracha foi ligeiramente superior, quando comparado com o valor obtido com a malha não refinada, contudo, com uma diferença inferior a 5% (Tabela 40).

Tabela 40 - Comparação do número de Reynolds para o cenário 2 pelos vários métodos.

Número de Reynolds	Diferença
Cálculo numérico	0,0247781
Cálculo numérico (malha refinada)	0,0235847

Para verificar novamente a diferença de valores, foram selecionados três pontos da malha que pertencem aos mesmos locais de ambas as simulações com os diferentes tamanhos de malha (Tabela 41).

Tabela 41 - Resultados de temperatura obtidos para ambas as malhas do cenário 2 e respectivas diferenças.

Coordenadas (X, Y, Z)	Fator tamanho de malha = 1	Fator tamanho de malha = 0,7	Diferença
(0, 100, 175)	99,355°C	99,049°C	0,308 %
(5, 120, 176)	96,853°C	96,698°C	0,160 %
(5, 110, 180)	109,951°C	109,998°C	0,043 %

Com base na Tabela 41, é possível concluir que a malha inicial (malha com o fator tamanho de malha igual a 1) está suficientemente refinada para que os resultados não sejam dependentes do tamanho de malha, atingindo-se assim a convergência de resultados. Logo, a utilização da malha inicial, é suficiente para a análise de resultados.

O tempo de cálculo numérico para esta simulação foi de 31 horas e 47 minutos, com um volume total de dados de 540,8 GB.

5.1.2.3 Cenário 3 – Componente do cabeçote com resistências de aquecimento

O cenário 3, que contém apenas as resistências de aquecimento e a parte móvel do cabeçote, possui uma malha com menor número de elementos e nós, quando comparada com o cenário 1 e 2, devido à redução do domínio de controlo (Tabela 42).

Tabela 42 - Número de nós e elementos para o cenário 3.

Material	Elementos	Nós
Fluido	0	0
Sólidos	978195	204503
Total	978195	204503

Neste cenário, não existe qualquer fluido e, portanto, o número de nós e elementos correspondentes a volumes de fluido é nulo, assim como o número de Reynolds que é não aplicável.

Conforme expectável, o gradiente de temperatura é elevado na região de geração de calor, i.e., em torno das resistências de aquecimento. Isso traduz-se no aumento da temperatura nas superfícies do canal de escoamento de composto, principalmente, nas superfícies perto das resistências de aquecimento. Dado que as resistências de aquecimento possuem apenas 360 mm de comprimento, as mesmas fornecem pouca energia térmica na zona da entrada de composto de borracha, uma vez que o cabeçote possui 485 mm de comprimento. Portanto, existem cerca de 125 mm de comprimento de cabeçote em que a energia térmica recebida é mais reduzida, quando comparada com o restante volume (Figura 119).

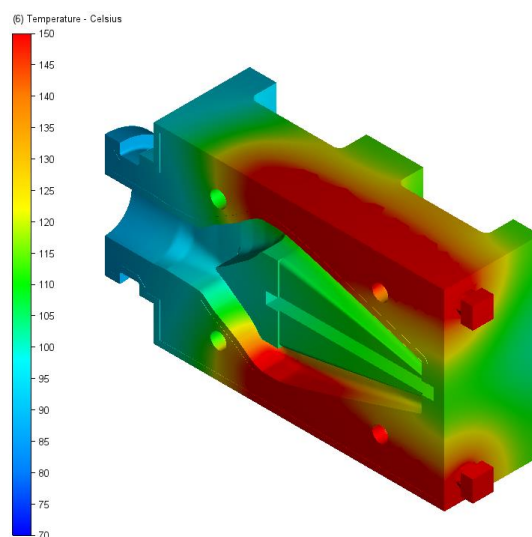


Figura 119 - Perfil de temperatura para o cenário 3.

Isolando o volume correspondente a temperaturas superiores a 110°C, obtém-se 53,49% do volume total do domínio de controlo global (Figura 120). Isto significa que mais de metade do volume de controlo está sujeito a temperaturas acima de 110°C numa situação em que as resistências de aquecimento se encontram em funcionamento por um período de 10 minutos.

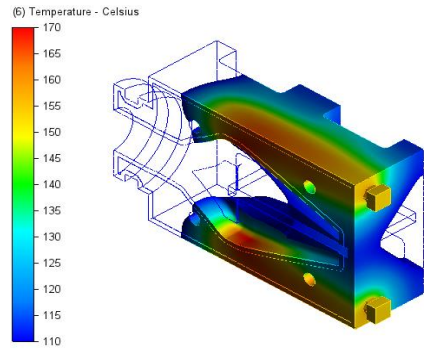


Figura 120 - Volume correspondente a temperaturas superiores a 110°C para o cenário 3.

Dado que neste cenário não existe escoamento de fluidos, a análise dos resíduos ponderados inclui apenas os resultados de temperatura. As restantes variáveis são nulas, i.e., velocidades nas três direções cartesianas, uma vez que as condições fronteira relativas a fluxos de fluidos são inexistentes.

O valor do resíduo para a temperatura na 600ª iteração é de 16,8853 (Figura 121). Tendo em conta que a malha construída possui 204503 nós, isto significa que o erro médio da temperatura em cada nó é de 3,73°C.

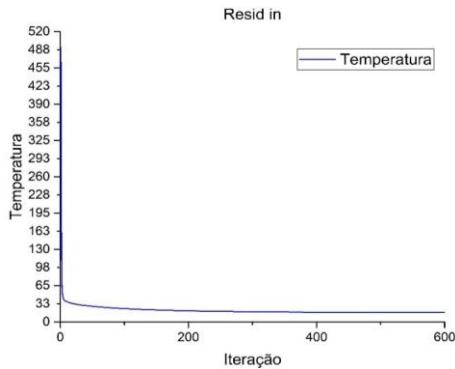


Figura 121 - Valores de resíduos ponderados (*Resid In*) para o cenário 3.

O tempo de cálculo para esta simulação foi de 17 horas e 47 minutos, resultando num total de 61,4 GB.

5.1.2.3.1 Refinamento da malha

Para verificar se a malha inicial se encontra suficientemente refinada, o cenário 3 foi clonado incluindo a própria malha e, posteriormente, ajustado o fator tamanho de malha de 1 para 0,7. Os valores e respetivas diferenças obtidas para três pontos aleatórios do domínio de controlo estão descritos na Tabela 43.

Tabela 43 - Resultados e respetivas diferenças para as malhas com diferentes tamanhos do cenário 3.

Coordenadas (X, Y, Z)	Fator tamanho de malha = 1	Fator tamanho de malha = 0,7	Diferença
(10, 35, 40)	101,615°C	101,537°C	0,077 %
(-10, 47, 45)	153,267°C	157,726°C	2,868 %
(0, 40, 50)	112,379°C	112,383°C	0,004 %

A redução do fator tamanho de malha resultou numa malha com um número de elementos e nós bastante superior quando comparada com a malha inicial, de fator tamanho de malha de 1 (Tabela 44).

Tabela 44 - Número de elementos e nós para a malha refinada do cenário 3.

Material	Elementos	Nós
Fluido	2842530	889137
Sólidos	3311845	681504
Total	3311845	681504

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que a malha inicial (malha com fator tamanho de malha igual a 1) se encontra suficientemente refinada, tendo em consideração que as diferenças obtidas entre os vários resultados (Tabela 43), se situam abaixo dos 5 %. O tempo de cálculo para esta simulação foi de 25 horas, resultando num total de 204 GB de dados.

5.1.2.4 Cenário 4 – Componente do cabeçote com circuito de água

Analisando o cenário 4, que contém água a circular pelo circuito interno da parte móvel do cabeçote, é composto por elementos que estão distribuídos por volumes sólidos e volumes de fluidos (Tabela 45), ao contrário do que se verificou com o cenário 3.

Tabela 45 - Número de nós e elementos para o cenário 4.

Material	Elementos	Nós
Fluido	196759	66899
Sólidos	794712	153317
Total	991471	220216

Analisando a Figura 122 é possível observar uma distribuição térmica significativamente menos heterogénea do que na Figura 119. Com base nesta comparação, foi possível concluir que o método de controlo de temperatura com recurso a resistências de aquecimento gera locais de focos de calor (*hotspots*), os quais, consequentemente, levam a que a temperatura em algumas superfícies dos canais de escoamento atinjam temperaturas acima dos 110°C, aumentando as hipóteses de ocorrer vulcanização prematura, em contraste com a situação em que o controlo de temperatura é feito com recurso a água, e as temperaturas da mesma não atingem os 100°C, mantendo as temperaturas máximas do cabeçote abaixo dos 110°C.

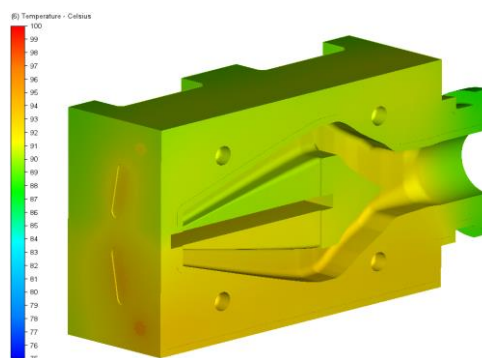


Figura 122 - Gradiente de temperatura para o cenário 4.

Os erros médios, com base nos valores dos resíduos obtidos para o cenário 4, utilizando 220216 nós, são bastante reduzidos. Isto significa que o erro médio em cada nó para as propriedades de temperatura e velocidade, em relação às equações governantes, é muito reduzido (Tabela 46 e Figura 123).

Tabela 46 - Valores dos resíduos e respetivos erros para o cenário 4.

Propriedade	Resíduo	Erro médio
Temperatura	0,061573	0,013°C
Velocidade- direção X	0,0352512	0,0075 mm/s
Velocidade- direção Y	0,0568269	0,0120 mm/s
Velocidade- direção Z	0,0745537	0,0159 mm/s

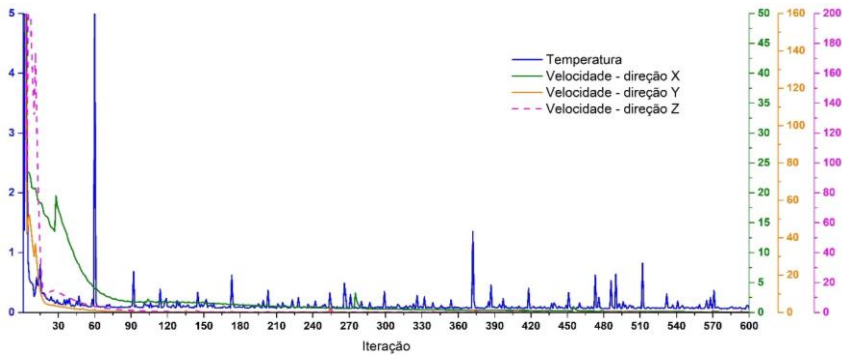


Figura 123 - Representação dos valores de resíduos para cada iteração do cenário 4.

O tempo de cálculo deste cenário foi de 16 horas e 27 minutos, resultando em 183 GB de dados.

5.1.2.4.1 Refinamento da malha

Para verificar se a malha inicial se encontra suficientemente refinada, o cenário 4 foi clonado incluindo a própria malha e, posteriormente, ajustado o fator tamanho de malha de 1 para 0,7. Os valores e respetivas diferenças obtidas para três pontos aleatórios do domínio de controlo estão descritos na Tabela 47.

Tabela 47 - Resultados e respetivas diferenças para as malhas com diferentes tamanhos do cenário 4.

Coordenadas (X, Y, Z)	Fator tamanho de malha = 1	Fator tamanho de malha = 0,7	Diferença
(-6, 100, 195)	92,2441°C	92,1471°C	0,105 %
(-5, 105, 200)	92,4135°C	92,1999°C	0,231 %
(-5, 110, 220)	91,5154°C	91,5167°C	0,001 %

Conforme se pode verificar pela Tabela 47, as diferenças entre ambas as malhas definidas são bastante residuais (e abaixo de 5%), o que indica que refinar a malha novamente não seria suficientemente vantajoso em termos de precisão de resultados. Isto é, mesmo que a malha fosse refinada, usando, por exemplo, um fator tamanho de malha de 0,5, os resultados iriam ser bastante idênticos aos obtidos com a malha com fator tamanho de malha de 1. Logo, o refinamento da malha e a utilização da mesma para cálculo numérico, iria aumentar drasticamente o tempo de computação total.

O tempo de cálculo desta simulação foi de 23 horas e 3 minutos, resultando em 66,3 GB de dados.

5.1.2.5 Cenário 5 – Aquecimento viscoso

Analizando o cenário 5, o mesmo contém volumes referentes a sólidos e a fluidos, pelo que os elementos tetraédricos estarão distribuídos em volumes sólidos e fluidos (Tabela 48).

Tabela 48 - Número de nós e elementos para o cenário 5.

Material	Elementos	Nós
Fluido	1025706	278161
Sólidos	611407	93394
Total	1637113	371555

A Figura 124 representa o gradiente de temperatura com a distribuição dos elementos e respectivos nós pelo modelo (vista em secção).

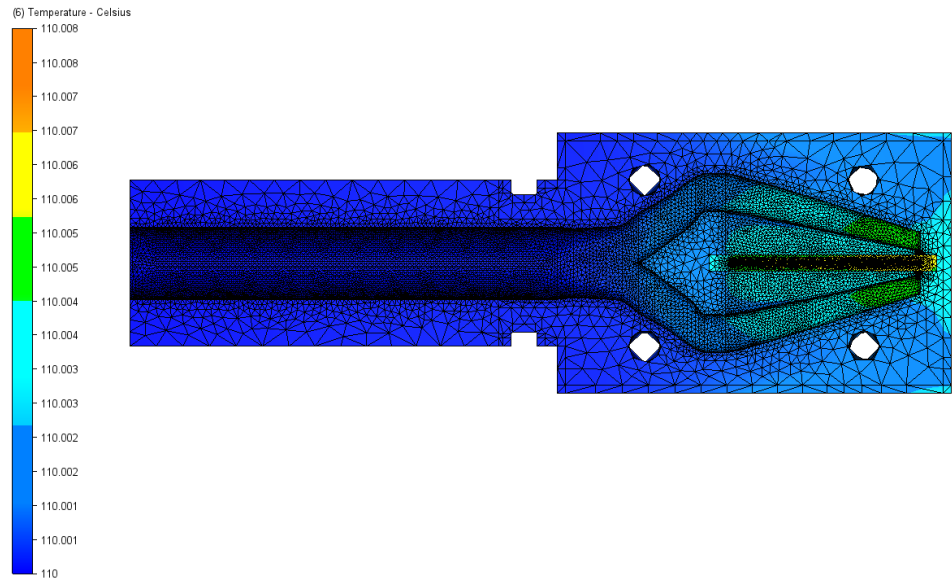


Figura 124 - Gradiente de temperatura com representação dos elementos e respetivos nós. Vista em corte no plano de contacto entre ambas as partes do cabeçote.

Analizando a Figura 125, é possível observar um ligeiro incremento de temperatura na zona correspondente à fieira. Contudo, esse incremento situa-se na ordem das milésimas de grau Celsius, pelo que, na prática, é um acréscimo térmico pouco relevante.

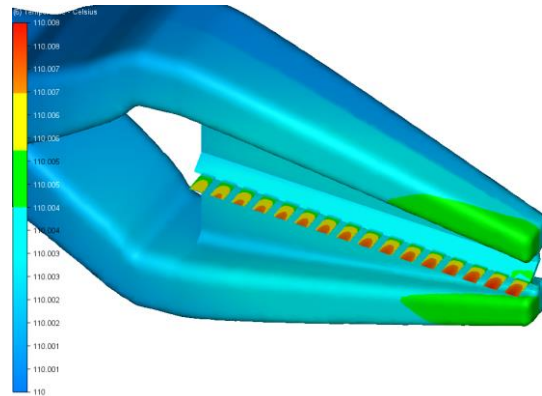


Figura 125 - Gradiente de temperatura no volume do composto de borracha.

Com base nos resultados obtidos, é possível prever que a geração de calor devido ao aquecimento viscoso para este escoamento pode ser desprezada, uma vez que a sua magnitude, é praticamente impercetível em termos práticos.

5.1.3 Termografia

A utilização de uma câmara termográfica para a observação e registo da distribuição térmica ao longo do cabeçote revelou ser uma tarefa com uma dificuldade superior à que se considerava inicialmente. Um dos primeiros passos a realizar quando se manipula uma câmara termográfica é a calibração da emissividade. Conforme já discutido, a emissividade varia conforme a cor, estado e aspeto das superfícies em análise. Isto tornou-se num enorme desafio, uma vez que, no interior do cabeçote, as paredes têm uma superfície relativamente escura e pouco rugosa e nos canais de escoamento do composto de borracha, a superfície é brilhante, com uma rugosidade superficial reduzida (Figura 126).



Figura 126 - Diferentes tonalidades e acabamentos superficiais característicos das superfícies internas do cabeçote.

Apesar desta disparidade entre superfícies, a emissividade foi mantida em 0,95. Analisando a Figura 127, foi possível concluir que numa situação de cabeçote aberto, as resistências de aquecimento poderiam estar acionadas, daí o registo de uma temperatura máxima de 172,7°C.

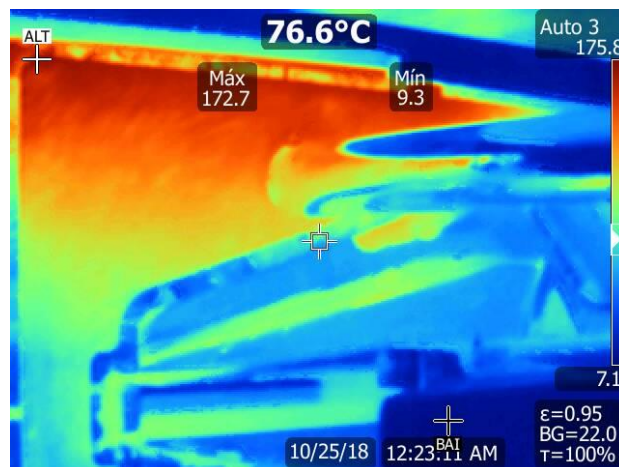


Figura 127 - Imagem termográfica do interior do cabeçote.

Comparando a Figura 127 e a Figura 128, foi possível verificar semelhanças entre o modelo real e o modelo computacional. A parte superior do cabeçote exibe temperaturas elevadas e muito idênticas em ambas as figuras. Contudo, analisando os canais de escoamento do composto de borracha, observa-se uma gama de temperaturas mais baixa na Figura 127. Tal observação pode ter sido causada pela regulação da emissividade do equipamento utilizado. Dada a natureza das superfícies nesse local, a emissividade, certamente, seria diferente daquela que foi utilizada, sendo, por isso, uma causa possível para o registo de temperaturas mais baixas. De uma forma geral, os modelos real e computacional demonstram uma forte correlação entre si.

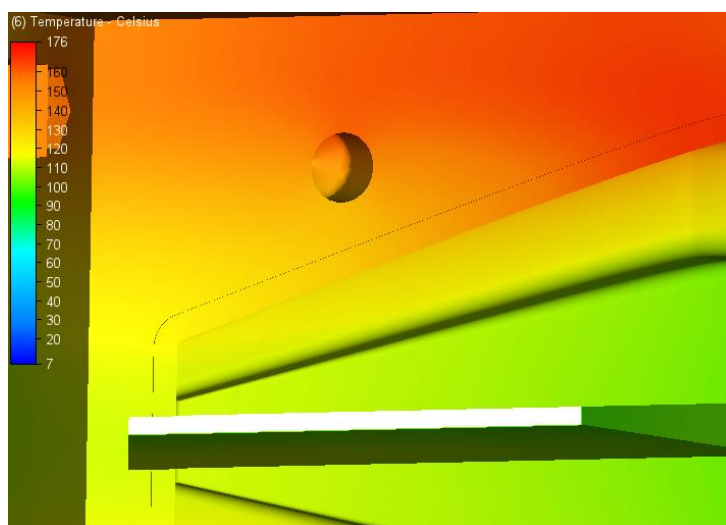


Figura 128 - Gradiente de temperatura registado no cenário 4 (interior do cabeçote).

No exterior do cabeçote, e imediatamente à saída das cintas de *cap ply*, foi possível registar temperaturas em torno dos 110°C. Com isto, é possível concluir que o composto de borracha se encontra a temperaturas acima de 110°C no interior do cabeçote, uma vez que quando as cintas atingem o exterior, o seu arrefecimento é imediato devido à dissipação de energia térmica para o exterior (Figura 129).

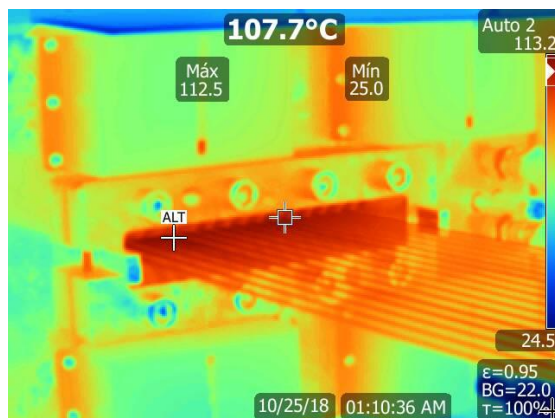


Figura 129 - Imagem termográfica à saída da fieira.

Já em situação de cabeçote fechado e com a *Cap strip* em funcionamento, foram registadas temperaturas acima dos 240°C (Figura 130) em torno das resistências de aquecimento. Estas temperaturas tornam-se perigosas para o operador que pode, acidentalmente, entrar em contacto direto com as mesmas, e, originar lesões físicas. Além disso, é possível que esta forte geração de calor cause um impacto significativo na distribuição térmica no interior do cabeçote, afetando assim as condições de pré vulcanização do composto no interior do cabeçote.

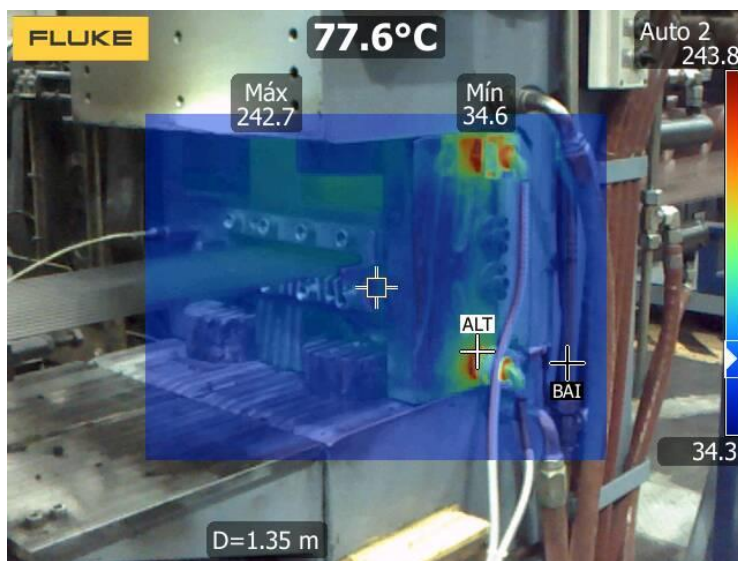


Figura 130 - Imagem termográfica do exterior do cabeçote.

Com base nas imagens termográficas obtidas, foi possível verificar que efetivamente o controlo de temperatura não era o ideal, uma vez que, com base nos resultados dos ensaios Scorch, as temperaturas atingidas superam, significativamente, os 110°C, sendo esta uma temperatura limite para o processamento do composto de borracha na *Cap strip*.

Além disso, a análise termográfica permitiu auxiliar na validação das análises numéricas que foram efetuadas, onde se verifica uma certa correlação entre os resultados obtidos numérica e experimentalmente.

5.1.4 Análise de rugosidade

A medição da rugosidade superficial foi executada apenas nos canais de escoamento de composto da parte móvel do cabeçote. Uma vez que o escoamento é simétrico, então a erosão provocada por esse escoamento deverá ser idêntica em ambas as partes do cabeçote. Foram então executadas 3 medições por cada ponto da Figura 80 (Tabela 49, Tabela 50, Tabela 51).

Tabela 49 - Resultados das medições de rugosidade na máquina *Cap strip* 1.

Medição	Ponto	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	Média Ra [μm]
1	A	1,02	5,890	6,640	1,098
2	A	1,1	7,280	9,480	
3	A	1,098	6,890	9,160	
1	B	0,909	5,010	6,310	0,845
2	B	0,845	4,970	5,860	
3	B	0,819	4,930	5,780	
1	C	0,967	5,420	6,970	0,986
2	C	0,995	4,390	5,260	
3	C	0,986	4,310	4,830	
1	D	0,826	4,670	5,440	0,759
2	D	0,759	5,080	7,500	
3	D	0,749	4,950	8,070	
1	E	1,062	6,450	8,980	0,967
2	E	0,951	6,130	9,280	
3	E	0,967	6,280	9,280	
1	F	0,954	7,150	9,390	0,955
2	F	0,955	7,440	9,440	
3	F	0,963	4,550	9,120	
1	G	1,261	8,070	11,600	1,261
2	G	1,35	8,940	13,800	
3	G	1,18	8,720	10,900	
1	H	0,646	4,290	7,060	0,646
2	H	0,646	4,660	7,350	
3	H	0,641	4,960	7,390	
1	I	0,652	4,520	6,670	0,652
2	I	0,623	3,630	4,080	
3	I	0,732	4,110	4,510	

Tabela 50 - Resultados das medições de rugosidade na máquina *Cap strip* 3.

Medição	Ponto	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	Média Ra [μm]
1	A	1,478	10,200	12,900	1,486
2	A	1,486	11,100	14,600	
3	A	1,513	11,900	16,600	
1	B	0,665	4,430	7,340	0,664
2	B	0,664	4,500	7,100	
3	B	0,664	4,560	7,190	
1	C	0,867	5,440	6,600	0,866
2	C	0,866	5,450	6,510	
3	C	0,86	5,510	6,500	
1	D	1,348	8,010	9,940	1,348
2	D	1,343	8,050	10,100	
3	D	1,349	8,050	10,200	
1	E	1,439	8,700	10,600	1,462
2	E	1,462	9,000	10,800	
3	E	1,491	9,250	10,400	
1	F	1,346	9,770	14,500	1,337
2	F	1,337	9,740	14,300	
3	F	1,329	9,820	14,300	
1	G	1,511	10,700	13,100	1,511
2	G	1,513	10,900	13,200	
3	G	1,507	10,900	13,200	
1	H	1,094	8,740	10,300	1,099
2	H	1,099	8,260	10,900	
3	H	1,1	8,330	10,000	
1	I	0,939	6,190	8,110	0,925
2	I	0,925	6,270	8,080	
3	I	0,919	6,000	8,250	

Tabela 51 - Resultados das medições de rugosidade numa parte móvel na condição de novo.

Medição	Ponto	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	Média Ra [μm]
1	A	1,203	7,570	9,990	1,285
2	A	1,285	9,000	12,900	
3	A	1,302	9,130	12,900	
1	B	1,667	11,000	15,900	1,654
2	B	1,654	10,800	15,400	
3	B	1,651	10,900	15,800	
1	C	1,281	8,180	9,830	1,281
2	C	1,273	7,990	9,920	
3	C	1,283	8,010	9,900	
1	D	1,346	8,060	10,600	1,015
2	D	1,015	6,530	7,660	
3	D	1,015	6,410	7,460	
1	E	1,307	7,800	8,660	1,310
2	E	1,31	7,800	8,610	
3	E	1,315	7,850	8,680	
1	F	1,385	9,670	10,800	1,393
2	F	1,431	9,400	10,700	
3	F	1,393	9,290	10,800	
1	G	1,554	10,200	12,800	1,547
2	G	1,547	10,200	12,800	
3	G	1,533	10,200	12,800	
1	H	1,401	8,740	9,870	1,417
2	H	1,425	8,380	9,480	
3	H	1,417	8,440	9,670	
1	I	1,218	9,160	10,500	1,236
2	I	1,237	7,370	8,790	
3	I	1,236	7,050	8,840	

Comparando os resultados de R_a para o cabeçote da *Cap strip* 1 e da *Cap strip* 3, é possível concluir que o cabeçote da *Cap strip* 1 possui uma rugosidade R_a inferior ao cabeçote da *Cap strip* 3, principalmente nos pontos D, I e H. Já as rugosidades R_a entre o cabeçote da *Cap strip* 3 e o cabeçote novo (retirado do armazém), é bastante semelhante. A conclusão a que se chegou após a análise dos valores obtidos foi que, possivelmente, a rugosidade do cabeçote da *Cap strip* 1 é inferior ao da *Cap strip* 3 e do cabeçote novo, e o cabeçote novo apresenta rugosidades semelhantes à *Cap strip* 3, devido ao tempo de serviço de cada equipamento. A *Cap strip* 3 é mais recente em relação à *Cap strip* 1 e, portanto, é possível que, caso seja aplicado um revestimento técnico pelo fabricante das *Cap strip*, o mesmo poderá já se encontrar erodido na *Cap strip* 1, devido ao seu longo tempo de serviço. Já na *Cap strip* 3 o tempo de serviço pode não ter excedido o tempo máximo de serviço do revestimento técnico aplicado e, por isso, a erosão provocada pelo escoamento pode, ainda, ser pouco notória.

O cabeçote novo continha um revestimento que visa proteger o mesmo da oxidação provocada pelo ambiente externo, durante a sua armazenagem. Esse revestimento foi removido nas zonas onde foram efetuadas as medições (Figura 131), utilizando uma solução de álcool etílico, de forma a não interferir com as leituras de rugosidade.



Figura 131 – Remoção do revestimento presente na parte móvel do cabeçote novo.

Infelizmente, apenas com a medição de rugosidades, não foi possível determinar se os cabeçotes possuem algum tipo de revestimento técnico ou não, uma vez que, habitualmente, os revestimentos técnicos manipulam as características das superfícies onde são aplicados.

5.1.5 Ensaios de extrusão

Os ensaios de extrusão foram efetuados na *Cap strip 1* através da regulação da velocidade de rotação da bomba de engrenagens para 2 RPM. Inicialmente, sobre o provete de ensaio foi realizado um trabalho de lixagem manual com uma lixa Indasa® Rhynoblue P60, a qual continha grãos de óxido de alumínio. Após o processo de lixagem manual, foram efetuadas medições de rugosidade ao canal de escoamento do provete (Tabela 52).

Tabela 52 - Rugosidade do provete para o ensaio 1.

Medição	R _a [μm]	R _z [μm]
1	1,089	7,83
2	1,341	8,43
3	1,182	7,29
4	1,105	8,21
5	1,066	6,74
6	1,171	7,17
7	1,098	8,79
8	1,082	7,33

Para o primeiro ensaio, a média dos valores de R_a, relativos ao provete era de 1,1015 μm, com um desvio padrão de 0,0848 μm, sendo por isso, a superfície pouco homogênea, o que é difícil de alcançar com a lixagem manual.

A montagem do equipamento de ensaio na *Cap strip 1* foi executada de forma manual. Para isso, foi necessário alterar algumas condições de programação do autômato, uma vez que a bomba

de engrenagens só poderia funcionar caso o sensor de proximidade detetasse contacto entre a bomba de engrenagens e o cabeçote. Após a suspensão dessa condição, o equipamento foi colocado na bomba de engrenagens e, de seguida, o cilindro hidráulico recuou para permitir o fecho dos encaixes da bomba de engrenagens, fixando assim o provete à bomba de engrenagens. Ao lado do provete, foi instalada uma câmara fotográfica suportada por um tripé (Figura 132).



Figura 132 - Provete de ensaio e câmara fotográfica instalados para registo de dados.

As características da câmara fotográfica e definições de gravação estão representadas na Tabela 53.

Tabela 53 - Características da câmara fotográfica e definições de gravação utilizadas.

Panasonic DC-FZ82	
Velocidade do obturador em vídeo	1/25 - 1/16.000
Gravação de vídeo	1920 x 1080 – 60 fps - MP4
Sensibilidade ISO	Automática
Zoom ótico	120x
Abertura da lente	F2,8 – 5,9

Recorrendo ao *software* Sony® Vegas Pro 14, foi possível determinar os fotogramas em que o escoamento se inicia e termina no ensaio. Sabendo ainda a taxa de fotogramas, é possível calcular com precisão o tempo total de escoamento, uma vez que 60 fps (fotogramas por segundos) correspondem a 60 fotogramas registados durante um segundo, e que o quociente entre o número de fotogramas e os fotogramas por segundos resulta no tempo total (Tabela 54).

Tabela 54 - Tempo de escoamento para o ensaio 1.

Ensaio 1	
Fotograma de início do escoamento	2081
Fotograma de fim do escoamento	6113
Número de fotogramas	4032
Tempo de escoamento	67 segundos e 200 milissegundos

No ensaio 1, a tampa de ABS acabou por atingir a rotura já após o final do escoamento do composto de borracha (Figura 133). A mesma tampa foi, posteriormente, substituída por duas tampas de policarbonato transparente com 5 mm de espessura cada uma. Mais, as chapas de reforço, que visam adicionar resistência à tampa, foram substituídas por outras com maior espessura.

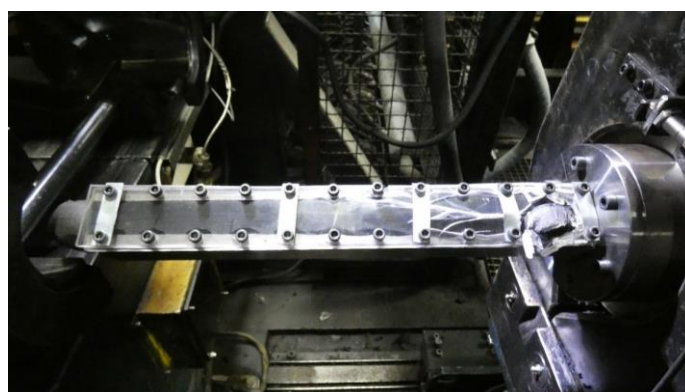


Figura 133 - Rotura da tampa durante o primeiro ensaio de extrusão.

Após o primeiro ensaio, efetuou-se a preparação do provete de ensaio para um segundo ensaio. Neste segundo ensaio, pretendeu-se reduzir a rugosidade das superfícies internas do provete, de forma a perceber o impacto que a mesma iria ter no escoamento. Novamente, através do processo de lixagem manual e com uma lixa Indasa® Rhynometal P240, alcançou-se uma rugosidade inferior em relação à superfície do provete no primeiro ensaio (Tabela 55).

Tabela 55 - Rugosidades da superfície interna do provete para o ensaio 2.

Medição	R _a [μm]	R _z [μm]
1	0,554	5,14
2	0,756	5,45
3	0,748	5,17
4	0,520	4,12
5	0,554	4,89
6	0,647	3,96
7	0,639	5,19
8	0,573	4,31

A média das rugosidades R_a do provete para o ensaio 2 foi de 0,606 μm, com um desvio padrão de 0,0842 μm.

Colocando novamente o provete na bomba de engrenagens, foi registado em vídeo, todo o escoamento e, de seguida, calculado o tempo de escoamento (Tabela 56).

Tabela 56 - Tempo de escoamento de composto de borracha no ensaio 2.

Ensaio 2	
Fotograma de início do escoamento	2053
Fotograma de fim do escoamento	6029
Número de fotogramas	3976
Tempo de escoamento	66 segundos e 267 milissegundos

Apesar de os tempos de escoamento para os ensaios 1 e 2 serem bastante idênticos, decidiu-se executar um terceiro ensaio. Para o terceiro ensaio, a rugosidade da superfície interna do provete foi ainda mais reduzida. Para alcançar essa rugosidade (Tabela 57) mais reduzida, efetuou-se uma lixagem manual da superfície com uma lixa 3M™ Wetordry P1200.

Tabela 57 - Rugosidade da superfície interna do provete para o ensaio 3.

Medição	R _a [μm]	R _z [μm]
1	0,430	3,39
2	0,425	3,86
3	0,360	2,36
4	0,387	3,92
5	0,336	2,69
6	0,404	2,77
7	0,321	3,86
8	0,341	3,19

A rugosidade média de R_a do provete para o ensaio 3 foi de 0,3735 μm, com um desvio padrão de 0,0393 μm.

O registo fotográfico foi novamente efetuado de forma a determinar o tempo de escoamento (Tabela 58).

Tabela 58 - Tempo de escoamento para o ensaio 3.

Ensaio 3	
Fotograma de início do escoamento	1717
Fotograma de fim do escoamento	5655
Número de fotogramas	3938
Tempo de escoamento	65 segundos e 630 milissegundos

Dos três ensaios efetuados, o ensaio que resultou num tempo de escoamento inferior foi o ensaio 3. Contudo, a diferença entre o ensaio 3 e os restantes ensaios é muito residual, pelo que foi difícil retirar uma conclusão concreta acerca da influência da rugosidade sobre as condições de escoamento.

Para verificar o impacto que um possível revestimento técnico passa oferecer ao escoamento de composto de borracha, foi apresentado o problema a uma empresa especialista em aplicação

de revestimentos técnicos. Através de uma pequena reunião, foi sugerido, pela empresa, a aplicação de um revestimento de CrN (Nitreto de Crômio) visto que se trata de um revestimento com resultados satisfatório na área de injeção de materiais poliméricos em moldes.

Após o revestimento do provete de ensaio com CrN, efetuou-se um quarto ensaio de forma a analisar o impacto que o revestimento teria no escoamento do composto. Este ensaio visou, sobretudo, validar se o investimento na aplicação do revestimento técnico nos cabeçotes seria suficientemente benéfico.

O tempo de escoamento para o ensaio 4 foi semelhante aos restantes ensaios que não possuíam revestimento de CrN no provete, sendo até ligeiramente superior (Tabela 59). Considerando os resultados obtidos, a aplicação de revestimento técnico de CrN nos cabeçotes das *Cap strips* foi descartada, uma vez que não se verificou qualquer vantagem na aplicação do mesmo, considerando os resultados obtidos.

Tabela 59 - Tempo de escoamento para o ensaio 4.

Ensaio 4	
Fotograma de início do escoamento	120
Fotograma de fim do escoamento	4171
Número de fotogramas	4051
Tempo de escoamento	67 segundos e 517 milissegundos

5.1.6 Ficheiros Log com Arduino®

O registo dos parâmetros de máquina através de ficheiros log obtidos diretamente da *Cap strip* 3 e do cartão de memória, que fora montado no circuito de Arduino®, e posterior combinação desses ficheiros em um único ficheiro, foi efetuada em dois momentos do projeto. O primeiro, foi na fase inicial, em que não se efetuaram alterações ao método de controlo de temperatura implementado. O segundo, foi após a implementação de alterações ao sistema de controlo de temperatura. Na fase inicial, o sistema de monitorização desenvolvido foi colocado em funcionamento durante 11 dias, com um registo de 24 horas em cada um desses dias.

Num dos primeiros dias de monitorização, observou-se um período de 4 horas em que não houve qualquer geração de calor por parte das resistências de aquecimento (a potência permanece nula durante as 4 horas). Olhando para a velocidade da linha, foi possível verificar que não houve qualquer paragem devido a composto de borracha vulcanizada ou por falha de impregnação, caso contrário a velocidade da linha tomaria valores de 0 m/min durante alguns minutos (geralmente de 5 a 10 minutos devido à intervenção por parte do operador). As reduções de velocidade da linha correspondem às trocas de bobinas de *cap ply*, que atingem a sua capacidade máxima e são então substituídas por outras sem *cap ply*. Foi ainda possível observar que a temperatura da bomba de engrenagens acompanha a temperatura da sonda implementada no sistema Arduino®. Contudo, a temperatura do cabeçote (sonda original do cabeçote) apresenta uma disparidade entre a sua temperatura e a temperatura da bomba de engrenagens. Além disso, notou-se que a temperatura da bomba de engrenagens atinge temperaturas de 110°C quando a sonda do cabeçote (que se encontra imediatamente à entrada bomba de engrenagens) regista temperaturas de 87°C (Figura 134).

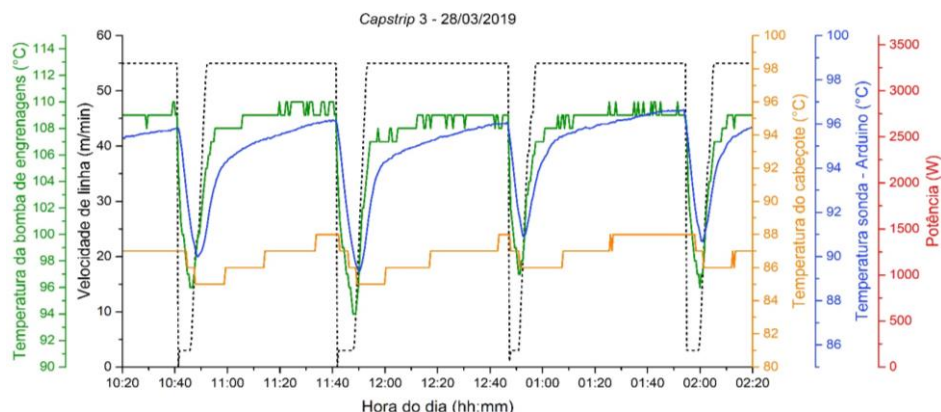


Figura 134 - Dados obtidos por ficheiros log para o dia 28/03/2019.

Uma outra situação registada no dia 11/05/2019 representa o acionamento das resistências de aquecimento, em contínuo, durante 20 minutos. Possivelmente, o controlo das resistências de aquecimento estaria condicionado à temperatura do cabeçote. Olhando para a Figura 135, é possível constatar que quando ocorre esse acionamento das resistências de aquecimento, a temperatura do cabeçote regista valores abaixo dos 80°C, mesmo quando a velocidade da linha é superior a 0 m/min, i.e., mesmo quando a *Cap strip* se encontra em funcionamento e há escoamento de composto de borracha no interior do cabeçote. É notória a imediata e rápida elevação da temperatura registada pela sonda conectada ao Arduino®. Por volta das 8:35 h é possível verificar que a temperatura do cabeçote situa-se a 69°C, a velocidade da linha é de 3 m/min e a temperatura registada pela sonda conectada ao Arduino® é de 117°C. Portanto, estando o cabeçote fechado e com composto de borracha no seu interior, há uma diferença de temperatura de 48°C entre ambas as sondas de temperatura. Esta diferença torna-se algo estranha uma vez que se à entrada do cabeçote, a bomba de engrenagens regista uma temperatura de 86°C e no final do cabeçote a sonda regista 117°C, então a sonda correspondente à temperatura do cabeçote, que se situa entre a bomba de engrenagens e a sonda instalada no purgador, deveria registar uma temperatura, mais ou menos, intermédia, i.e., 100°C ou 90°C, dado que a dissipação de calor nunca é suficiente de forma a que se registre uma temperatura de 69°C.

A máquina conseguiu manter os 55 m/min de velocidade da linha, mas assim que a temperatura da bomba de engrenagens começou a alcançar os 110°C de temperatura (devido ao composto começar a estabilizar a sua temperatura aquando o seu avanço na extrusora), verificou-se uma paragem repentina. Essa paragem, terá ocorrido devido ao surgimento de aglomerados de composto de borracha que vulcanizaram no interior do cabeçote (Tabela 60). No segundo arranque (às 9:40 h) a máquina já arrancou sem que houvesse interrupções (reparar que a velocidade da linha após o segundo arranque nunca volta a 0 m/min), uma vez que a temperatura registada pela sonda conectada ao Arduino® nunca excedeu os 110°C. A comparação do primeiro arranque com o segundo arranque verificou, em parte as conclusões dos ensaios Scorch, em que se concluiu que a temperatura crítica para prevenir a pré vulcanização no processo de produção de *cap ply* seria de, aproximadamente, 110°C.

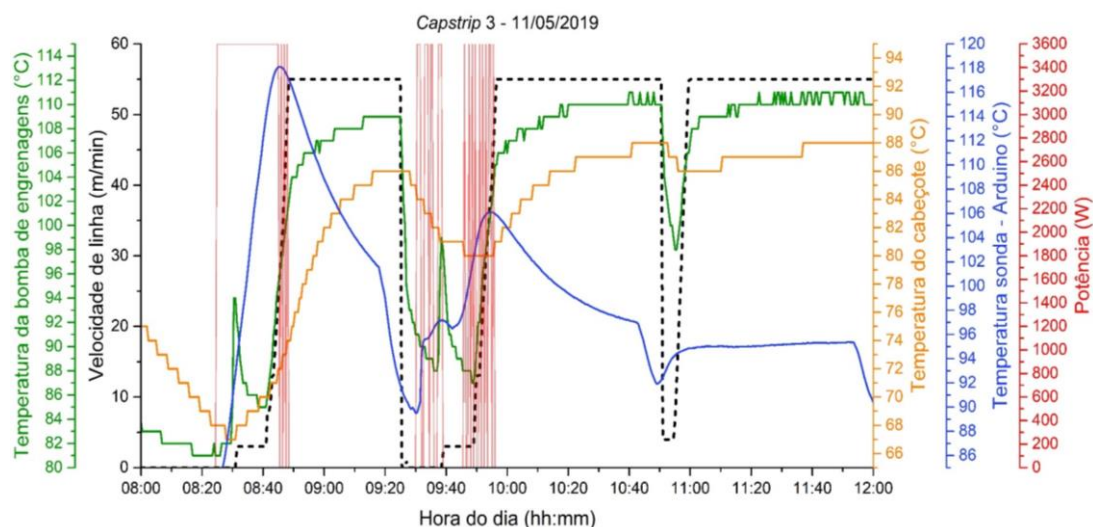


Figura 135 - Dados obtidos por ficheiros log para o dia 11/05/2019.

Tabela 60 - Registo de *scrap* relativo ao dia 11/05/2019. Registo de uma única ocorrência.

Dia	Máquina	Imperfeição	Peso	%COP
11/05/2019	Cap strip 3	Borracha vulcanizada	6,3 kg	0,000013

A situação mais relevante de todos os períodos de monitorização do controlo de temperatura, deu-se no dia 02/04/2019 em que houve um aumento da temperatura registada pela sonda conectada ao Arduino® até aos 132°C (Figura 136), quando nesse mesmo instante a temperatura do cabeçote registava 79°C. Esta situação ocorreu quando a máquina se encontrava em suspensão de produção, uma vez que a velocidade da linha era de 0 m/min. Apesar da elevada temperatura registada, não ocorreu pré vulcanização do composto de borracha, uma vez que, quando se iniciou a produção, a temperatura registada pela sonda conectada ao Arduino® apresentou um decréscimo bastante rápido. Às 7:32 h é possível verificar uma oscilação repentina da temperatura registada pela sonda conectada ao Arduino®. Esta oscilação deve-se ao contacto repentino do composto de borracha com a sonda. Imediatamente após esse contacto, observa-se um ligeiro aumento da temperatura e, de seguida, uma descida rápida dessa mesma temperatura. Isto indica que o composto de borracha alcançou o local onde a sonda conectada ao Arduino® está instalada, devido ao acionamento da bomba de engrenagens que força o enchimento do interior do cabeçote mesmo com a velocidade da linha igual a 0 m/min, e que o cabeçote forneceu energia térmica de forma a que o composto de borracha fosse aquecendo e aumentando a sua temperatura. Assim que a velocidade da linha supera os 0 m/min a curva inicia uma descida da temperatura, uma vez que o composto deixa de estar em situação estática e entra em fase dinâmica. Nesta situação, o composto de borracha não originou pré vulcanização, devido ao período de tempo que esteve sujeito a temperaturas muito elevadas, i.e., esteve poucos minutos sujeito a temperaturas superiores a 110°C.

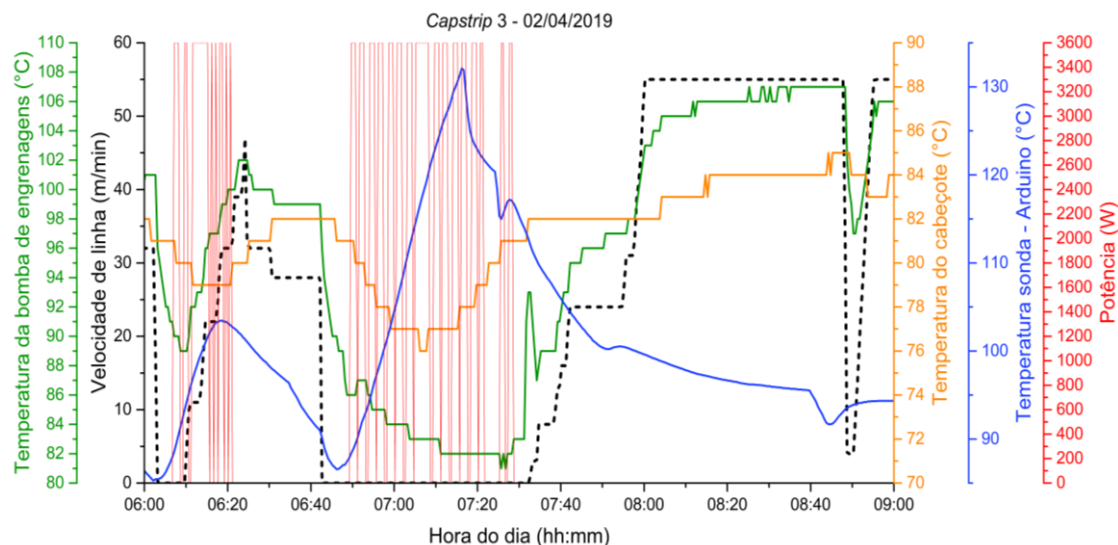


Figura 136 - Dados obtidos por ficheiros log para o dia 02/04/2019.

Com base nos dados obtidos, verificou-se que um dos parâmetros analisados fornecia dados disparelhos as análises numéricas e os ensaios experimentais, tal como, termografia e registo de dados através do sistema Arduino®. Imediatamente foram direccionados esforços para investigar os valores anómalos de temperatura fornecidos pela sonda original do cabeçote.

Na fase de diagnóstico do problema, percebeu-se que a sonda instalada corresponde a uma sonda RTD PT100 em dois componentes. A sonda é constituída por uma sonda RTD PT100 com um encaixe mecânico que permite colocar essa sonda dentro de um tubo com uma das extremidades tapada, sendo esse tubo, roscado no cabeçote (Figura 137).

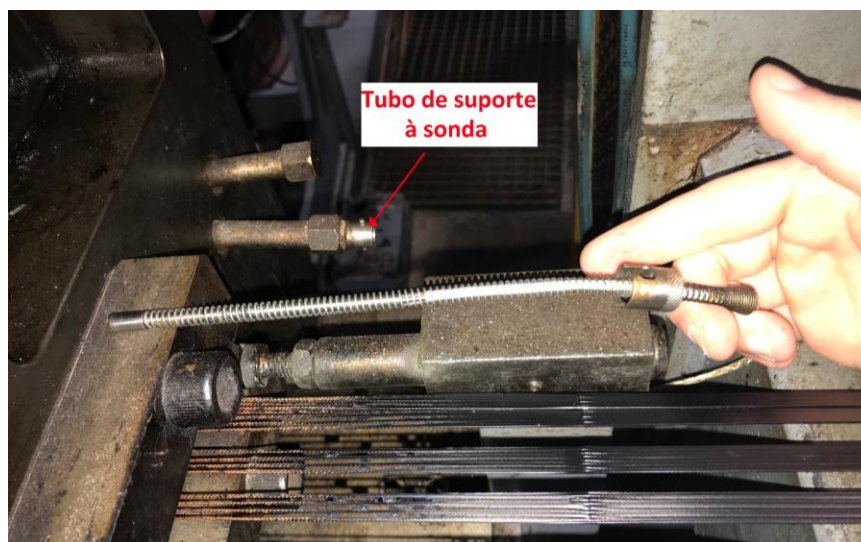


Figura 137 - Sonda original do cabeçote desacoplada.

O facto de a sonda não estar em contacto directo com o composto de borracha durante o seu escoamento, faz com que a mesma não indique a temperatura real do composto de borracha. Além disso, a extremidade do tubo encontra-se coincidente (Figura 138) com a superfície do

canal de escoamento e, portanto, é mais propícia a indicar a temperatura do cabeçote do que do composto de borracha em escoamento.

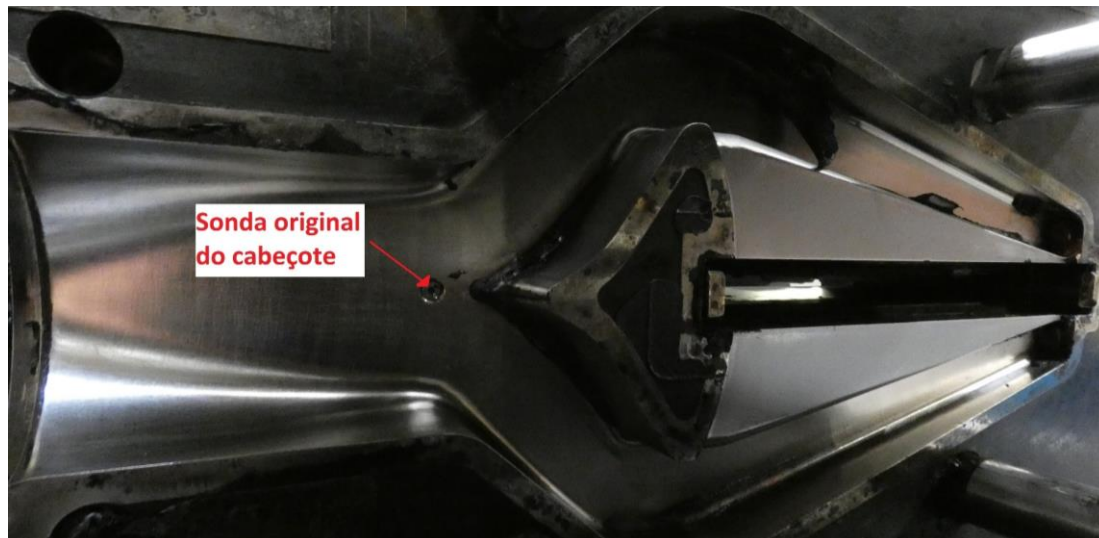


Figura 138 - Vista interna do cabeçote que demonstra a instalação da sonda original do cabeçote.

5.2 Síntese dos resultados

Analisando os resultados obtidos pelos vários métodos abordados, concluiu-se que:

- Através das análises numéricas, conseguiu-se efetivamente comparar a distribuição térmica no cabeçote com ambos os métodos de controlo de temperatura, sendo que através do controlo com resistências de aquecimento e água há uma forte geração de calor, principalmente na parte móvel do cabeçote, e que fomenta a reação de vulcanização, originando vulcanização prematura. Com o controlo de temperatura através das TCU e, portanto, somente com água, as temperaturas presentes no cabeçote não são tão elevadas e, por isso, diminuem o risco de o composto de borracha apresentar vulcanização prematura. As análises numéricas permitiram suportar os projetos seguintes que foram elaborados ao longo do projeto, tal como, no auxílio em perceber qual o local adequado para a instalação de uma nova sonda no cabeçote;
- Aliando a termográfica às análises numéricas, os resultados numéricos conseguiram ser validados, em certa parte, verificando-se uma correlação entre os resultados das análises numéricas e as imagens termográficas. Esta técnica permitiu obter dados experimentais de uma forma rápida e bastante detalhada;
- Nas medições da rugosidade superficial dos vários cabeçotes estudados, não foi possível determinar concretamente qual o tipo de revestimento técnico aplicado nos cabeçotes, se é que o mesmo existe;
- Os ensaios de extrusão, utilizando o provete projetado, também não permitiram retirar conclusões suficientes acerca do impacto que diferentes superfícies têm no escoamento do composto;
- A implementação do microcontrolador Arduino®, com respetivos módulos, tornou-se numa das técnicas mais importantes utilizadas neste projeto. O local de instalação da

sonda escolhido permitiu manter os custos baixos, uma vez que, não foi necessário retirar o cabeçote para furar o mesmo de forma a alojar a sonda de temperatura. Na decisão deste local de instalação foram tidos em consideração os custos que seriam necessários alocar, assim como considerando os resultados da análise numérica;

- As conclusões retiradas através dos vários métodos utilizados, permitiu desenvolver um novo sistema de controlo de temperatura que envolveu um custo relativamente baixo para a empresa e que foi ainda replicado para todas as máquinas *Cap strip* da fábrica, à exceção da *Cap strip* 4, por ser uma máquina mais recente e com um sistema de funcionamento diferente.

5.3 Lições aprendidas

Observando todos os resultados obtidos, é possível perceber que a utilização de métodos experimentais e computacionais permite obter dados extremamente valiosos e que auxiliam no desenvolvimento de novos sistemas para implementação, evitando assim métodos empíricos com constantes processos tentativa - erro, que, na maioria das vezes, só provocam dispêndio de tempo e dinheiro à empresa. A compreensão dos conceitos envolventes ao processo de extrusão de polímeros revelou ser de extrema importância. Conforme se constatou, esses conceitos são, por vezes, algo complexos e exigem um elevado grau de dedicação e empenho para que sejam compreendidos para aplicação desse conhecimento na análise prática e de investigação.

Com o trabalho desenvolvido, foi possível perceber que, em primeiro lugar, é preciso conhecer os materiais, processos e mecanismos que envolvem o caso de estudo. Isto é, a investigação e determinação das propriedades reológicas são importantes para conseguir estabelecer limites para o processamento dos compostos de borracha, tal como se conseguiu efetuar a caracterização do composto FMS-B00163 em relação às suas características através dos ensaios *Scorch*.

Em segundo lugar, é importante determinar as condições de funcionamento da máquina em questão, de forma a compreender onde possam ocorrer os eventuais problemas, i.e., conhecer os locais de potencial conflito. Para isso, neste projeto recorreu-se a técnicas de análise numérica e experimental (termografia, registo de temperatura com microcontrolador, análise de rugosidade superficial e ensaios de extrusão) para obter um conjunto de resultados que permitissem concluir quais os locais que são propícios à geração de problemas e quais as causas que provocam a existência desses locais.

Em terceiro lugar, deverá ser explorada e discutida entre elementos dos departamentos de Engenharia e do DATP (Departamento de Apoio Técnico à Produção) as eventuais hipóteses de solução aos problemas em estudo. A discussão dos resultados obtidos com os vários elementos de equipa revelou ser uma mais-valia para alcançar uma solução ótima para a resolução de problemas, através de sessões de *brainstorming*.

Em último lugar, e por concordância dos vários elementos de chefia e equipa, deverá ser feito um esforço em conjunto para a implementação da proposta de solução e posterior acompanhamento do desempenho das várias medidas implementadas, de forma a perceber os efeitos que as alterações tiveram na produção.

Recorrendo a esta metodologia descrita foi provado, com este projeto, que se consegue atingir resultados extremamente positivos e com poucas tentativas. Desde a substituição do controlo de temperatura com água (TCU) pelo controlo misto de resistências de aquecimento e água, existiram sempre problemas de composto de borracha vulcanizado e falha de impregnação, os quais estiveram quase sempre presentes na produção. Ao longo de vários anos, esse controlo foi sendo manipulado, sem que houvesse um resultado suficientemente satisfatório. Com o método utilizado neste projeto, foi possível compreender que esse controlo seria incapaz de produzir resultados positivos, dado que a sonda original do cabeçote regista valores que não permitem conhecer efetivamente a temperatura real do composto de borracha, conforme se observou através da instalação de novas sondas RTD PT100. Assim, através de apenas uma única proposta de controlo de temperatura, foi possível reduzir drasticamente os problemas e custos originados pelos problemas de composto de borracha vulcanizado e falha de impregnação.

5.4 Soluções implementadas

Com base nos resultados obtidos, foi proposto substituir todo o sistema de controlo de temperatura utilizado nas *Cap strip*. A substituição das resistências de aquecimento por água foi uma das hipóteses colocadas, contudo os custos de substituição dos cabeçotes (devido à oxidação agravante existente) seria demasiado elevada e requeria alguns dias de paragem das máquinas. Então, optou-se pela otimização do sistema atual de aquecimento e arrefecimento do cabeçote, através da alteração do controlo de temperatura.

Foi proposta a substituição do controlador das resistências (controlador ON-OFF) por um controlador PID, instalação de uma nova sonda conectada ao computador da máquina e também a atribuição de novos *setpoints*.

Em reunião com os elementos do DE 3 (Departamento de Engenharia 3) e DATP, foram apresentados os resultados obtidos ao longo do projeto desenvolvido e concordou-se em substituir o controlador ON-OFF por um controlador PID, em instalar uma nova sonda em substituição de um dos purgadores do cabeçote e definição de novos *setpoints*, na *Cap strip 2*.

Após a aquisição dos novos equipamentos a instalar, foi explicado a todos os membros, através de uma pequena sessão, quais os objetivos a alcançar, e problemas a prevenir, com o novo sistema (Figura 139). Na Figura 139 é possível constatar que o gráfico utilizado para a explicação do novo conceito se baseia no gráfico da Figura 136, obtido pelo estudo experimental através da obtenção dos valores de temperatura no interior do cabeçote, com recurso ao microcontrolador Arduino®, conectado com vários módulos.

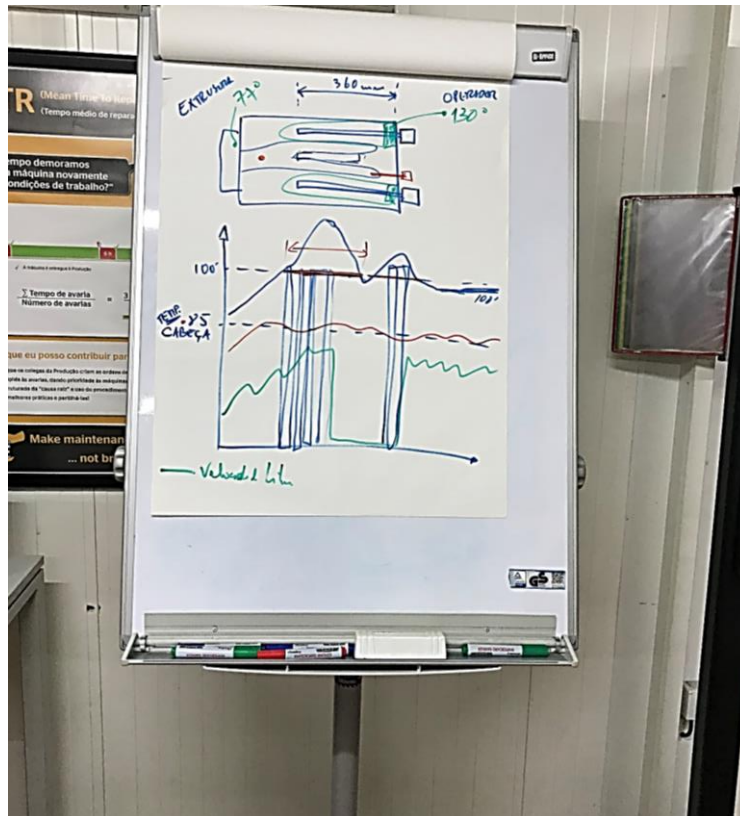


Figura 139 - Diagrama de explicação das causas a combater com o novo sistema. Esquema elaborado pelo DE 3.

Além da instalação dos novos componentes, decidiu-se manter o controlo do acionamento das resistências de aquecimento através de dois *setpoints* diferentes. Um relacionado com o valor lido pela sonda original do cabeçote e o outro pelo valor lido pela sonda instalada no local do purgador.

Na *Cap strip* 2 foi então retirado um dos purgadores e foi projetado um novo adaptador de fixação (ANEXO 13 – Desenho técnico do adaptador para a nova sonda RTD PT100). A Figura 140 apresenta o novo adaptador e sonda RTD PT100 instalados, em substituição do purgador.



Figura 140 - Nova sonda RTD PT100 instalada no cabeçote, em substituição do purgador.

Após a instalação do novo controlador PID e sonda RTD PT100, iniciou-se a elaboração do programa *Ladder* no *software* TwinCAT PLC Control, que ficou a cargo do responsável de automação do DE 3 .A Figura 141 representa o programa desenvolvido, que segue as seguintes regras:

1. Conversão do valor analógico das sondas RTD PT100 (sonda original do cabeçote e sonda nova instalada no local do purgador) em valor de temperatura, através do bloco de operações aritméticas DIV. *w_Actual_Temperature_ExtruderSide* refere-se à temperatura registada pela sonda original do cabeçote, ou seja, a sonda que fica do lado da extrusora. *w_Actual_Temperature_OperatorSide* refere-se à temperatura registada pela nova sonda instalada no local do purgador, i.e., a sonda que está do lado do operador;
2. Se a temperatura lida pela sonda original (*w_Actual_Temperature_ExtruderSide*) for menor que 85°C e o cabeçote estiver fechado (*I_E_Locking_is_In*), então o valor de *setpoint* (*r_out*) para a sonda do lado do operador (*w_Actual_Temperature_OperatorSide*) será de 105°C;
3. Se a temperatura lida pela sonda original (*w_Actual_Temperature_ExtruderSide*) for maior ou igual que 85°C e o cabeçote estiver fechado (*I_E_Locking_is_In*), então o valor de *setpoint* (*r_out*) para a sonda do lado do operador (*w_Actual_Temperature_OperatorSide*) será de 100°C;
4. Se a temperatura lida pela sonda do lado do operador (*w_Actual_Temperature_OperatorSide*) for menor que 95°C e o cabeçote estiver aberto (*I_E_Locking_is_InO*), então o valor de *setpoint* (*r_out*) para a sonda do lado do operador (*w_Actual_Temperature_OperatorSide*) será de 95°C;
5. No controlo PID, o valor de *setpoint* (*r_out*) é comparado com o valor atual da sonda do lado do operador (*w_Actual_Temperature_OperatorSide*), e o mesmo faz o controlo do valor de tensão fornecido às resistências de aquecimento, permitindo uma gama de valores de 0 a 1800 W;

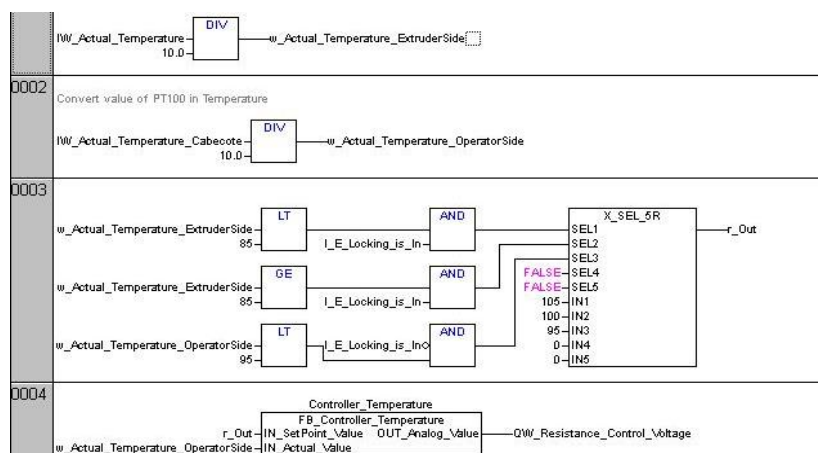


Figura 141 - Programa *Ladder* de controlo de temperatura para as *Cap strip*.

Os valores de *setpoints* definidos foram escolhidos com base nos métodos e resultados obtidos neste projeto. Inicialmente, os *setpoints* eram ligeiramente diferentes e, em poucas horas, efetuou-se algumas correções ao programa e o funcionamento do controlo de temperatura

tornou-se mais estável. Todas as condições definidas visam ainda limitar a temperatura máxima atingida no interior de cabeçote, evitando que as mesmas superem os 110°C.

5.4.1 Impacto das soluções implementadas

Após a implementação do novo controlo de temperatura (a 23/05/2019), foi também criada uma nova rotina de registo, em ficheiros log, de todos os parâmetros da máquina, os quais foram analisados durante 19 dias.

Imediatamente, os resultados observados eram significativamente diferentes daqueles registados na fase inicial, em que não foram alterados quaisquer parâmetros referentes ao controlo de temperatura. Com as alterações implementadas, e em situação de arranque de máquina, foi possível constatar que as temperaturas registadas não excediam os 105°C (Figura 142), ao contrário do que acontecia anteriormente, onde, por vezes, eram atingidos os 132°C (Figura 136). Além disso, mesmo após o arranque da máquina, verificou-se que a temperatura medida no final do escoamento (temperatura no purgador) se manteve bastante estável. O controlo da potência também assume valores totalmente diferentes devido ao novo controlo.

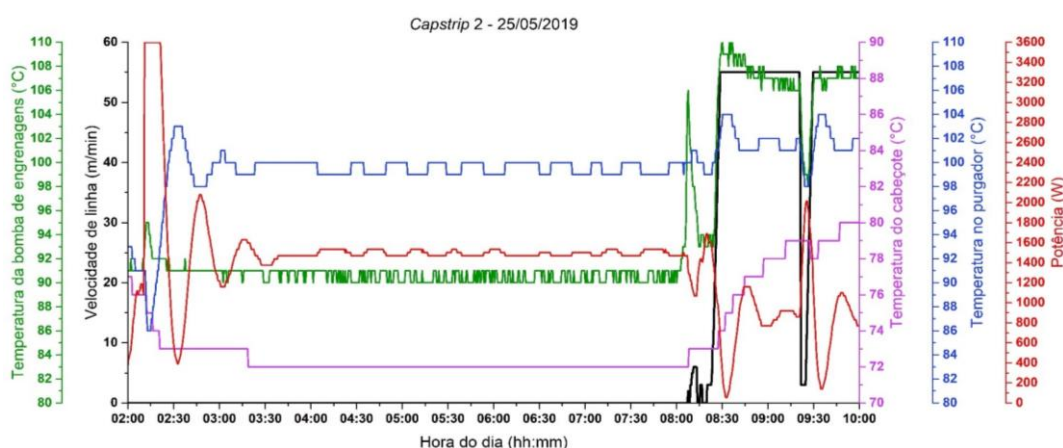


Figura 142 - Dados obtidos por ficheiros log para o dia 25/05/2019.

No decorrer da produção habitual de *cap ply*, verificou-se que as paragens da máquina foram reduzidas significativamente. Na Figura 143 é possível observar uma única paragem ao longo de um período de 5 horas. Essa paragem poderá ter ocorrido por cordas partidas, uma vez que não existe registo de *scrap* relativo a composto de borracha vulcanizada ou falha de impregnação na *Cap strip 2*. À velocidade da linha, o composto de borracha situa-se sempre entre os 105°C e os 95°C, mantendo-se afastado da temperatura limite de 110°C, em que a probabilidade de ocorrência de vulcanização prematura é mais elevada. A temperatura do cabeçote encontra-se também mais estável, apresentando menos oscilações, contudo os valores continuaram a ser algo baixos para aquilo que era expectável.

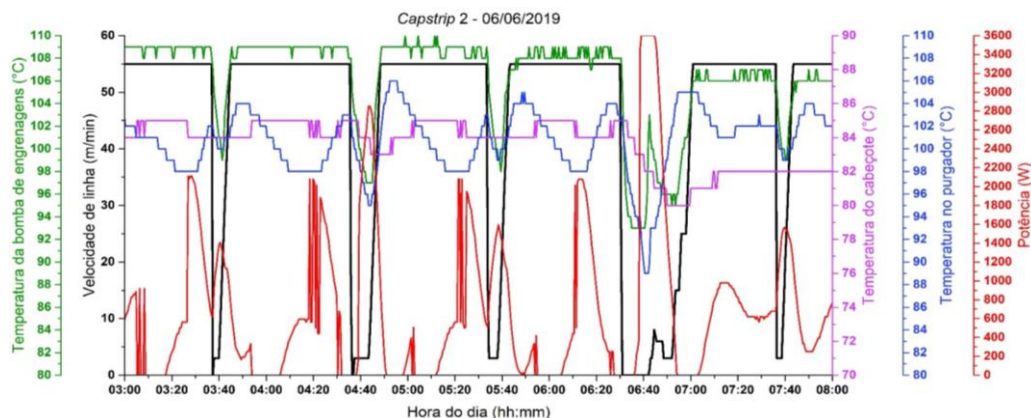


Figura 143 - Dados obtidos por ficheiros log para o dia 06/06/2019.

Nos restantes dias de monitorização, os resultados obtidos eram bastante idênticos aqueles apresentados no dia 06/06/2019 (Figura 143).

Com a implementação do novo sistema de controlo de temperatura, houve uma redução drástica do *scrap* gerado durante a produção de *cap ply*, relativo à falha de impregnação e de composto de borracha vulcanizada. Além disso, em situação de cabeçote aberto, a temperatura do cabeçote manteve-se mais baixa do que o que acontecia anteriormente, o que permitia ao operador, trabalhar com mais segurança e conforto, e quando o cabeçote era fechado de forma a iniciar a produção, não se verificava falha de impregnação no arranque de máquina.

O novo controlo permitiu não só reduzir a quantidade de *scrap*, como também reduzir custos de produção e aumentar a qualidade das cintas de *cap ply* produzidas (Figura 144).

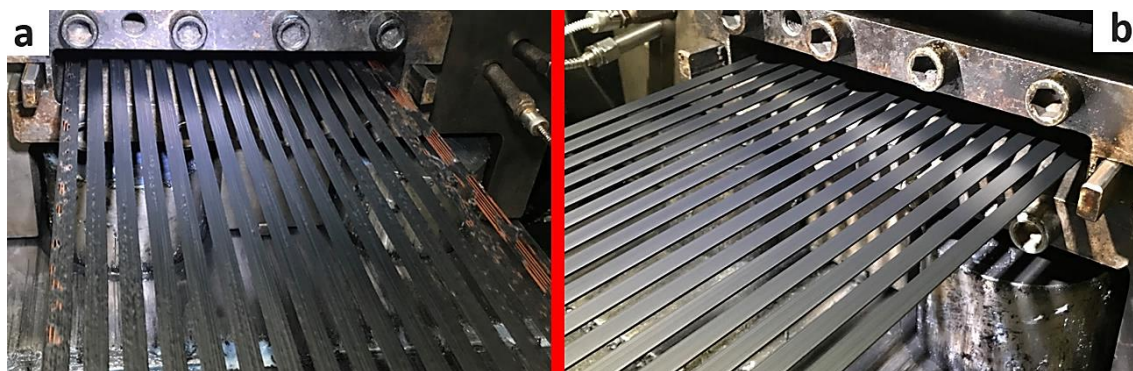


Figura 144 - Qualidade das cintas de *cap ply* (a) antes do novo controlo, (b) após instalação do novo controlo.

Após uma semana de monitorização da *Cap strip 2*, sem qualquer registo de imperfeições na produção de *cap ply*, o sistema foi então replicado para a *Cap strip 1* e *Cap strip 3*.

Entre o dia 24/05/2019 e o dia 15/07/2019 não houve qualquer registo de *scrap* relativo a falha de impregnação ou composto de borracha vulcanizada. Na Figura 145 é possível observar que o *scrap* em 2019 já assumia valores de 4166 € e 1186 kg, em apenas, cerca de, 5 meses. Habitualmente, o verão é época mais crítica em relação à geração de *scrap*, devido às elevadas temperaturas ambientais e também pela introdução de novos operadores (trabalhadores temporários) que possuem uma menor experiência. Portanto, se 2019 mantivesse a mesma

tendência, provavelmente seria o ano com maior prejuízo para a empresa, em termos de *scrap* analisado neste projeto.

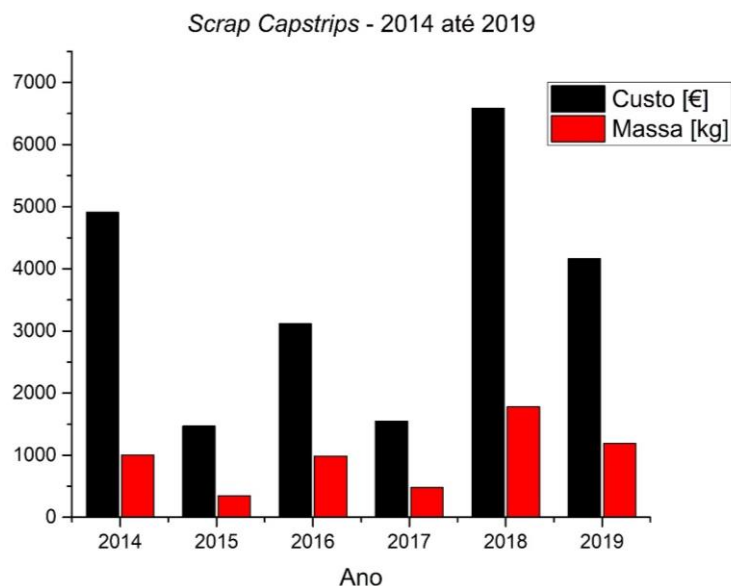


Figura 145 - *Scrap* gerado por falha de impregnação e composto de borracha vulcanizado nas *Cap strip* 1, 2 e 3, entre os anos 2014 e 2019.

Apesar de se ter monitorizado o novo controlo durante, cerca de, 2 meses, considerou-se ser prematuro retirar conclusões assertivas sobre o impacto efetivo que as soluções implementadas teriam a longo prazo. Contudo, o facto de não ter existido geração de *scrap* nesse período, permitiu concluir que a redução de *scrap* se situaria perto dos 100%.

Seria interessante também comparar os custos relativos aos tempos de *setup* de máquina e também os custos energéticos, uma vez que o novo controlo provocou bastantes alterações nesse sentido. Infelizmente, devido à falta de dados, não foi possível efetuar uma comparação nesse âmbito.

Desta forma o novo controlo permitiu garantir condições de trabalho mais seguras e menos fisicamente desgastantes para os operadores (devido à redução do número de paragens), assim como garantiu uma qualidade superior das cintas de *cap ply* produzidas. Dado que o investimento total para o novo controlo de temperatura se situa, em cerca de, 3000 €, e tendo em conta que nos últimos 6 anos a média do custo de *scrap* se situava em 3118 €, significa que o investimento pode ser amortizado em 3 anos, o que será ainda menor se for considerado os custos relativos a tempos de *setup* e custos energéticos.

CONCLUSÕES

6.1 Conclusões

6.2 Proposta de trabalhos futuros

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões

Com o presente trabalho, foi possível estabelecer um novo controlo de temperatura nas *Cap strip*, melhorando assim a qualidade das cintas de *cap ply* produzidas, tornando o processo de fabrico mais eficaz e seguro, e com um estudo científico que suporta todas as soluções implementadas.

Uma vez que foram abrangidas diversas áreas no trabalho experimental desenvolvido, e, apesar de existir uma grande interação entre as várias temáticas abordadas, foi entendido como correto apresentar as conclusões divididas por várias etapas, as quais são apresentadas seguidamente.

- Quanto aos ensaios laboratoriais:
 - a execução de ensaios *Scorch* permitiu conhecer as condições que dão origem à vulcanização prematura. As condições em que pode surgir vulcanização prematura num caso prático dependem essencialmente das temperaturas de trabalho e do tempo de exposição do composto de borracha a essas temperaturas. Com esses dados, e, comparando com os resultados dos ensaios *Scorch*, é possível prever se poderá ocorrer, ou não, vulcanização prematura no processo de fabrico em causa;
 - os ensaios no equipamento RPA foram essenciais para determinar a viscosidade dinâmica em função da temperatura e taxa de corte, para obtenção dos coeficientes da equação polimérica de segunda ordem, a aplicar no *software* de análise numérica.
- Quanto às análises numéricas:
 - as mesmas permitiram visualizar as diferenças entre ambos os métodos de regulação de temperatura do cabeçote, verificando-se que, a utilização de resistências de aquecimento pode gerar locais com temperaturas significativamente elevadas. Já a utilização das TCU com água a circular nos canais internos do cabeçote, impede que o cabeçote ascenda a temperaturas muito elevadas, uma vez que a água vaporiza a temperaturas acima de 100°C e, por isso, diminui os riscos de ocorrência de vulcanização prematura;
 - e analisando os gradientes de velocidade, foi possível perceber que no cabeçote existem zonas em que as velocidades de escoamento são extremamente reduzidas, o que provoca um aumento do tempo de residência do composto de borracha no interior do cabeçote;
 - a geração de calor por aquecimento viscoso provou ser de baixa magnitude nas análises numéricas. Contudo, seria necessário executar ensaios experimentais

para, efetivamente, quantificar o impacto que essa componente tem no processo de produção.

- Quanto ao registo de imagens termográficas:
 - foi possível recolher imagens termográficas que permitiram efetivamente verificar que o aquecimento por resistências de aquecimento gera locais com temperaturas elevadas;
 - as mesmas revelaram uma forte correlação com os resultados das análises numéricas, validando, em parte, os resultados dessas análises.
- Quanto à análise de rugosidade:
 - a caracterização das superfícies internas do cabeçote, nomeadamente, nos canais de escoamento de composto de borracha, não permitiu obter conclusões suficientes de forma a concluir o tipo de revestimento técnico aplicado no cabeçote;
- Quanto aos ensaios de extrusão:
 - o desenvolvimento de um provete de ensaio provou ser eficaz para visualizar diretamente o escoamento de composto de borracha;
 - a regulação da rugosidade superficial do canal de escoamento, em diferentes valores de rugosidade média, não causou um impacto significativo às condições de escoamento do composto de borracha;
 - a utilização de um revestimento de CrN também não provocou um impacto suficientemente notório nas condições de escoamento do composto de borracha.
- Quanto à instalação de um microcontrolador para registo de parâmetros de máquina:
 - provou ser uma solução que remete para um reduzido investimento, mantendo a qualidade e precisão dos dados registados;
 - a flexibilidade de montagem do circuito conectado ao microcontrolador permitiu colocar vários módulos responsáveis pelo registo e gravação dos dados pretendidos;
 - a programação do microcontrolador permitiu customizar todo o controlo do mesmo, adequando o funcionamento de todos os módulos e microcontrolador, às necessidades pretendidas.

Com este trabalho, verificou-se que as conclusões retiradas podem ainda ser utilizadas noutros processos de produção além das *Cap strip*, uma vez que existem outros processos que recorrem à extrusão de compostos de borracha. Fazendo a caracterização do composto de borracha utilizado nesses processos, através de ensaios laboratoriais, é necessário, posteriormente, adequar as temperaturas utilizadas ao processo de produção. O cenário ideal passa por manter a temperatura numa determinada gama (que depende do composto de borracha em uso), de forma a que a mesma não seja baixa demais e provoque um aumento da viscosidade, dificultando a extrusão do composto de borracha, e, ao mesmo tempo, limitando a temperatura máxima para que não ocorra vulcanização prematura. Para a manutenção desta gama de temperatura, devem ser realizados ensaios experimentais para determinação dos pontos críticos e de potenciais locais favoráveis à instalação de sondas de temperatura, para auxílio no controlo de temperatura da máquina em questão. Em situações em que o processo decorre em ambientes fechados e onde se torna difícil compreender os fenómenos que ocorrem nesses

ambientes, as análises numéricas permitem obter resultados aproximados relativos a esses fenômenos.

6.2 Proposta de trabalhos futuros

A realização deste trabalho, permitiu encontrar uma solução original para o controle de temperatura utilizado nas *Cap strip*, o qual revelou um desempenho extremamente positivo durante a produção de *cap ply*. No entanto, existem ainda outras vias de investigação que devem ser exploradas.

Assim, são seguidamente propostos alguns trabalhos nesta área, os quais poderão contribuir para a melhoria do processo de produção.

- Estudo com maior detalhe acerca da rugosidade dos canais de escoamento do cabeçote, de forma a compreender o seu impacto no escoamento de composto de borracha;
- Desenvolvimento de um novo provete de ensaios para ensaios de extrusão com um maior número de sensores, e.g., sensores de pressão e temperatura, de forma a controlar um maior número de variáveis associadas a esses ensaios;
- Estudo de uma nova geometria para os canais de escoamento de composto de borracha do cabeçote, através de análises numéricas e experimentais. A geometria atual do cabeçote possui zonas com mudanças de geometria abrupta (Figura 147) e que desfavorecem o escoamento do composto de borracha, aumentando assim o tempo de residência (Figura 146). Estas zonas podem contribuir para um tempo de residência superior a 30 minutos, o que, mesmo a temperaturas de trabalho abaixo de 110°C, pode originar vulcanização prematura, formando um aglomerado de composto de borracha com a dimensão de, cerca de, 10 mm de diâmetro. Este detalhe, habitualmente, não causa um impacto significativo na produção de *cap ply*. Contudo, a remoção deste aglomerado de composto de borracha com objetos metálicos aumenta o desgaste das paredes internas do cabeçote;

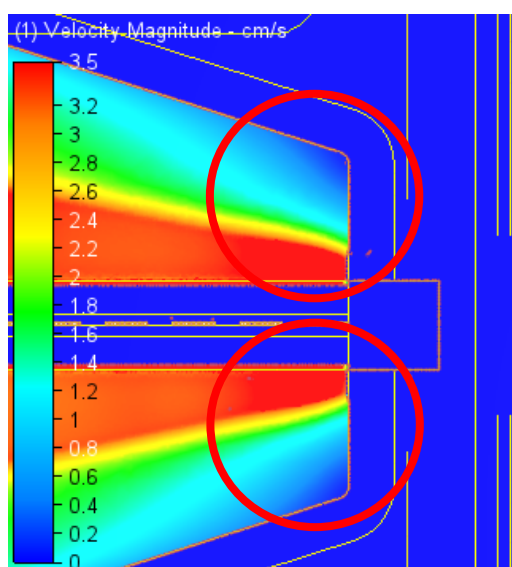


Figura 146 - Locais com magnitude de velocidade reduzida.

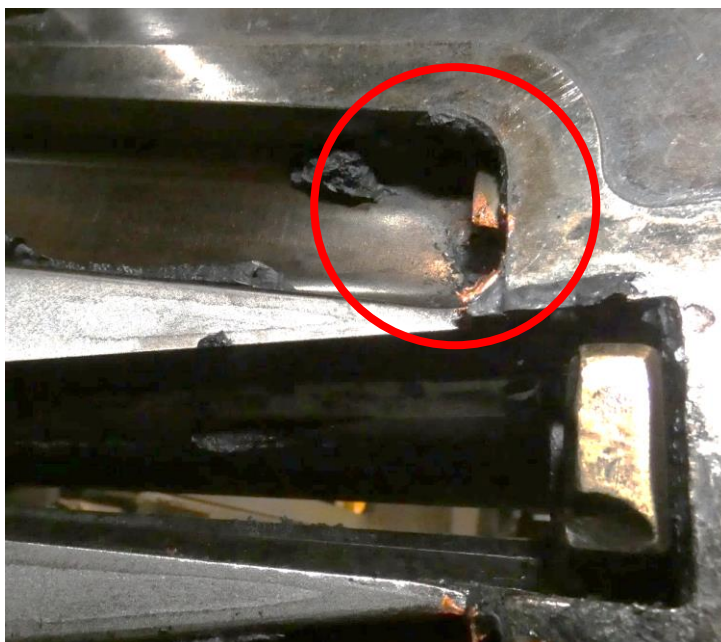


Figura 147 - Local de paragem abrupta do escoamento, reduzindo assim a magnitude da velocidade de escoamento.

- O sistema de regulação térmica com resistências de aquecimento é menos preferencial na indústria de processamento de elastómeros, uma vez que, as mesmas só permitem fornecer energia térmica. Na regulação térmica com fluidos, há a possibilidade de retirar ou fornecer energia térmica. Além disso, o aquecimento com fluidos é mais homogêneo do que com resistências de aquecimento [90]. Com base nas análises numéricas, foi possível determinar que a distribuição térmica com ambos os métodos de regulação térmica revelou várias diferenças. Futuramente deveriam ser direcionados esforços para o projeto de um cabeçote que permitissem um melhor controlo de temperatura através da implementação de várias sondas de temperatura e, também, com um sistema de regulação térmica que evitasse a geração de pontos com maior intensidade térmica e com uma simetria dessa distribuição térmica.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

7 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] Leister, G. (2018). *Passenger Car Tires and Wheels: Development - Manufacturing - Application*. ISBN: 978-3-319-50117-8
- [2] Mark, J., Erman, B., and Elrich, F. (2005). *The Science and Technology of Rubber*, 3 ed. Elsevier. ISBN: 978-0-12-394584-6
- [3] Westgate, W. K. and Gillick, J. G. (2008). Key technology developments in textiles for use in automotive tires. *Textile Advances in the Automotive Industry*, 270-297. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845695040.3.270>
- [4] Costa, C., Silva, F. J. G, Campilho, R. D. S. G., Neves, P., Godina, R., and Ferreira, S. (2019). Influence of textile cord tension in cap ply production. *Procedia Manufacturing*, 38, 1766-1774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.090>
- [5] Sommer, J. G. (2009). *Engineered Rubber Products*. Hanser. ISBN: 978-3446417311
- [6] Osborne, D. (2003). The role of cap plies in steel belted radial tires.
- [7] Continental-Mabor - Indústria de Pneus, S. A., "Formação - O pneu," ed. Direção de Industrialização do Produto, 2018.
- [8] Rodgers, B. (2015). *Rubber Compounding: Chemistry and Applications, Second Edition*. CRC Press. ISBN: 978-1482235500
- [9] Sidhardhan, S., Thomas, M., Abraham, J., and Thomas, S. (2017). *General introduction to rubber compounding*. ISBN: 978-0081004098
- [10] Billmeyer, F. (2007). *Textbook of Polymer Science*. Wiley India Pvt. Limited. ISBN: 978-8126511105
- [11] Gent, A. N. (2012). *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*. Hanser Publishers. ISBN: 978-1569905081
- [12] ASTM D 2227 - *Standard Specification for Natural Rubber (NR) Technical Grades*; American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2015.
- [13] Dick, J. S. and Rader, C. P. (2014). *Raw Materials Supply Chain for Rubber Products: Overview of the Global Use of Raw Materials, Polymers, Compounding Ingredients, and Chemical Intermediates*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG. ISBN: 978-1569905388
- [14] Wypych, G. (2016). *Handbook of Fillers*. Elsevier Science. ISBN: 978-1927885109

- [15] Farida, E., Bukit, N., Ginting, E. M., and Bukit, B. F. (2019). The effect of carbon black composition in natural rubber compound. *Case Studies in Thermal Engineering*, 16, 100566. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100566>
- [16] Rajaei, P., Ashenai Ghasemi, F., Fasihi, M., and Saberian, M. (2019). Effect of styrene-butadiene rubber and fumed silica nano-filler on the microstructure and mechanical properties of glass fiber reinforced unsaturated polyester resin. *Composites Part B: Engineering*, 173, 106-803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.014>
- [17] Osswald, K., Reincke, K., Schossig, M., Sökmen, S., and Langer, B. (2019). Influence of different types of antioxidants on the aging behavior of carbon-black filled NR and SBR vulcanizates. *Polymer Testing*, 79, 106-153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106053>
- [18] Choi, S. S. (2002). Strain and anisotropic effects on migration behaviors of antiozonants in carbon black-filled natural rubber vulcanizates. *Polymer Testing*, 21(7), 741-744. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(02\)00003-X](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(02)00003-X)
- [19] Zhao, F., Wu, C., and Shi, X. (2010). Influence of Accelerator Content on Cure Kinetics of Sulfur-vulcanized Natural Rubber. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 50(2), 398-405. DOI: <https://doi.org/10.1080/00222341003772282>
- [20] Saffar, A. and Shojaei, A. (2012). Effect of rubber component on the performance of brake friction materials. *Wear*, 274-275, 286-297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.09.012>
- [21] Vlachopoulos, J. and Strutt, D. (2003). The Role of Rheology in Polymer Extrusion.
- [22] Guerra, B., Furtado, C., and Coutinho, F. (2004). Avaliação reológica de elastômeros e suas composições. *Polímeros-ciência E Tecnologia - POLIMEROS*, 14, DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282004000400017>
- [23] Bhowmick, A. K. (2008). *Current Topics in Elastomers Research*. CRC Press. ISBN: 978-1420007183
- [24] Brown, R. (1999). *Handbook of Polymer Testing: Physical Methods*. Taylor & Francis. ISBN: 978-0824701710
- [25] Dick, J. S., Harmon, C., and Vare, A. (1999). Quality assurance of natural rubber using the rubber process analyzer. *Polymer Testing*, 18(5), 327-362. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(98\)00026-9](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(98)00026-9)
- [26] Internacional, A. (2003). *Basic Rubber Testing: Selecting Methods for a Rubber Test*. John Dick. ISBN: 9780803133587
- [27] LeMaitre, J. (2001). *Handbook of Materials Behavior Models, Three-Volume Set: Nonlinear Models and Properties*. Elsevier Science. ISBN: 978-0080533636
- [28] Demirhan, E., Kandemirli, F., Kandemirli, M., and Kovalishyn, V. (2007). Investigation of the physical and rheological properties of SBR-1712 rubber compounds by neural network approaches. *Materials & Design*, 28(5), 1737-1741. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.02.005>

- [29] Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited. ISBN: 978-0131274983
- [30] Tu, J., Yeoh, G. H., and Liu, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. Elsevier Science. ISBN: 978-0081012444
- [31] Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., and Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley. ISBN: 978-0470501979
- [32] Lewis, R. W., Nithiarasu, P., and Seetharamu, K. N. (2004). *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. Wiley. ISBN: 978-0470020814
- [33] Schnipke, R. (1986). *A streamline upwind finite element method for laminar and turbulent flow*. (Tese de Doutorado), Department of Energy. University of Virginia, USA.
- [34] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., and Nithiarasu, P. (2005). *The Finite Element Method for Fluid Dynamics*. Elsevier Science. ISBN: 978-0080455594
- [35] Wang, X., Liu, H., Wang, Y., and Zhu, Y. (2020). CFD simulation of dynamic heat transfer behaviors in super-long thermosyphons for shallow geothermal application. *Applied Thermal Engineering*, 174, 115-295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115295>
- [36] Wei, D. and Al-Ashhab, S. (2019). Existence of self-similar solutions of the two-dimensional Navier–Stokes equation for non-Newtonian fluids. *Arab Journal of Mathematical Sciences*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajmsc.2019.04.001>
- [37] Guo, B. and Guo, C. (2009). The convergence of non-Newtonian fluids to Navier–Stokes equations. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 357(2), 468-478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2009.04.027>
- [38] Sheng, W. (2020). A revisit of Navier–Stokes equation. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 80, 60-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2019.12.005>
- [39] Agroum, R., Bernardi, C., and Satouri, J. (2015). Spectral discretization of the time-dependent Navier–Stokes problem coupled with the heat equation. *Applied Mathematics and Computation*, 268, 59-82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2015.06.047>
- [40] Patankar, S. (2018). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. CRC Press. ISBN: 978-1482234213
- [41] Pereira, D. and Torii, A. (2015). Uma Introdução ao Método dos Resíduos Ponderados. DOI: <https://doi.org/10.20906/CPS/CILAMCE2015-0049>
- [42] Minkina, W. and Dudzik, S. (2009). *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*. Wiley. ISBN: 978-0470682241
- [43] Speakman, J. and Ward, S. (1998). Infrared thermography: Principles and applications. *Zoology*, 101, 224-232.

- [44] Bell, R. B., Andersen, P. A., Andersen, P. E., and Fernandes, R. (2017). *Oral, Head and Neck Oncology and Reconstructive Surgery*. Elsevier. ISBN: 978-0323265683
- [45] Vollmer, M. and Möllmann, K. P. (2017). *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley. ISBN: 978-3527693320
- [46] Bahramian, F. and Mojra, A. (2020). Thyroid cancer estimation using infrared thermography data. *Infrared Physics & Technology*, 104, 103-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103126>
- [47] Ferraris, E., Zhang, J., and Van Hooreweder, B. (2019). Thermography based in-process monitoring of Fused Filament Fabrication of polymeric parts. *CIRP Annals*, 68(1), 213-216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.123>
- [48] Garbacz, P., Giesko, T., and Mazurkiewicz, A. (2015). Inspection method of aluminium extrusion process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(3), 631-638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.02.005>
- [49] Northcutt, L. A., Orski, S. V., Migler, K. B., and Kotula, A. P. (2018). Effect of processing conditions on crystallization kinetics during materials extrusion additive manufacturing. *Polymer*, 154, 182-187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.09.018>
- [50] Plagge, J. and Klüppel, M. (2018). Determining strain-induced crystallization of natural rubber composites by combined thermography and stress-strain measurements. *Polymer Testing*, 66, 87-93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.12.021>
- [51] Ravoori, D., Lowery, C., Prajapati, H., and Jain, A. (2019). Experimental and theoretical investigation of heat transfer in platform bed during polymer extrusion based additive manufacturing. *Polymer Testing*, 73, 439-446. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.025>
- [52] Seppala, J. E. and Migler, K. D. (2016). Infrared thermography of welding zones produced by polymer extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 12, 71-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.007>
- [53] Silva, F. J. G., Ferreira, F., Costa, C., Ribeiro, M. C. S., and Meira Castro, A. C. (2012). Comparative study about heating systems for pultrusion process. *Composites Part B: Engineering*, 43(4), 1823-1829. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.057>
- [54] Silva, F. J. G. et al. (2014). Optimising the energy consumption on pultrusion process. *Composites Part B: Engineering*, 57, 13-20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.035>
- [55] Wisniewski, T., Pachla, W., Kukla, D., Mazur, A., and Kurzydłowski, K. J. (2004). Application of infrared thermography in investigation of hydrostatic extrusion. DOI: <https://doi.org/10.21611/qirt.2004.038>
- [56] Cicolani, J. (2018). *Beginning Robotics with Raspberry Pi and Arduino: Using Python and OpenCV*. Apress. ISBN: 978-1484234617

- [57] Silva, H. E., Coelho, G. B. A., and Henriques, F. M. A. (2020). Climate monitoring in World Heritage List buildings with low-cost data loggers: The case of the Jerónimos Monastery in Lisbon (Portugal). *Journal of Building Engineering*, 28, 101029. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101029>
- [58] Pereira, R. I. S., Jucá, S. C. S., and Carvalho, P. C. M. (2019). IoT embedded systems network and sensors signal conditioning applied to decentralized photovoltaic plants. *Measurement*, 142, 195-212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.085>
- [59] Toronto, U. RTD PT100 conversion table. [Online] Available: <https://www.physics.utoronto.ca/apl/fe/RTD-Pt100-Conversion.pdf>. [Accessed: 17/12/2019].
- [60] Isermann, R. and Clarke, D. W. (2013). *Digital Control Systems*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3662023198
- [61] Samal, A., Mohanty, A., Ray, P. K., Mohanty, S., and Mohanty, P. P. (2019). Implementation of digital temperature control system on photovoltaic cell model: An experimental analysis. *Optik*, 176, 324-333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.09.095>
- [62] Holmberg, K. (1992). A concept for friction mechanisms of coated surfaces. *Surface and Coatings Technology*, 56(1), 1-10. DOI: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(92\)90189-H](https://doi.org/10.1016/0257-8972(92)90189-H)
- [63] Silva, F. J. G. (2001). *Estudo da estrutura e comportamento tribológico de revestimentos duros e ultra-duros executados no vácuo*. (Tese de Doutoramento), Departamento de Engenharia Mecânica. FEUP, Porto.
- [64] Holmberg, K. and Matthews, A. (2009). *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*. Elsevier Science. ISBN: 978-0080931463
- [65] Matthews, A. and Rickerby, D. (2012). *Advanced Surface Coatings: a Handbook of Surface Engineering*. Springer Netherlands. ISBN: 978-9401053525
- [66] Silva, F. J. G., Fernandes, A. J. S., Costa, F. M., Teixeira, V., Baptista, A. P. M., and Pereira, E. (2003). Tribological behaviour of CVD diamond films on steel substrates. *Wear*, 255(7), 846-853. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00145-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00145-5)
- [67] Andrade, M. F. C., Martinho, R. P., Silva, F. J. G., Alexandre, R. J. D., and Baptista, A. P. M. (2009). Influence of the abrasive particles size in the micro-abrasion wear tests of TiAlSiN thin coatings. *Wear*, 267(1), 12-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.114>
- [68] Silva, F. J. G., Martinho, R. P., Alexandre, R., and Baptista, A. (2011). TiB₂ Nanostructured Coating for GFRP Injection Moulds. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 11, 5374-82. DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2011.3772>

- [69] Silva, F. J. G., Martinho, R. P., Alexandre, R. J. D., and Baptista, A. P. M. (2011). Increasing the wear resistance of molds for injection of glass fiber reinforced plastics. *Wear*, 271(9), 2494-2499. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.074>
- [70] Arda, D. and Mackley, M. (2005). The effect of die exit curvature, die surface roughness and a fluoropolymer additive on sharkskin extrusion instabilities in polyethylene processing. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 126(1), 14-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.innfm.2004.12.005>
- [71] Silva, F. J. G., Fernandes, L. and Alexandre, R. (2019). Study of TiAlN PVD Coating on Stamping Dies Used in Tinplate Food Package Production. *Micromachines*, 10, 182. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi10030182>
- [72] Fernandes, L., Silva, F. J. G., Andrade, M. F., Alexandre, R., Baptista, A. P. M., and Rodrigues, C. (2017). Improving the punch and die wear behavior in tin coated steel stamping process. *Surface and Coatings Technology*, 332, 174-189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.086>
- [73] Silva, F. J. G., Martinho, R., Andrade, M., Baptista, A., and Alexandre, R. (2017). Improving the Wear Resistance of Moulds for the Injection of Glass Fibre-Reinforced Plastics Using PVD Coatings: A Comparative Study. *Coatings*, 7, 28. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings7020028>
- [74] Mohd Hasan, M. H., Vernisha, F., Manroshan, S., and Ong, S. K. (2018). Effect of Butylamine Modified Kenaf Fibre on the Properties of Natural Rubber Compounds and Vulcanizates. *Materials Today: Proceedings*, 5(10, Part 2), 21973-21980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.07.058>
- [75] Poh, B. T. and Ng, C. C. (1998). Effect of silane coupling agents on the mooney scorch time of silica-filled natural rubber compound. *European Polymer Journal*, 34(7), 975-979. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(97\)00211-5](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(97)00211-5)
- [76] Ngolemasango, F. E., Nkeng, G. E., O'Connor, C., Manley, J., Bennett, M., and Clarke, J. (2009). Effect of nature and type of flaw on the properties of a natural rubber compound. *Polymer Testing*, 28(5), 463-469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2009.02.007>
- [77] H. Lee, C. and T. Poh, B. (1985). Temperature dependence of mooney scorch time of rubber compounds. *Journal of Applied Polymer Science*, 30, 71-81. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.1985.070300106>
- [78] Sadequl, A. M., Ishiaku, U. S., Ismail, H., and Poh, B. T. (1998). The effect of accelerator/sulphur ratio on the scorch time of epoxidized natural rubber. *European Polymer Journal*, 34(1), 51-57. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(97\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(97)00067-0)
- [79] Kim, K.-J. and VanderKooi, J. (2005). Moisture Effects on TESPd-Silica/CB/SBR Compounds. *Rubber Chemistry and Technology*, 78(1), 84-104. DOI: <https://doi.org/10.5254/1.3547875>

- [80] Braendle, H. A. and Wiegand, W. B. (1945). Effect of Moisture on Curing Rate of GR-S. *Rubber Chemistry and Technology*, 18(1), 141-148. DOI: <https://doi.org/10.5254/1.3543188>
- [81] Choi, S.-S., Park, B.-H., and Song, H. (2004). Influence of filler type and content on properties of styrene-butadiene rubber (SBR) compound reinforced with carbon black or silica. *Polymers for Advanced Technologies*, 15(3), 122-127. DOI: <https://doi.org/10.1002/pat.421>
- [82] Maridass, B. and Gupta, B. (2006). Effect of Carbon Black on Devulcanized Ground Rubber Tire—Natural Rubber Vulcanizates: Cure Characteristics and Mechanical Properties. *Journal of Elastomers and Plastics*, 38, 211-229. DOI: <https://doi.org/10.1177/0095244306063480>
- [83] Ravikumar, K., Palanivelu, K., and Ravichandran, K. (2019). Dielectric Properties of Natural Rubber Composites filled with Graphite. *Materials Today: Proceedings*, 16, 1338-1343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.233>
- [84] ISO 289-1 - *Rubber, unvulcanized - Determinations using a shearing-disc viscometer - Part 1: Determination of Mooney viscosity*; International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2015.
- [85] ASTM D1646 - *Standard Test Methods for Rubber-Viscosity, Stress Relaxation, and Pre-Vulcanization Characteristics (Mooney Viscometer)*; American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2019.
- [86] ISO 13145 - *Rubber-Determination of viscosity and stress relaxation using a rotorless sealed shear rheometer*; International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2012.
- [87] MatWeb. Natural Rubber, Not Vulcanized (NR, IR, Polyisoprene). [Online] Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=da912e0c50154649a201d8f7abbf7e90>. [Accessed: 23/07/2019].
- [88] Hubbe, M. et al. (2017). Rheology of nanocellulose-rich aqueous suspensions: A review. *BioResources*, 12, 9556-9661. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.12.4.Hubbe>
- [89] Autodesk. Second Order Polymer (Viscosity). [Online] Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/SimCFD-UsersGuide/files/GUID-A09EF3E6-E796-42E9-AEA3-99AA046531BA-htm.html>. [Accessed: 07/11/2018].
- [90] Hopmann, C. and Michaeli, W. (2016). *Extrusion Dies for Plastics and Rubber: Design and Engineering Computations*. ISBN: 978-1569906231

ANEXOS

- 8.1 ANEXO 1 – Equação da conservação da massa
- 8.2 ANEXO 2 – Equação da conservação de momento
- 8.3 ANEXO 3 – Equação da conservação de energia
- 8.4 ANEXO 4 – Tabela de conversão de valores para RTD PT100
- 8.5 ANEXO 5 – Programa de leitura e registo de temperatura
- 8.6 ANEXO 6 – Relatórios de ensaios *Scorch* – Composto com passagem no moinho
- 8.7 ANEXO 7 – Relatórios de ensaios *Scorch* – Composto sem passagem no moinho
- 8.8 ANEXO 8 – Relatórios de ensaios RPA – Composto sem passagem no moinho
- 8.9 ANEXO 9 – Relatórios de ensaios RPA – Composto com passagem no moinho
- 8.10 ANEXO 10 – Desenho técnico do cabeçote de uma *Cap strip*
- 8.11 ANEXO 11 – Desenho técnico do equipamento para ensaios de extrusão
- 8.12 ANEXO 12 – Desenho técnico do adaptador para sonda térmica (Arduino®)
- 8.13 ANEXO 13 – Desenho técnico do adaptador para a nova sonda RTD PT100

8 ANEXOS

8.1 ANEXO 1 – Equação da conservação da massa

Para a derivação da equação de conservação de massa é necessário, em primeiro lugar, efetuar o balanço mássico para o elemento, em que “a taxa de aumento de massa num elemento fluido é igual à taxa líquida de fluxo de massa nesse elemento.”[29]. A taxa de aumento de massa no elemento fluido, considerando o sistema de coordenadas cartesiano, é dada por [29],

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \delta_x \delta_y \delta_z \quad (41)$$

A taxa de fluxo de massa que atravessa uma face do elemento é dada pelo produto entre a densidade, área e a componente da velocidade normal a essa face. Fluxos que estão direcionados para o interior do elemento provocam um aumento da massa no elemento e por isso são representados por um sinal positivo, ao contrário dos fluxos que abandonam o elemento, sendo por isso, representados por sinal negativo, conforme se pode observar na Figura 148.

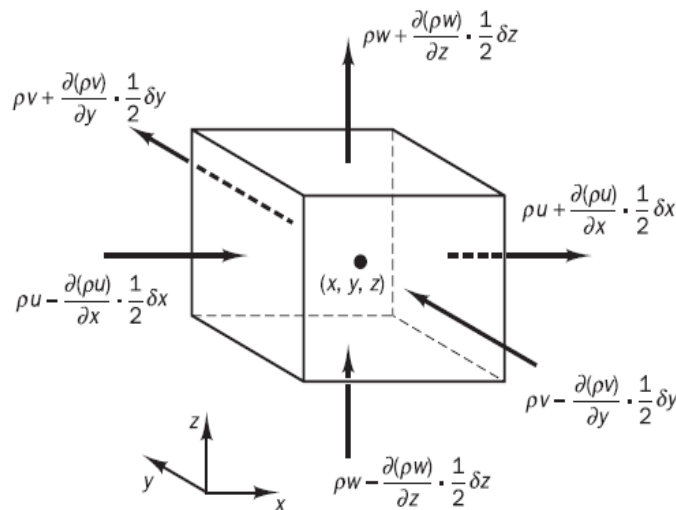


Figura 148 - Fluxos de massa de entrada e saída para o elemento fluido [29].

De acordo com a Figura 148, a taxa líquida do fluxo de massa do elemento através das suas fronteiras é dada por,

$$\begin{aligned}
& \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta_x \right) \delta_y \delta_z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta_x \right) \delta_y \delta_z \\
& + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta_y \right) \delta_x \delta_z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta_y \right) \delta_x \delta_z \\
& + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta_z \right) \delta_x \delta_y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta_z \right) \delta_x \delta_y
\end{aligned} \tag{42}$$

A taxa de aumento de massa no interior de um elemento (41) é então igualada à taxa líquida de fluxo de massa (42). Dividindo os termos pelo volume do elemento resulta,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{43}$$

A equação (43) representa a conservação de massa em três dimensões. Frequentemente na literatura esta equação é denominada por equação de continuidade num ponto para fluidos compressíveis. Para fluidos incompressíveis, i.e. líquidos, a densidade permanece constante e então,

$$\text{div}(\mathbf{u}) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{44}$$

8.2 ANEXO 2 – Equação da conservação de momento

Nas leis de conservação de momento e energia faz-se referência à mudança de propriedades numa partícula do fluido, denominada por aproximação de Lagrange. Cada propriedade dessa partícula é função da posição e do tempo. Assumindo uma qualquer propriedade por unidade de massa como ϕ , a sua derivada com respeito ao tempo será [29]:

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial z} \frac{dz}{dt} \quad (45)$$

Substituindo pelas componentes da velocidade,

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} u + \frac{\partial\phi}{\partial y} v + \frac{\partial\phi}{\partial z} w \quad (46)$$

Tal como na equação da conservação da massa, o maior interesse está em desenvolver equações com taxas de mudança por unidade de volume. A taxa de mudança de qualquer propriedade ϕ por unidade de volume é dada pelo produto da sua derivada com a densidade, consequentemente,

$$\rho \frac{D\phi}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad } \phi \right) \quad (47)$$

O somatório da taxa de mudança da densidade no tempo e o termo convectivo na equação da conservação da massa é,

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}) = \rho \left[\frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}\phi \right] + \phi \left[\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}) \right] = \rho \frac{D\phi}{Dt} \quad (48)$$

De salientar que o termo $\phi[(\partial\rho/\partial t) + \text{div}(\rho\mathbf{u})]$ é nulo, devido à conservação da massa.

A relação apresentada na equação (48) indica que o somatório da taxa de aumento de uma propriedade ϕ do elemento com a taxa líquida de fluxo de ϕ do elemento é igual à taxa de aumento de ϕ na partícula do fluido.

Com isto, é possível descrever as componentes do momento em três dimensões.

A segunda lei de Newton indica que a taxa de mudança de momento de uma partícula no fluido é igual à soma das forças nessa partícula. As taxas de aumento das componentes do momento por unidade de volume numa partícula do fluido são,

$$\rho \frac{Du}{Dt} \quad \rho \frac{Dv}{Dt} \quad \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (49)$$

As forças nos fluidos podem ser forças na superfície (pressão, forças viscosas, forças gravíticas) e forças no corpo (forças centrífugas, forças de *Coriolis* e forças eletromagnéticas). A pressão é denominada por p e as tensões viscosas por τ_{ij} (Figura 149).

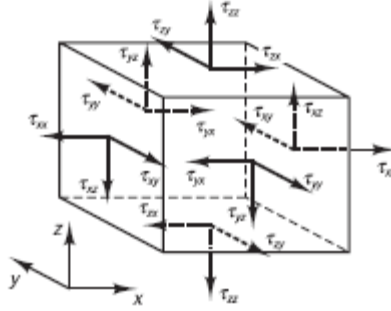


Figura 149 - Cubo de tensões para um elemento fluido [29].

Nas faces E e W (Figura 15) deduz-se que,

$$\begin{aligned} & \left[\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z + \left[- \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\ & = \left(- \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z \end{aligned} \quad (50)$$

A força na direção x nas faces N e S (Figura 15) é,

$$- \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (51)$$

A força na direção x nas faces T e B (Figura 15) é,

$$- \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (52)$$

Portanto, a força total por unidade de volume devido às forças de superfície é igual à soma das equações (50), (51) e (52) a dividir pelo volume do elemento, i.e., $\delta x \delta y \delta z$, resultando,

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (53)$$

Para incluir as forças de corpo define-se uma fonte, S_{Mx} , de momento por unidade de volume e tempo. Através do equilíbrio entre a taxa de mudança de momento e a força numa dada direção do elemento, devido às forças superficiais, a taxa de incremento de momento devido a fontes externas é dada por:

- Componente x do momento,

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (54)$$

- Componente y do momento,

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (55)$$

- Componente z do momento,

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (56)$$

8.3 ANEXO 3 – Equação da conservação de energia

A taxa de incremento de energia num elemento fluido é igual à soma da taxa líquida de calor adicionado ao elemento, com a taxa líquida de trabalho aplicada a esse elemento. A taxa de incremento de energia é dada por,

$$\rho \frac{DE}{Dt} \quad (57)$$

O trabalho realizado num elemento devido a forças na sua superfície é igual ao produto da força com a componente da velocidade na direção da força. Assim, o trabalho é dado por,

$$\begin{aligned} & \left[\left(pu - \frac{\partial(pu)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(\tau_{xx}u - \frac{\partial(\tau_{xx}u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right. \\ & \left. - \left(pu + \frac{\partial(pu)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left(\tau_{xx}u + \frac{\partial(\tau_{xx}u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\ & + \left[- \left(\tau_{yx}u - \frac{\partial(\tau_{yx}u)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) + \left(\tau_{yx}u + \frac{\partial(\tau_{yx}u)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \right] \delta x \delta z \\ & + \left[- \left(\tau_{zx}u - \frac{\partial(\tau_{zx}u)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) + \left(\tau_{zx}u + \frac{\partial(\tau_{zx}u)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \right] \delta x \delta y \end{aligned} \quad (58)$$

O trabalho total, por unidade de volume, num elemento é dado pela soma de todas as forças nas superfícies a dividir pelo volume $\delta x \delta y \delta z$. A taxa de trabalho do elemento devido às tensões de superfície é,

$$\begin{aligned} [-\text{div}(pu)] + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \\ + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{aligned} \quad (59)$$

em que,

$$[-\text{div}(pu)] = -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} \quad (60)$$

A geração de calor devido à condução de calor pode ser descrita utilizando um vetor para o fluxo de calor com três componentes,

$$q = \begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix}$$

A taxa líquida de transferência de calor devido ao fluxo de calor na direção x é dada pela diferença entre a taxa de calor que entra na face W (Figura 15) e a taxa de calor que sai pela face E (Figura 15) obtendo-se,

$$\left[\left(q_x - \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z = \frac{\partial q_x}{\partial x} \delta x \delta y \delta z \quad (61)$$

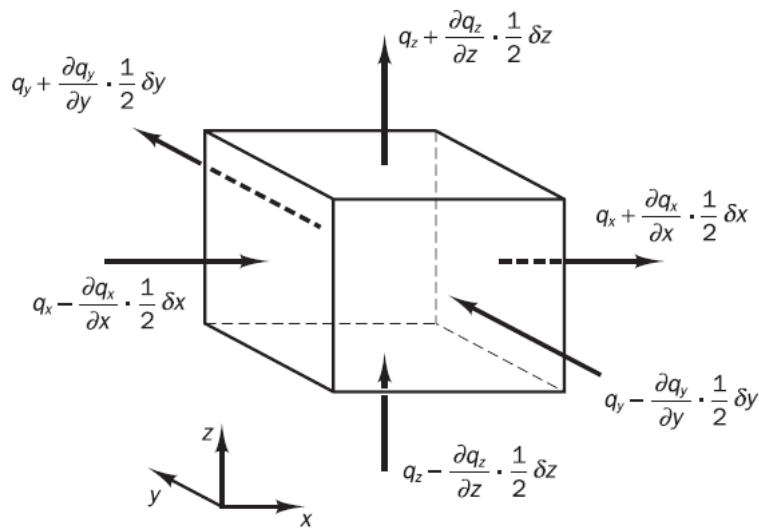


Figura 150 - Componentes do vetor de fluxo de calor [29].

Com base na equação (61), é fácil compreender que as taxas de transferência de calor para as direções y (62) e z (63) são,

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (62)$$

$$\frac{\partial q_z}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (63)$$

A lei de Fourier da condução de calor relaciona o fluxo de calor com o gradiente de temperatura, i.e.,

$$q_x = -K \frac{\partial T}{\partial x} \quad (64)$$

$$q_y = -K \frac{\partial T}{\partial y} \quad (65)$$

$$q_z = -K \frac{\partial T}{\partial z} \quad (66)$$

As equações (64), (65) e (66) podem ser escritas numa forma mais simplificada,

$$q = -K \text{ grad } T \quad (67)$$

Definindo uma fonte de energia como S_E , a conservação de energia por unidade de volume e tempo de um elemento fluido é dada pela igualdade entre a equação (57) e a soma das equações (59) e (67). Daí resulta que [29],

$$\begin{aligned} \rho \frac{DE}{Dt} = & -\text{div}(pu) + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \text{div}(-K \text{ grad } T) + S_E \end{aligned} \quad (68)$$

8.4 ANEXO 4 – Tabela de conversão de valores para RTD PT100

Tabela de conversão de valores para sensores RTD PT100 [59].

Temperature Conversion Table										RT Table			
Platinum Resistance (-200°C to 239°C)													
Temperature Coefficient - 0.00385 Ohms/Ohm/°C													
°C	Ohms	°C	Ohms	°C	Ohms	°C	Ohms	°C	Ohms	°C	Ohms	°C	Ohms
-200	18.49	-137	45.11	-74	70.73	-11	95.69	51	119.78	114	143.80	177	167.35
-199	18.93	-136	45.52	-73	71.13			52	120.16	115	144.17	178	167.72
-198	19.36	-135	45.94	-72	71.53	-10	96.09	53	120.55	116	144.55	179	168.09
-197	19.79	-134	46.35	-71	71.93	-9	96.48	54	120.93	117	144.93		
-196	20.22	-133	46.76			-8	96.87	55	121.32	118	145.31	180	168.46
-195	20.65	-132	47.18	-70	72.33	-7	97.26	56	121.70	119	145.68	181	168.83
-194	21.08	-131	47.59	-69	72.73	-6	97.65	57	122.09			182	169.20
-193	21.51			-68	73.13	-5	98.04	58	122.47	120	146.06	183	169.57
-192	21.94	-130	48.00	-67	73.53	-4	98.44	59	122.86	121	146.44	184	169.94
-191	22.37	-129	48.41	-66	73.93	-3	98.83			122	146.81	185	170.31
		-128	48.82	-65	74.33	-2	99.22	60	123.24	123	147.19	186	170.68
-190	22.80	-127	49.23	-64	74.73	-1	99.61	61	123.62	124	147.57	187	171.05
-189	23.23	-126	49.64	-63	75.13			62	124.01	125	147.94	188	171.42
-188	23.66	-125	50.06	-62	75.53	0	100.00	63	124.39	126	148.32	189	171.79
-187	24.09	-124	50.47	-61	75.93	1	100.39	64	124.77	127	148.70		
-186	24.52	-123	50.88			2	100.78	65	125.16	128	149.07	190	172.16
-185	24.94	-122	51.29	-60	76.33	3	101.17	66	125.54	129	149.45	191	172.53
-184	25.37	-121	51.70	-59	76.73	4	101.56	67	125.92			192	172.90
-183	25.80			-58	77.13	5	101.95	68	126.31	130	149.82	193	173.26
-182	26.23	-120	52.11	-57	77.52	6	102.34	69	126.69	131	150.20	194	173.63
-181	26.65	-119	52.52	-56	77.92	7	102.73			132	150.57	195	174.00
		-118	52.92	-55	78.32	8	103.12	70	127.07	133	150.95	196	174.37
-180	27.08	-117	53.33	-54	78.72	9	103.51	71	127.45	134	151.33	197	174.74
-179	27.50	-116	53.74	-53	79.11			72	127.84	135	151.70	198	175.10
-178	27.93	-115	54.15	-52	79.51	10	103.90	73	128.22	136	152.08	199	175.47
-177	28.35	-114	54.56	-51	79.91	11	104.29	74	128.60	137	152.45		
-176	28.78	-113	54.97			12	104.68	75	128.98	138	152.83	200	175.84
-175	29.20	-112	55.38	-50	80.31	13	105.07	76	129.37	139	153.20	201	176.21
-174	29.63	-111	55.78	-49	80.70	14	105.46	77	129.75			202	176.57
-173	30.05			-48	81.10	15	105.85	78	130.13	140	153.58	203	176.94
-172	30.47	-110	56.19	-47	81.50	16	106.24	79	130.51	141	153.95	204	177.31
-171	30.90	-109	56.60	-46	81.89	17	106.63			142	154.32	205	177.68
		-108	57.00	-45	82.29	18	107.02	80	130.89	143	154.70	206	178.04
-170	31.32	-107	57.41	-44	82.69	19	107.40	81	131.27	144	155.07	207	178.41
-169	31.74	-106	57.82	-43	83.08			82	131.66	145	155.45	208	178.78
-168	32.16	-105	58.22	-42	83.48	20	107.79	83	132.04	146	155.82	209	179.14
-167	32.59	-104	58.63	-41	83.88	21	108.18	84	132.42	147	156.19		
-166	33.01	-103	59.04			22	108.57	85	132.80	148	156.57	210	179.51
-165	33.43	-102	59.44	-40	84.27	23	108.96	86	133.18	149	156.94	211	179.88
-164	33.85	-101	59.85	-39	84.67	24	109.35	87	133.56			212	180.24
-163	34.27			-38	85.06	25	109.73	88	133.94	150	157.31	213	180.61
-162	34.69	-100	60.25	-37	85.46	26	110.12	89	134.32	151	157.69	214	180.97
-161	35.11	-99	60.66	-36	85.85	27	110.51			152	158.06	215	181.34
		-98	61.06	-35	86.25	28	110.90	90	134.70	153	158.43	216	181.71
-160	35.53	-97	61.47	-34	86.64	29	111.28	91	135.08	154	158.81	217	182.07
-159	35.95	-96	61.87	-33	87.04			92	135.46	155	159.18	218	182.44
-158	36.37	-95	62.28	-32	87.43	30	111.67	93	135.84	156	159.55	219	182.80
-157	36.79	-94	62.68	-31	87.83	31	112.06	94	136.22	157	159.93		
-156	37.21	-93	63.09			32	112.45	95	136.60	158	160.30	220	183.17
-155	37.63	-92	63.49	-30	88.22	33	112.83	96	136.98	159	160.67	221	183.53
-154	38.04	-91	63.90	-29	88.62	34	113.22	97	137.36			222	183.90
-153	38.46			-28	89.01	35	113.61	98	137.74	160	161.04	223	184.26
-152	38.88	90	64.30	-27	89.40	36	113.99	99	138.12	161	161.42	224	184.63
-151	39.30	-89	64.70	-26	89.80	37	114.38			162	161.79	225	184.99
		-88	65.11	-25	90.19	38	114.77	100	138.50	163	162.16	226	185.36
-150	39.71	-87	65.51	-24	90.59	39	115.15	101	138.88	164	162.53	227	185.72
-149	40.13	-86	65.91	-23	90.98			102	139.26	165	162.90	228	186.09
-148	40.55	-85	66.31	-22	91.37	40	115.54	103	139.64	166	163.27	229	186.45
-147	40.96	-84	66.72	-21	91.77	41	115.93	104	140.02	167	163.65		
-146	41.38	-83	67.12			42	116.31	105	140.39	168	164.02	230	186.82
-145	41.79	-82	67.52	-20	92.16	43	116.70	106	140.77	169	164.39	231	187.18
-144	42.21	-81	67.92	-19	92.55	44	117.08	107	141.15			232	187.54
-143	42.63			-18	92.95	45	117.47	108	141.53	170	164.76	233	187.91
-142	43.04	-80	68.33	-17	93.34	46	117.85	109	141.91	171	165.13	234	188.27
-141	43.45	-79	68.73	-16	93.73	47	118.24			172	165.50	235	188.63
		-78	69.13	-15	94.12	48	118.62	110	142.29	173	165.87	236	189.00
-140	43.87	-77	69.53	-14	94.52	49	119.01	111	142.66	174	166.24	237	189.36
-139	44.28	-76	69.93	-13	94.91			112	143.04	175	166.61	238	189.72
-138	44.70	-75	70.33	-12	95.30	50	119.40	113	143.42	176	166.98	239	190.09

Temperature Conversion Table

RT Table

Platinum Resistance (240°C to 629°C)

Temperature Coefficient - 0.00385 Ohms/Ohm/°C

°C	Ohms	°C	Ohms	°C	Ohms	°C	Ohms	°C	Ohms	°C	Ohms	°C	Ohms
240	190.45	301	212.37	362	233.87	423	254.93	484	275.56	545	295.75	606	315.52
241	190.81	302	212.73	363	234.22	424	255.27	485	275.89	546	296.08	607	315.84
242	191.18	303	213.09	364	234.56	425	255.61	486	276.23	547	296.41	608	316.16
243	191.54	304	213.44	365	234.91	426	255.95	487	276.56	548	296.74	609	316.48
244	191.90	305	213.80	366	235.26	427	256.29	488	276.89	549	297.06		
245	192.26	306	214.15	367	235.61	428	256.63	489	277.23			610	316.80
246	192.63	307	214.51	368	235.96	429	258.98			550	297.39	611	317.12
247	192.99	308	214.86	369	236.31			490	277.56	551	297.72	612	317.44
248	193.35	309	215.22			430	257.32	491	277.90	552	298.04	613	317.76
249	193.71			370	236.65	431	257.66	492	278.23	553	298.37	614	318.08
		310	215.57	371	237.00	432	258.00	493	278.56	554	298.70	615	318.40
250	194.07	311	215.93	372	237.35	433	258.34	494	278.90	555	299.02	616	318.72
251	194.44	312	216.28	373	237.70	434	258.68	495	279.23	556	299.35	617	319.04
252	194.80	313	216.64	374	238.04	435	259.02	496	279.56	557	299.68	618	319.36
253	195.16	314	216.99	375	238.39	436	259.36	497	279.90	558	300.00	619	319.68
254	195.52	315	217.35	376	238.74	437	259.70	498	280.23	559	300.33		
255	195.88	316	217.70	377	239.09	438	260.04	499	280.56			620	319.99
256	196.24	317	218.05	378	239.43	439	260.38			560	300.65	621	320.31
257	196.60	318	218.41	379	239.78			500	280.90	561	300.98	622	320.63
258	196.96	319	218.76			440	260.72	501	281.23	562	301.31	623	320.95
259	197.33			380	240.13	441	261.06	502	281.56	563	301.63	624	321.27
		320	219.12	381	240.47	442	261.40	503	281.89	564	301.96	625	321.59
260	197.69	321	219.47	382	240.82	443	261.74	504	282.23	565	302.28	626	321.91
261	198.05	322	219.82	383	241.17	444	262.08	505	282.56	566	302.61	627	322.22
262	198.41	323	220.18	384	241.51	445	262.42	506	282.89	567	302.93	628	322.54
263	198.77	324	220.53	385	241.86	446	262.76	507	283.22	568	303.26	629	322.86
264	199.13	325	220.88	386	242.20	447	263.10	508	283.55	569	303.58		
265	199.49	326	221.24	387	242.55	448	263.43	509	283.89				
266	199.85	327	221.59	388	242.90	449	236.77			570	303.91		
267	200.21	328	221.94	389	243.24			510	284.22	571	304.23		
268	200.57	329	222.29			450	264.11	511	284.55	572	304.56		
269	200.93			390	243.59	451	264.45	512	284.88	573	304.88		
		330	222.65	391	243.93	452	264.79	513	285.21	574	305.20		
270	201.29	331	223.00	392	244.28	453	265.13	514	285.54	575	305.53		
271	201.65	332	223.35	393	244.62	454	265.46	515	285.87	576	305.85		
272	202.01	333	223.70	394	244.97	455	265.80	516	286.21	577	306.18		
273	202.36	334	224.06	395	245.31	456	266.14	517	286.54	578	306.50		
274	202.72	335	224.41	396	245.66	457	266.48	518	286.87	579	306.82		
275	203.08	336	224.76	397	246.00	458	266.82	519	287.20				
276	203.44	337	225.11	398	246.35	459	267.15			580	307.15		
277	203.80	338	225.46	399	246.69			520	287.53	581	307.47		
278	204.16	339	225.81			460	267.49	521	287.86	582	307.79		
279	204.52			400	247.04	461	267.83	522	288.19	583	308.12		
		340	226.17	401	247.38	462	268.17	523	288.52	584	308.44		
280	204.88	341	226.52	402	247.72	463	268.50	524	288.85	585	308.76		
281	205.23	342	226.87	403	248.07	464	268.84	525	289.18	586	309.09		
282	205.59	343	227.22	404	248.41	465	269.18	526	289.51	587	309.41		
283	205.95	344	227.57	405	248.76	466	269.51	527	289.84	588	309.73		
284	206.31	345	227.92	406	249.10	467	269.85	528	290.17	589	310.05		
285	206.67	346	228.27	407	249.45	468	270.19	529	290.50				
286	207.02	347	228.62	408	249.79	469	270.52			590	310.38		
287	207.38	348	228.97	409	250.13			530	290.83	591	310.70		
288	207.74	349	229.32			470	270.86	531	291.16	592	311.02		
289	208.10			410	250.48	471	271.20	532	291.49	593	311.34		
		350	229.67	411	250.82	472	271.53	533	291.81	594	311.66		
290	208.45	351	230.02	412	251.16	473	271.87	534	292.14	595	311.99		
291	208.81	352	230.37	413	251.50	474	272.20	535	292.47	596	312.31		
292	209.17	353	230.72	414	251.85	475	272.54	536	292.80	597	312.63		
293	209.52	354	231.07	415	252.19	476	272.88	537	293.13	598	312.95		
294	209.88	355	231.42	416	252.53	477	273.21	538	293.46	599	313.27		
295	210.24	356	231.77	417	252.87	478	273.55	539	293.79				
296	210.59	357	232.12	418	253.22	479	273.88			600	313.59		
297	210.95	358	232.47	419	253.56			540	294.11	601	313.91		
298	211.31	359	232.82			480	274.22	541	294.44	602	314.24		
299	211.66			420	253.90	481	274.55	542	294.77	603	314.56		
		360	233.17	421	254.24	482	274.89	543	295.10	604	314.88		
300	212.02	361	233.52	422	254.59	483	275.22	544	295.43	605	315.20		

8.5 ANEXO 5 – Programa de leitura e registo de temperatura

```
#include <Adafruit_MAX31865.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>

// Ordem SPI: CS, DI, DO, CLK
Adafruit_MAX31865 max = Adafruit_MAX31865(4, 5, 6, 7);

#define RREF      430 //Resistência PT100
#define RNOMINAL 100 //Resistência a zero graus celsius

File myFile;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Medição Temperatura RTD PT100");
  while (!Serial) {
    ;
  }
  Serial.println("Adaptador SD a iniciar.");
  max.begin(MAX31865_3WIRE);

  if (!SD.begin(10)) {
    Serial.println("Cartão não colocado ou corrompido!");
    while (1);
  }
  Serial.println("Cartão pronto.");

  myFile = SD.open("LOGCapStrip.txt", FILE_WRITE);

}

int chipselect = 10;
int ledpin = 2;
double tempo = 30000;      //TEMPO DE INTERVALO DE LEITURA [ms].
int medicoes=2880;         // NÚMERO DE MEDIÇÕES A FAZER [-].
```

```
void loop() {  
  for (int amostras = 0; amostras < medicoes; amostras++) {  
    uint16_t rtd = max.readRTD();  
    pinMode(chipselect, OUTPUT);  
    pinMode(SS, OUTPUT);  
    pinMode(ledpin, OUTPUT);  
    Serial.print(tempo1 / 1000); Serial.print("s, Temperatura [°C] = "); Serial.println(max.temperature(RNOMINAL, RREF));  
    double medicao = (max.temperature(RNOMINAL, RREF));  
    myFile.print(tempo1 / 1000); myFile.print(","); myFile.println(medicao);  
    tempo1 = tempo1 + tempo; //incrementação  
    digitalWrite(ledpin, LOW);  
    delay(tempo-2000);  
    digitalWrite(ledpin, HIGH);  
    delay(2000);  
    myFile.flush();  
    {  
  
    }  
  }  
  
  myFile.close();  
  while(1) {  
    digitalWrite(ledpin, LOW);  
  }  
}
```

8.6 ANEXO 6 – Relatórios de ensaios *Scorch* – Composto com passagem no moinho

Continental Mabor
Lousado



4/30/2019 11:00:08 AM

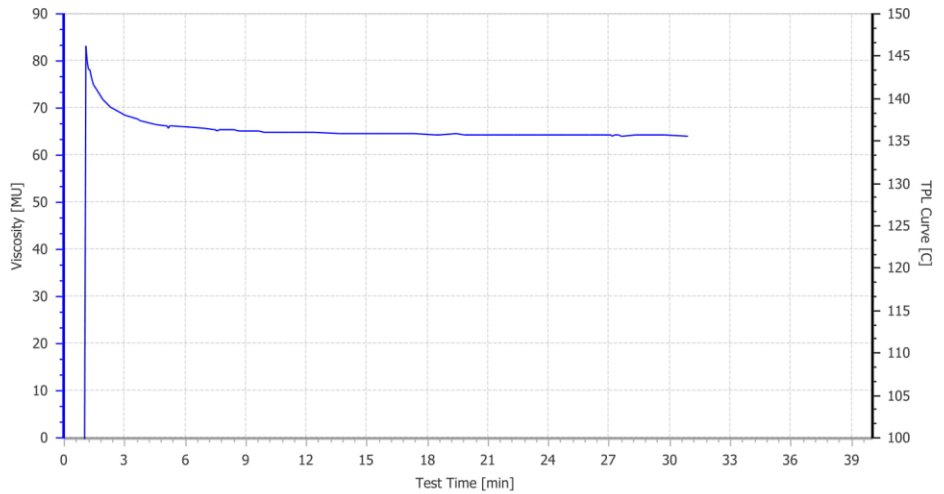
Complete Result

Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0053
Caply Skimcoat Compound
Test: Scorch80

Batch S2M Specification Date/Time 4/5/2019 4:23 PM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	80	C					Setpoint
Mm	63.75	MU					Tested
T5		min					Invalid



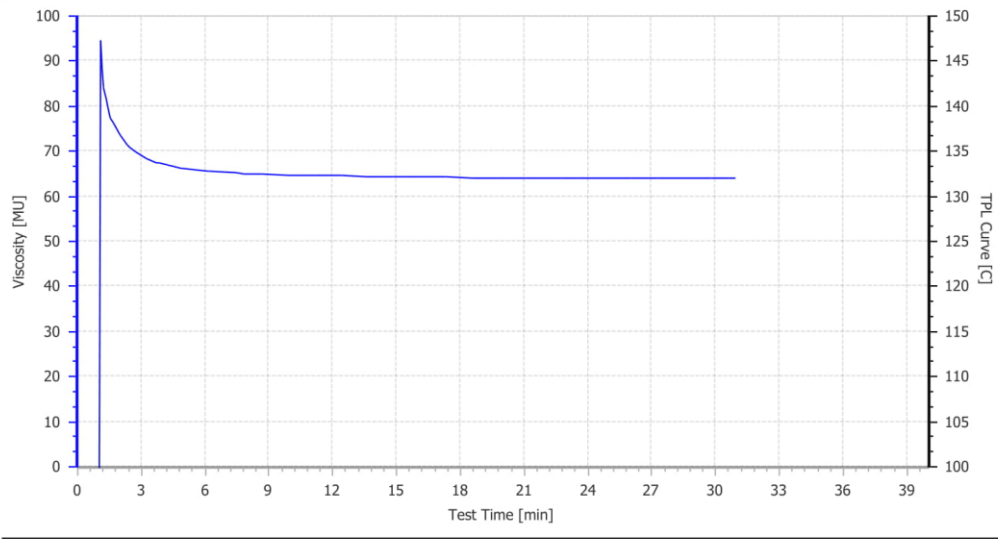
Continental Mabor
Lousado



4/30/2019 11:00:54 AM **Complete Result** Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0053
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch80
Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
S3M 4/8/2019 9:57 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	80	C					Setpoint
Mm	63.76	MU					Tested
T5		min					Invalid



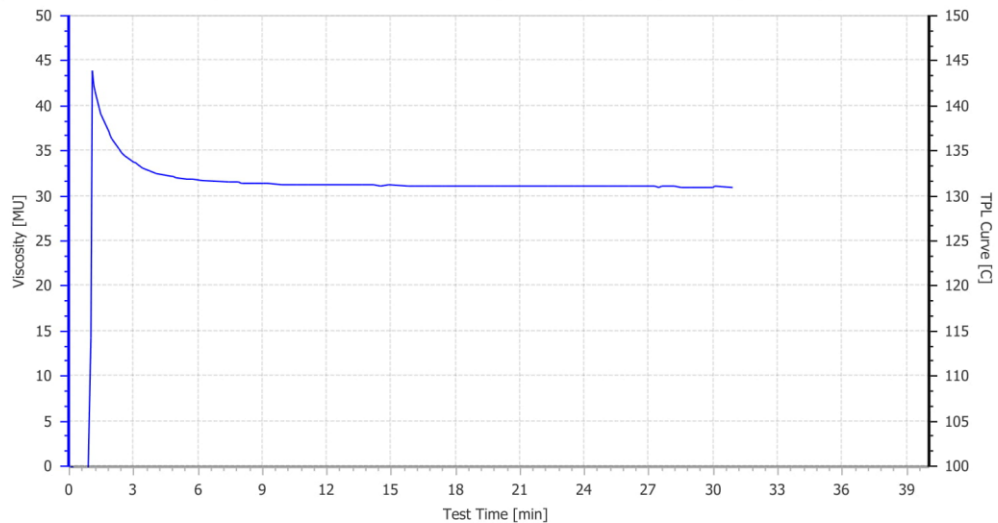
Continental Mabor
Lousado



4/30/2019 11:01:35 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190408-0010
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch90
Batch S4M Specification Date/Time 4/8/2019 11:13 AM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	90	C					Setpoint
Mm	30.90	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

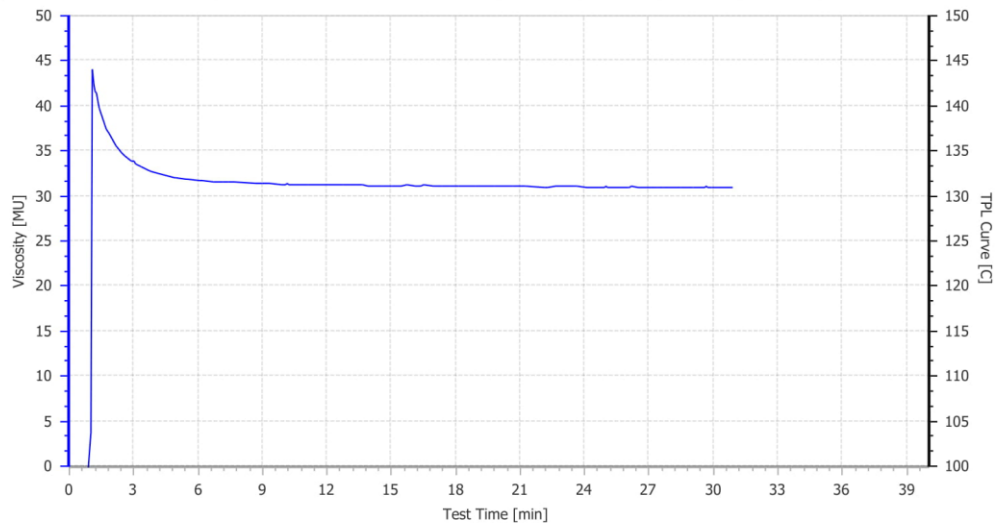


4/30/2019 11:02:33 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190408-0010
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch90

Batch S5M Specification Date/Time 4/8/2019 12:18 PM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	90	C					Setpoint
Mm	30.87	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

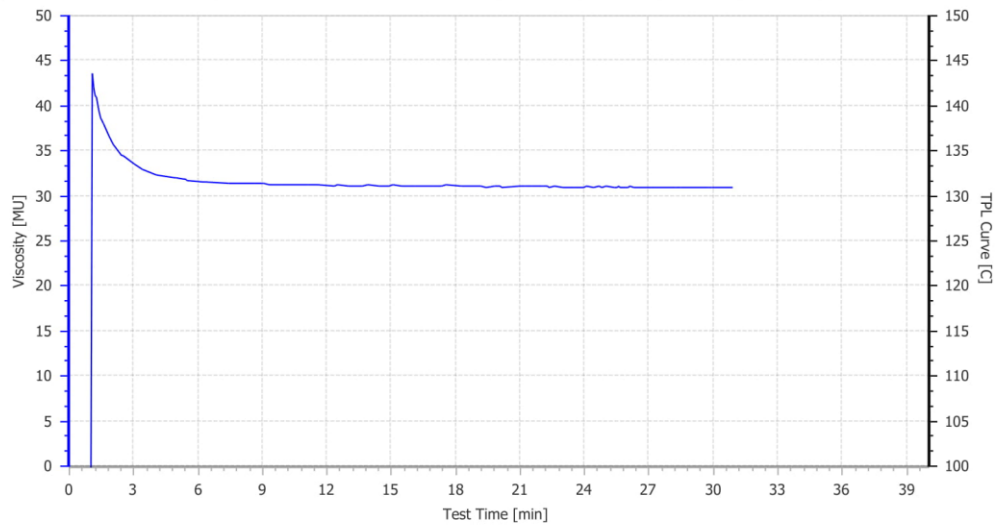


4/30/2019 11:03:04 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190408-0010
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch90

Batch S6M Specification Date/Time 4/8/2019 1:32 PM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	90	C					Setpoint
Mm	30.82	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

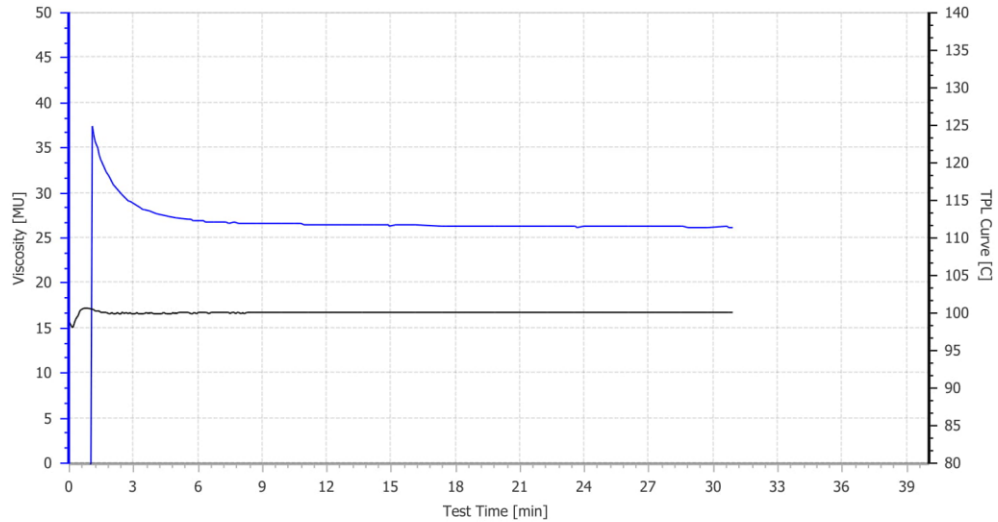


4/30/2019 11:03:37 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0055
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch100

Batch S7M Specification Date/Time 4/8/2019 2:41 PM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	100	C					Setpoint
Mm	26.04	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

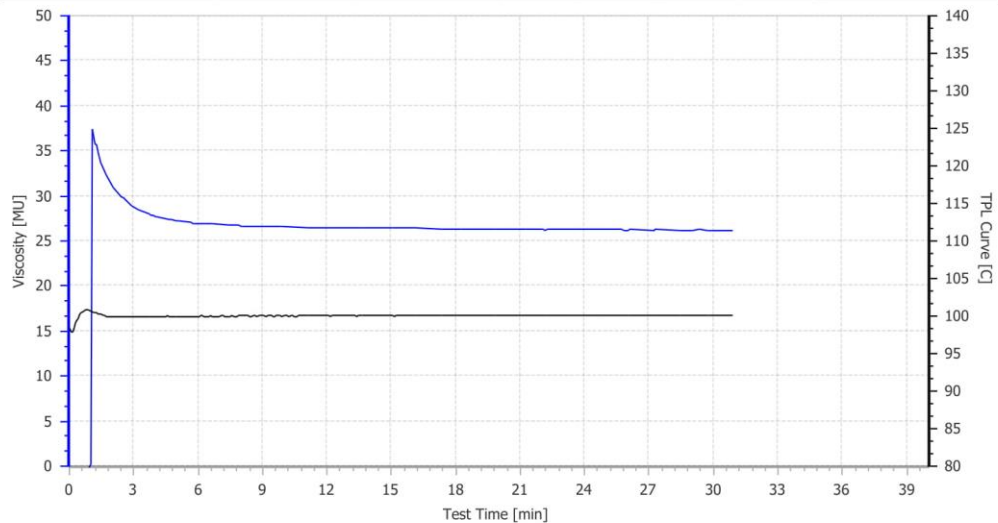


4/30/2019 11:04:43 AM **Complete Result** Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0055
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch100

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
S8M 4/8/2019 3:52 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	100	C					Setpoint
Mm	26.03	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

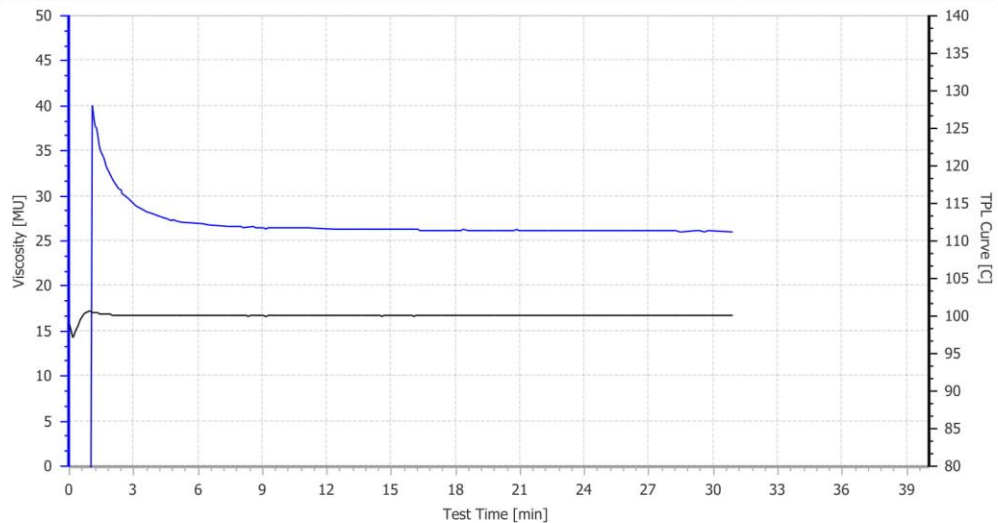


4/30/2019 11:05:19 AM **Complete Result** Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0055
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch100

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
S9M 4/9/2019 8:20 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	100	C					Setpoint
Mm	25.97	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado



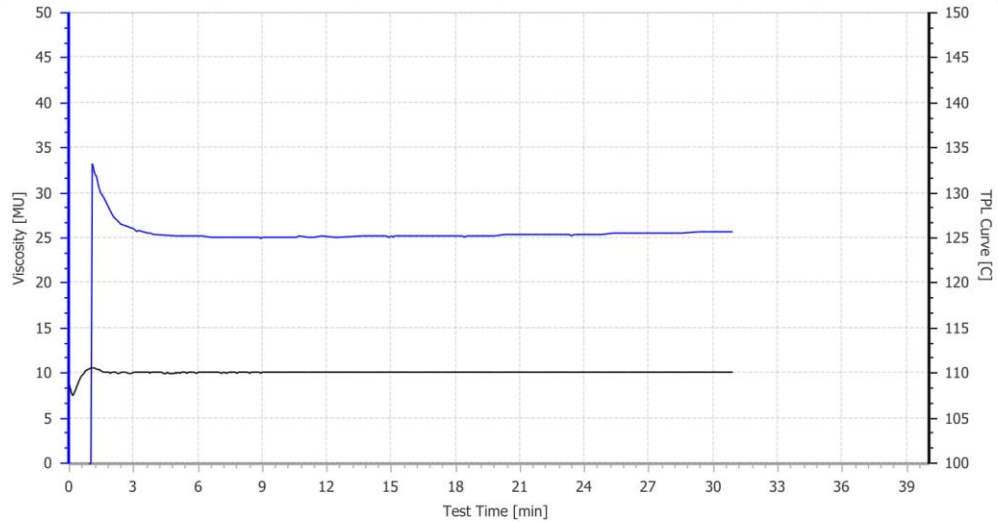
4/30/2019 11:05:59 AM **Complete Result** Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0060
Caply Skimcoat Compound

Test: Scorch110

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
S10M 4/9/2019 9:28 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	110	C					Setpoint
Mm	24.87	MU					Tested
T5		min					Invalid



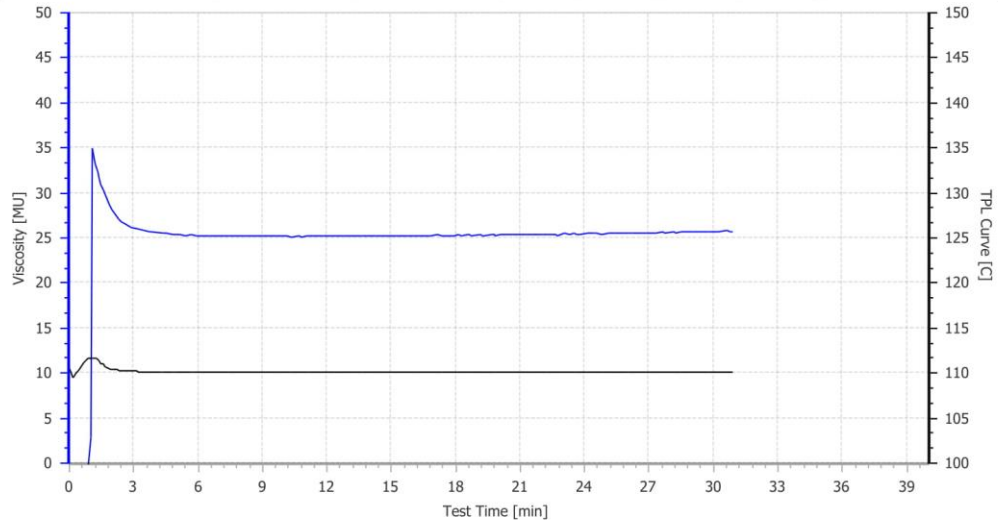
Continental Mabor
Lousado



4/30/2019 11:06:31 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0060
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch110
Batch S11M Specification Date/Time 4/10/2019 8:29 AM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	110	C					Setpoint
Mm	25.07	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

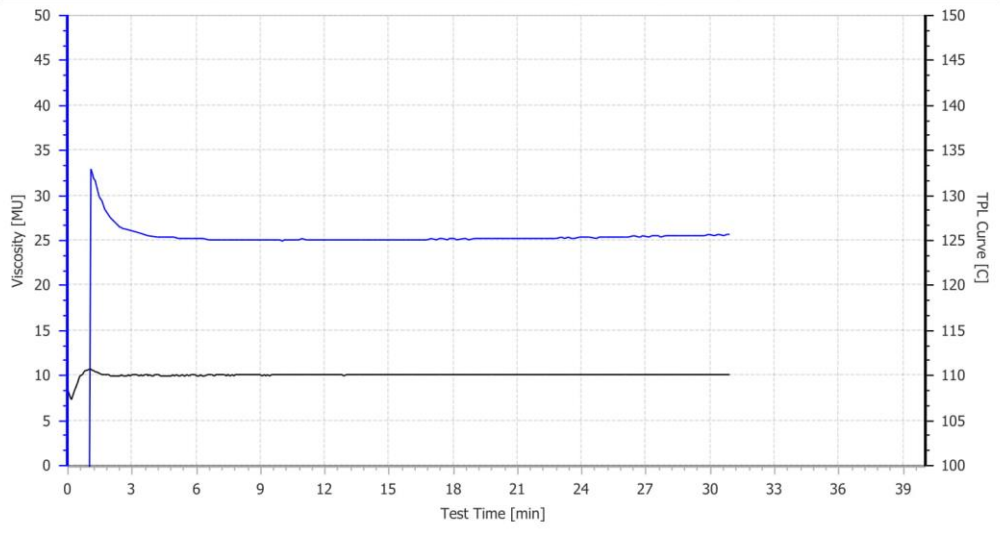


4/30/2019 11:07:05 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0060
Caply Skimcoat Compound
Test: Scorch110

Batch	Specification	Date/Time	Status
S12M		4/10/2019 9:34 AM	Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	110	C					Setpoint
Mm	24.89	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

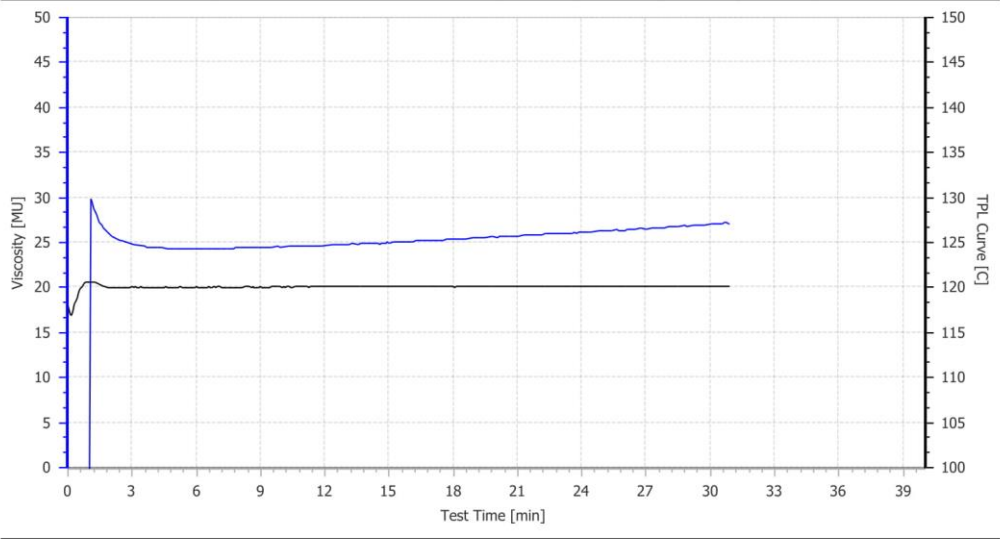


4/30/2019 11:07:36 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0061
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch120

Batch	Specification	Date/Time	Status
S13M		4/10/2019 10:41 AM	Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	120	C					Setpoint
Mm	24.19	MU					Tested
T5		min					Invalid



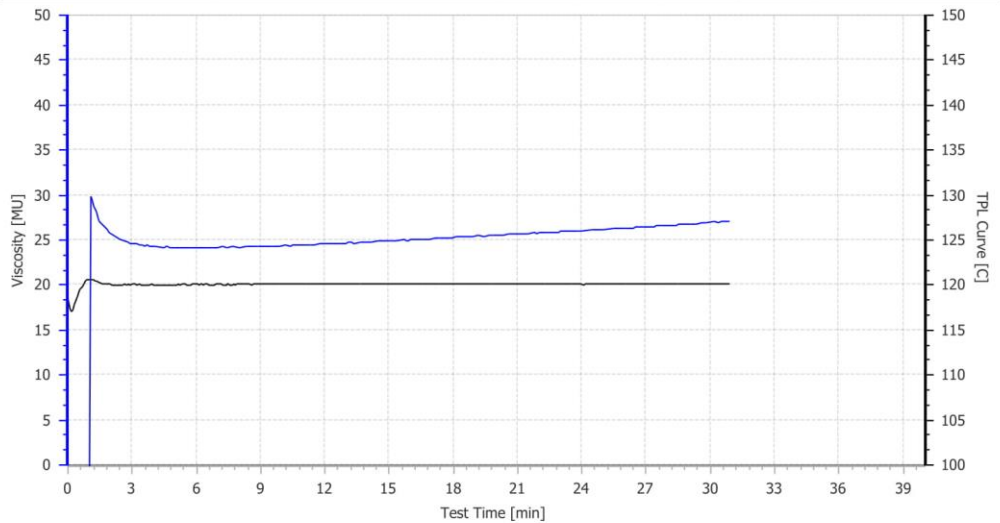
Continental Mabor
Lousado



4/30/2019 11:08:37 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0061
Caply Skimcoat Compound
Test: Scorch120
Batch S14M Specification Date/Time 4/10/2019 11:48 AM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	120	C					Setpoint
Mm	24.04	MU					Tested
T5		min					Invalid



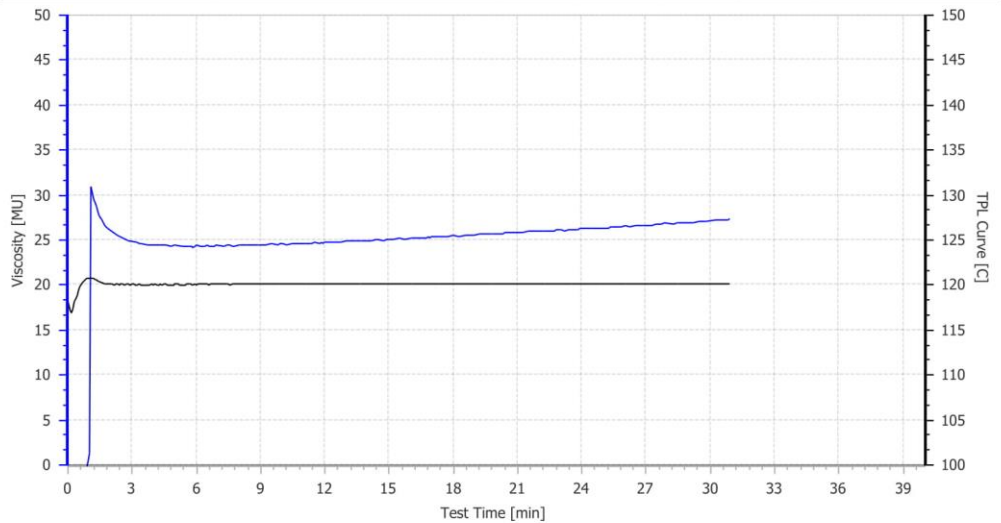
Continental Mabor
Lousado



4/30/2019 11:09:17 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0061
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch120
Batch S15M Specification Date/Time 4/10/2019 1:26 PM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	120	C					Setpoint
Mm	24.15	MU					Tested
T5		min					Invalid



8.7 ANEXO 7 – Relatórios de ensaios *Scorch* – Composto sem passagem no moinho

Continental Mabor Lousado



4/30/2019 11:00:37 AM

Complete Result

Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0053

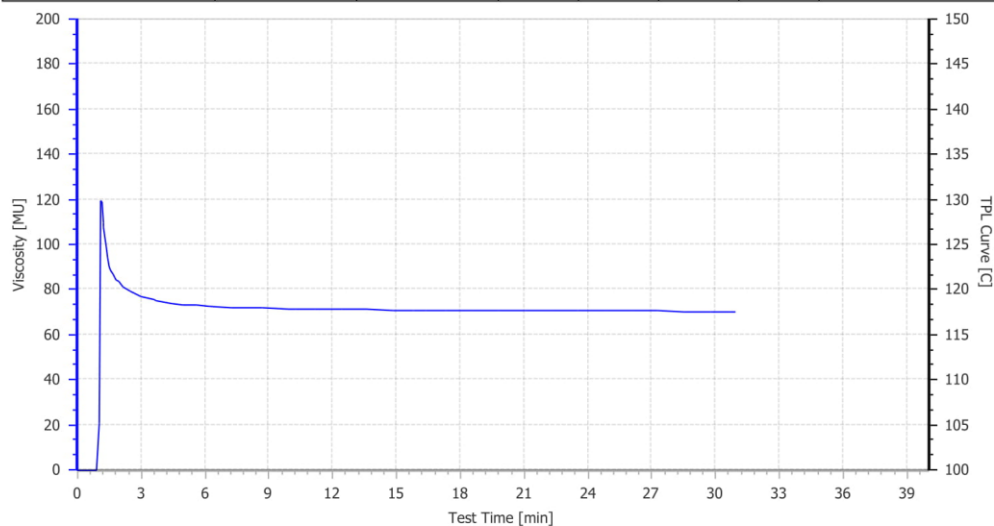
Capply Skimcoat Compound

Test: Scorch80

Batch S3 **Specification**

Date/Time 4/8/2019 9:24 AM **Status** Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	80	C					Setpoint
Mm	69.92	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

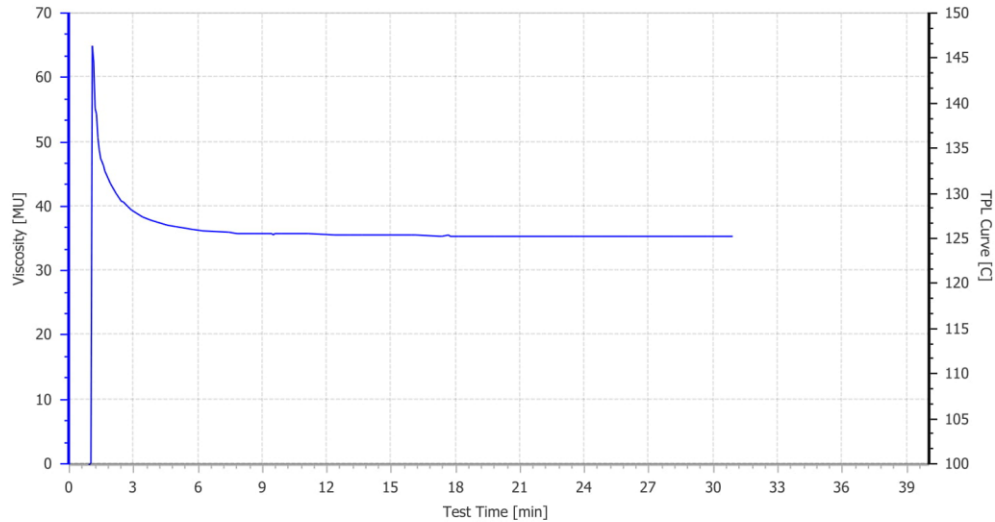


4/30/2019 11:01:16 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190408-0010
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch90

Batch S4 Specification Date/Time 4/8/2019 10:40 AM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	90	C					Setpoint
Mm	35.14	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

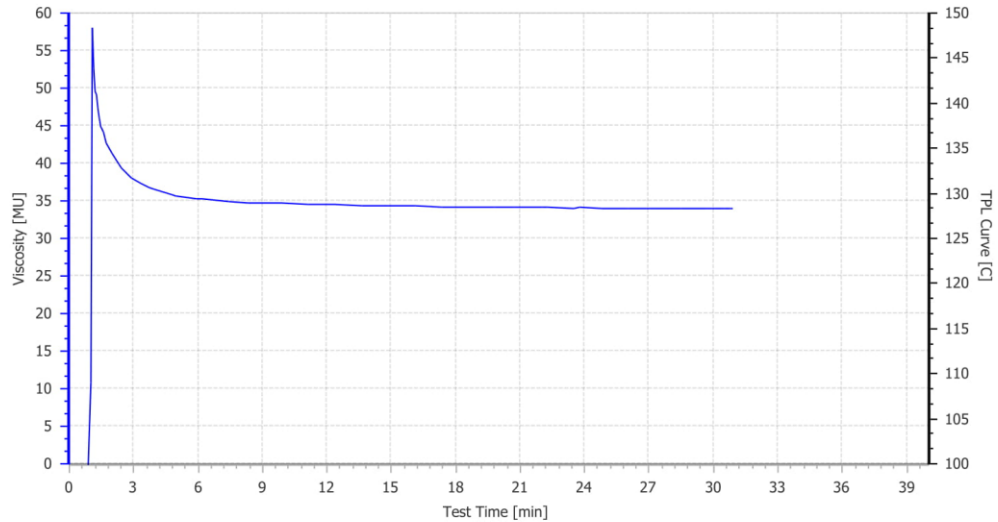


4/30/2019 11:02:15 AM **Complete Result** Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190408-0010
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch90

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
S5 4/8/2019 11:46 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	90	C					Setpoint
Mm	33.87	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

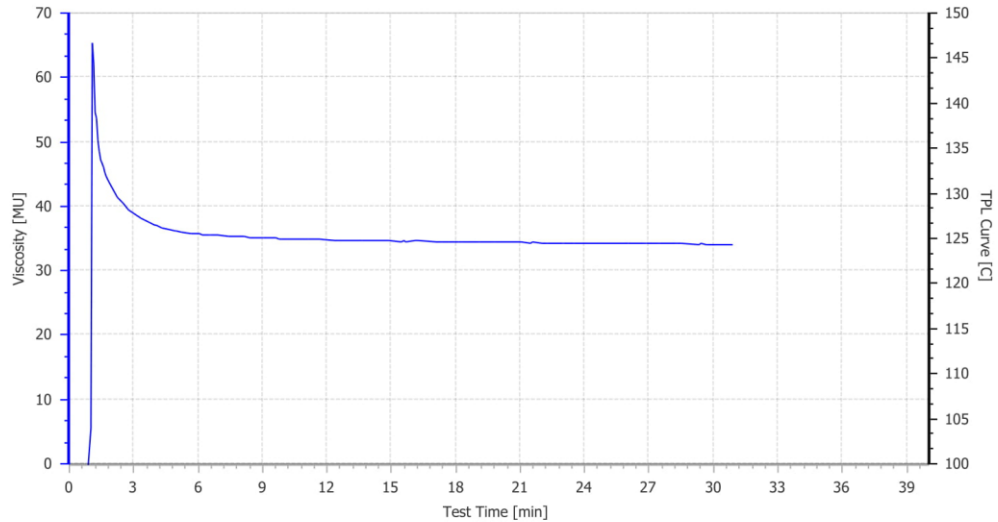


4/30/2019 11:02:48 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190408-0010
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch90

Batch S6 Specification Date/Time 4/8/2019 12:59 PM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	90	C					Setpoint
Mm	33.98	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

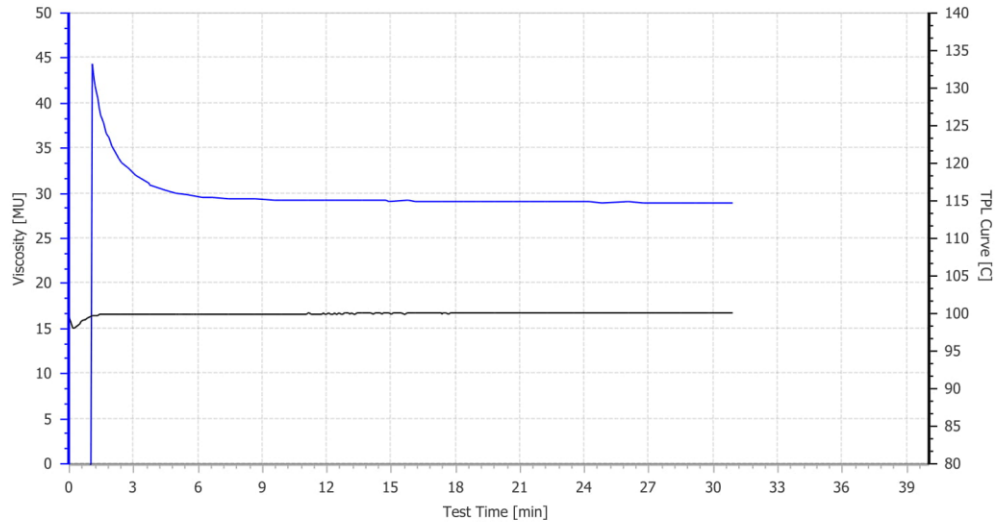


4/30/2019 11:03:22 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0055
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch100

Batch S7 Specification Date/Time 4/8/2019 2:09 PM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	100	C					Setpoint
Mm	28.84	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

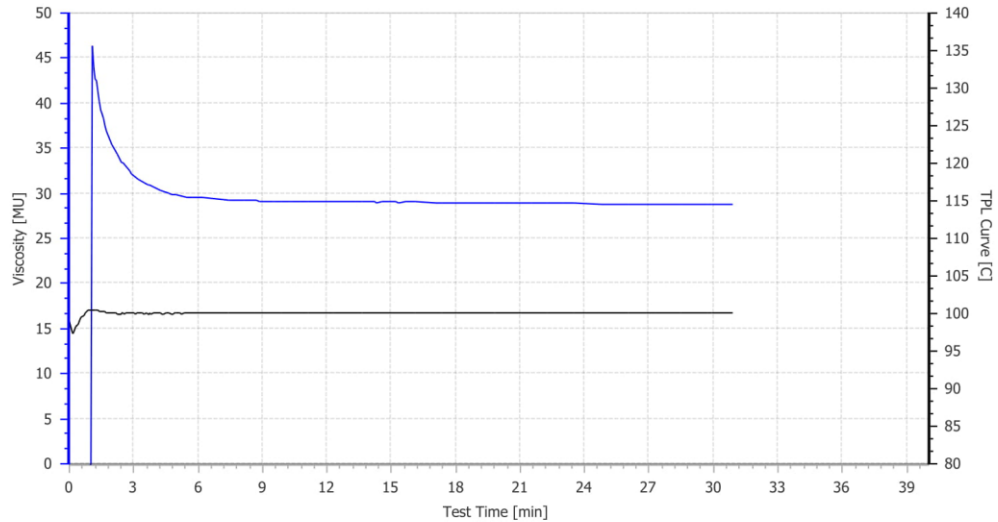


4/30/2019 11:04:21 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0055
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch100

Batch S8 Specification Date/Time 4/8/2019 3:19 PM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	100	C					Setpoint
Mm	28.67	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

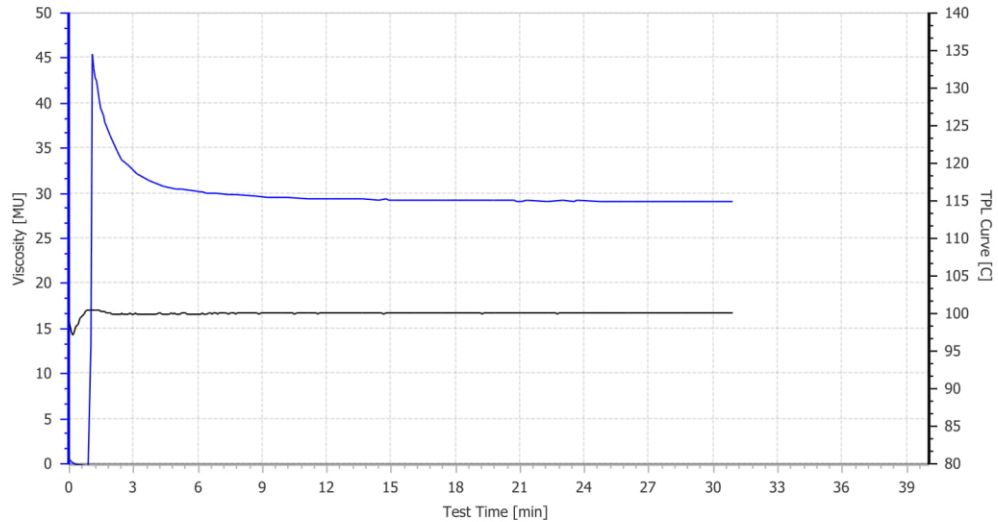


4/30/2019 11:05:03 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0055
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch100

Batch S9 Specification Date/Time 4/8/2019 4:25 PM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	100	C					Setpoint
Mm	28.95	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado



4/30/2019 11:05:40 AM

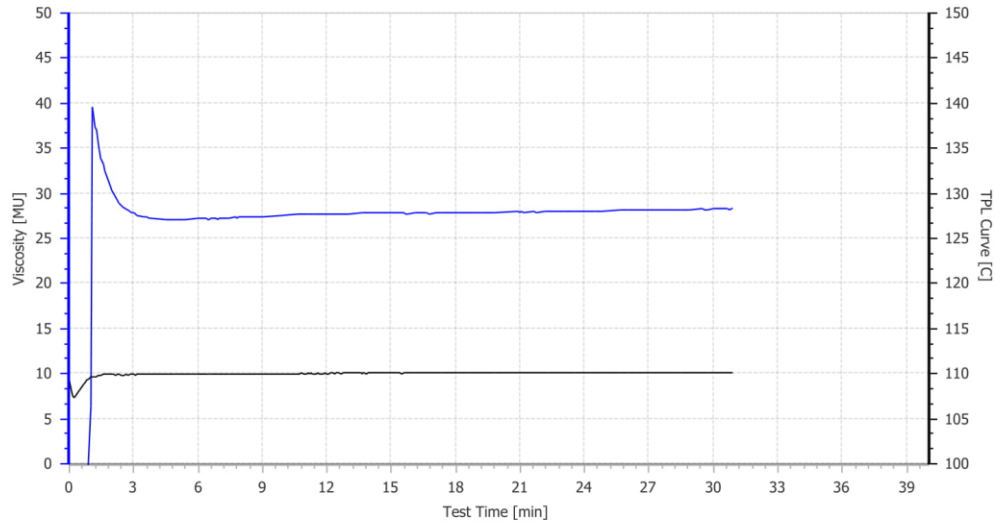
Complete Result

Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0060
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch110

Batch S10 Specification Date/Time 4/9/2019 8:55 AM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	110	C					Setpoint
Mm	27.01	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

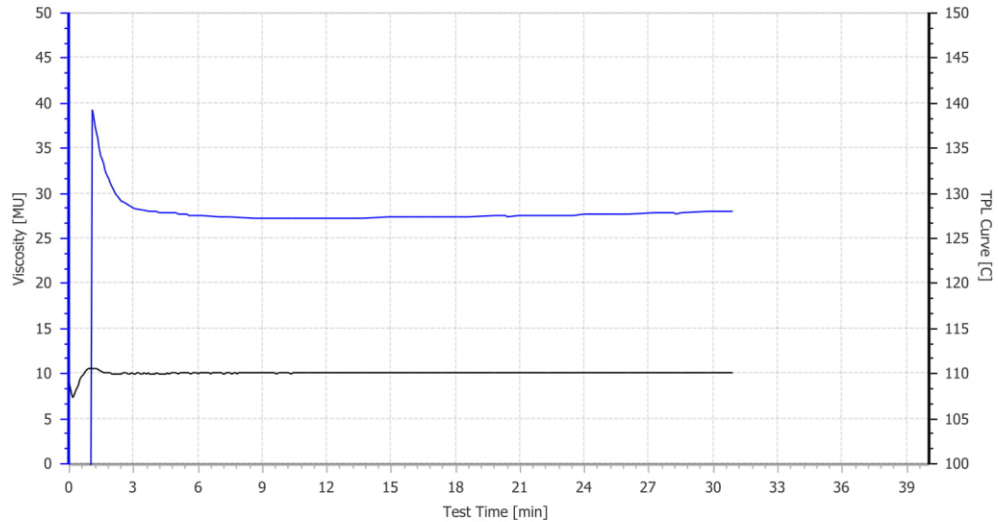


4/30/2019 11:06:16 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0060
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch110

Batch S11 Specification Date/Time 4/9/2019 10:04 AM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	110	C					Setpoint
Mm	27.09	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

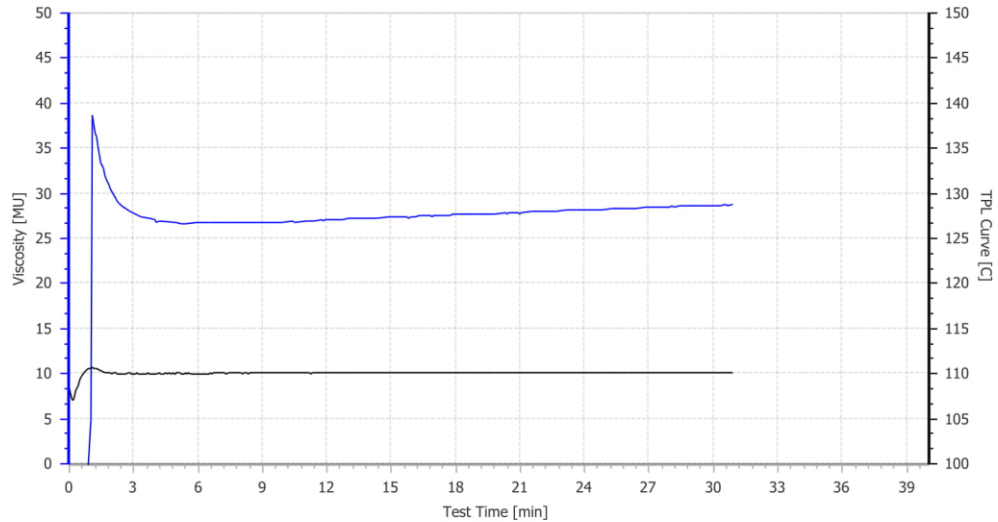


4/30/2019 11:06:50 AM **Complete Result** Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0060
Capply Skimcoat Compound
Test: Scorch110

Batch S12 **Specification** **Date/Time** 4/10/2019 9:01 AM **Status** Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	110	C					Setpoint
Mm	26.56	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

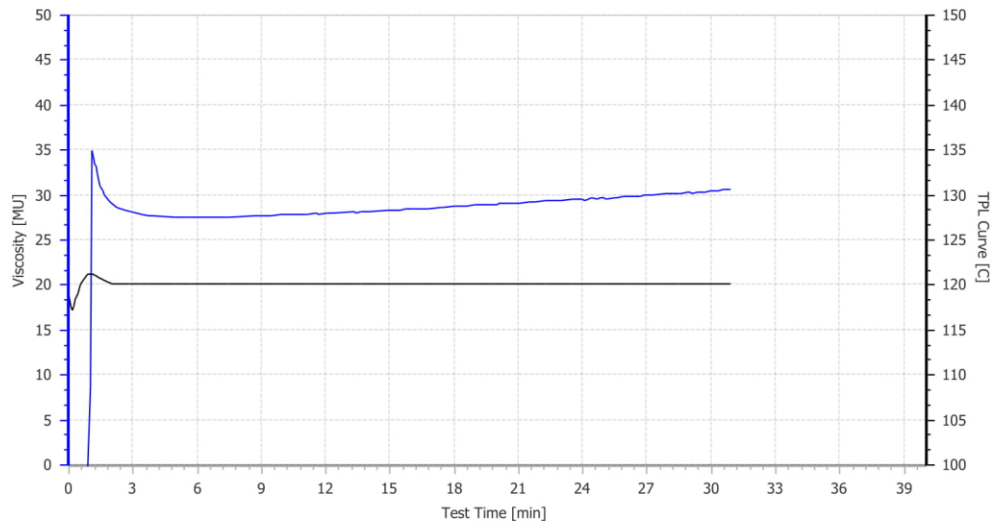


4/30/2019 11:07:21 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0061
Caply Skimcoat Compound
Test: Scorch120

Batch S13 Specification Date/Time 4/10/2019 10:08 AM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	120	C					Setpoint
Mm	27.45	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado

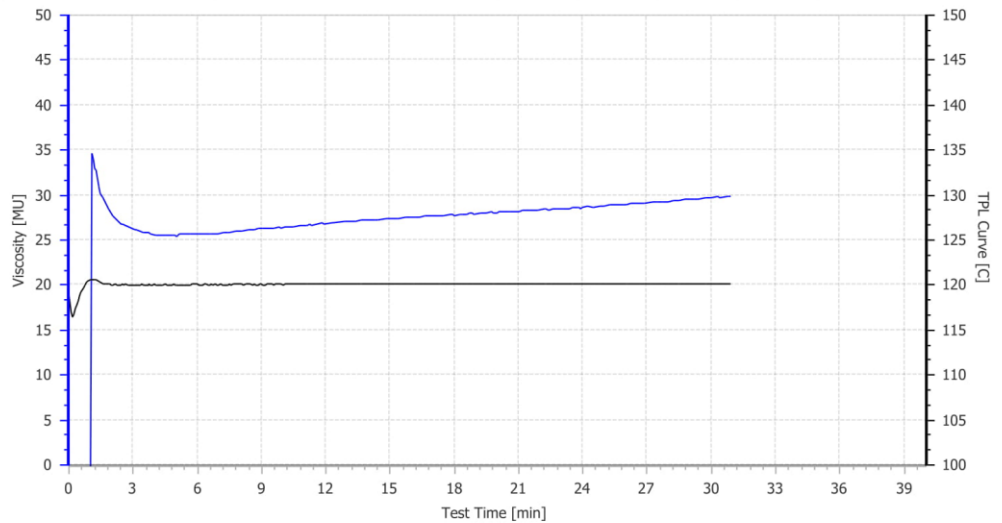


4/30/2019 11:07:52 AM Complete Result Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0061
Caply Skimcoat Compound
Test: Scorch120

Batch S14 Specification Date/Time 4/10/2019 11:14 AM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	120	C					Setpoint
Mm	25.37	MU					Tested
T5		min					Invalid



Continental Mabor
Lousado



4/30/2019 11:08:59 AM

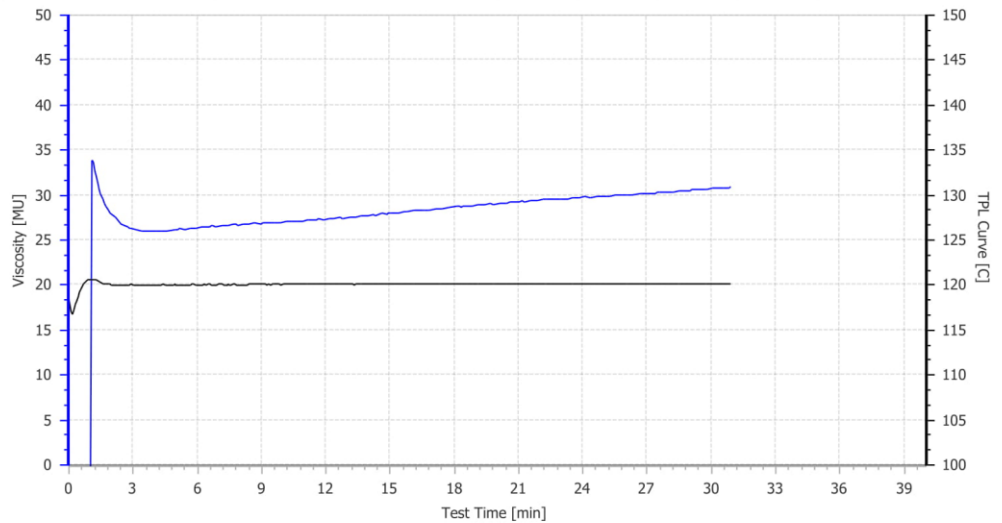
Complete Result

Page 1 of 1

Compound: FMS-B00163---- Order: 20190405-0061
Caply Skimcoat Compound
Test: Scorch120

Batch S15 Specification Date/Time 4/10/2019 12:20 PM Status Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Test Temp	120	C					Setpoint
Mm	25.85	MU					Tested
T5	30.96	min					Tested



8.8 ANEXO 8 – Relatórios de ensaios RPA – Composto sem passagem no moinho

**Continental Mabor
Lousado**

4/5/2019 5:53:05 PM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 0 - Ready00BatchSpecificationDate/TimeStatus

F1

4/5/2019 11:35 AM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	80.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163----**Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 1 - Delay01BatchSpecificationDate/TimeStatus

F1

4/5/2019 11:35 AM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	80.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163----**Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 2 - Freq02BatchSpecificationDate/TimeStatus

F1

4/5/2019 11:35 AM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	80.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:53:05 PM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	94.99	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	116.22	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	139.15	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	153.53	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	164.26	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	174.31	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	206.41	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	240.88	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	262.84	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	278.93	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	291.35	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	333.27	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	376.86	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	402.48	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	420.72	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	435.29	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	72.89	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	79.24	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	87.26	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	93.42	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	96.29	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	99.98	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	109.93	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	119.44	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	124.41	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	127.66	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	129.82	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	137.43	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	141.92	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	144.08	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	144.48	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	144.38	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	119.73	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:53:05 PM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	140.66	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	164.25	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	179.72	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	190.40	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	200.95	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	233.86	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	268.87	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	290.79	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	306.76	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	318.96	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	360.50	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	402.70	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	427.49	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	444.84	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	458.61	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	1007745	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	583766	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	349482	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	256576	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	205477	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	174779	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	103168	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	60174	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	43773	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	34894	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	29157	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	16613	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	9357	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	6687	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	5223	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	4323	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	773308	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	397996	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	219157	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	156115	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	120458	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	100251	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	54943	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	29838	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	20719	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	15969	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	12992	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6850	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3523	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2394	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1794	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1434	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	1270258	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	706529	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	412514	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	300338	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:54:37 PM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F2 4/5/2019 12:28 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	80.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F2 4/5/2019 12:28 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	80.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F2 4/5/2019 12:28 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	80.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:54:37 PM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	98.71	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	120.32	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	143.08	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	158.03	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	169.01	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	179.25	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	211.77	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	247.02	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	268.97	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	285.11	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	298.07	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	340.73	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	384.19	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	410.36	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	429.10	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	443.29	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	74.11	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	80.58	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	89.14	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	94.51	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	99.44	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	102.01	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	111.97	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	121.74	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	126.16	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	129.33	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	131.95	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	138.73	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	143.96	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	145.85	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	146.32	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	146.19	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	123.43	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:54:37 PM

Complete Result

Page 4 of 5

n"@0.8 rad/s	245308	Pa.s					Tested
n"@1.0 rad/s	206794	Pa.s					Tested
n"@2.0 rad/s	119729	Pa.s					Tested
n"@4.0 rad/s	68795	Pa.s					Tested
n"@6.0 rad/s	49477	Pa.s					Tested
n"@8.0 rad/s	39164	Pa.s					Tested
n"@10.0 rad/s	32622	Pa.s					Tested
n"@20.0 rad/s	18338	Pa.s					Tested
n"@40.0 rad/s	10186	Pa.s					Tested
n"@60.0 rad/s	7236	Pa.s					Tested
n"@80.0 rad/s	5628	Pa.s					Tested
n"@100.0 rad/s	4636	Pa.s					Tested
S"@0.1 rad/s	2.53	dNm					Tested
S"@0.2 rad/s	3.08	dNm					Tested
S"@0.4 rad/s	3.67	dNm					Tested
S"@0.6 rad/s	4.05	dNm					Tested
S"@0.8 rad/s	4.33	dNm					Tested
S"@1.0 rad/s	4.59	dNm					Tested
S"@2.0 rad/s	5.43	dNm					Tested
S"@4.0 rad/s	6.33	dNm					Tested
S"@6.0 rad/s	6.89	dNm					Tested
S"@8.0 rad/s	7.31	dNm					Tested
S"@10.0 rad/s	7.64	dNm					Tested
S"@20.0 rad/s	8.73	dNm					Tested
S"@40.0 rad/s	9.84	dNm					Tested
S"@60.0 rad/s	10.52	dNm					Tested
S"@80.0 rad/s	10.99	dNm					Tested
S"@100.0 rad/s	11.37	dNm					Tested
S"@0.1 rad/s	1.90	dNm					Tested
S"@0.2 rad/s	2.06	dNm					Tested
S"@0.4 rad/s	2.29	dNm					Tested
S"@0.6 rad/s	2.42	dNm					Tested
S"@0.8 rad/s	2.55	dNm					Tested
S"@1.0 rad/s	2.61	dNm					Tested
S"@2.0 rad/s	2.87	dNm					Tested
S"@4.0 rad/s	3.12	dNm					Tested
S"@6.0 rad/s	3.23	dNm					Tested
S"@8.0 rad/s	3.32	dNm					Tested
S"@10.0 rad/s	3.38	dNm					Tested
S"@20.0 rad/s	3.56	dNm					Tested
S"@40.0 rad/s	3.69	dNm					Tested
S"@60.0 rad/s	3.74	dNm					Tested
S"@80.0 rad/s	3.75	dNm					Tested
S"@100.0 rad/s	3.75	dNm					Tested
Strain@0.1 rad/s	13.92	%					Tested
Strain@0.2 rad/s	13.92	%					Tested
Strain@0.4 rad/s	13.93	%					Tested
Strain@0.6 rad/s	13.92	%					Tested
Strain@0.8 rad/s	13.93	%					Tested
Strain@1.0 rad/s	13.93	%					Tested
Strain@2.0 rad/s	13.92	%					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:55:05 PM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 0 - Ready00

Batch

Specification

Date/Time

Status

F3

4/5/2019 1:28 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	80.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 1 - Delay01

Batch

Specification

Date/Time

Status

F3

4/5/2019 1:28 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	80.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 2 - Freq02

Batch

Specification

Date/Time

Status

F3

4/5/2019 1:28 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	80.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:55:05 PM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	140.30	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	165.17	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	180.42	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	191.83	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	202.51	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	235.33	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	270.97	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	292.63	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	308.71	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	321.14	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	362.62	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	404.87	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	428.87	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	447.53	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	461.10	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	1015418	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	582418	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	351199	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	258507	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	207449	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	176548	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	103926	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	60710	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	44100	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	35169	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	29398	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	16730	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	9413	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	6715	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	5258	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	4348	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	766739	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	396761	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	220744	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	155168	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	120621	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	100300	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	55082	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	29940	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	20743	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	15954	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	12987	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6844	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3528	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2385	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1795	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1436	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	1272385	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	704719	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	414812	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	301501	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:55:05 PM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	95.71	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	115.95	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	139.84	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	154.69	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	165.83	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	176.08	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	207.93	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	243.02	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	264.80	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	281.14	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	293.76	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	335.63	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	379.11	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	404.13	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	423.53	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	437.84	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	72.27	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	78.99	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	87.89	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	92.85	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	96.42	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	100.03	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	110.21	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	119.85	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	124.55	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	127.53	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	129.77	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	137.30	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	142.08	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	143.55	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	144.58	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	144.60	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	119.93	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:56:05 PM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F4 4/5/2019 2:22 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	90.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F4 4/5/2019 2:22 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	90.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F4 4/5/2019 2:22 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	90.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:56:05 PM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	73.22	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	91.97	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	112.67	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	126.55	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	136.86	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	145.12	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	175.60	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	208.45	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	228.82	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	244.46	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	256.28	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	296.63	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	339.49	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	364.58	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	383.15	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	397.45	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	61.72	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	69.60	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	79.05	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	84.44	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	87.75	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	92.32	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	103.09	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	113.14	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	118.07	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	121.75	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	124.45	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	132.62	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	138.43	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	140.62	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	141.93	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	142.17	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	95.76	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:56:05 PM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	115.34	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	137.63	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	152.14	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	162.58	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	171.99	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	203.62	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	237.18	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	257.48	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	273.10	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	284.90	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	324.93	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	366.63	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	390.76	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	408.59	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	422.12	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	776790	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	461982	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	282962	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	211486	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	171209	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	145505	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	87766	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	52074	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	38107	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	30580	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	25648	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	14786	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	8429	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	6058	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4756	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3947	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	654798	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	349620	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	198537	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	141110	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	109772	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	92568	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	51526	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	28265	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	19663	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	15230	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	12455	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6611	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3437	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2337	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1762	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1412	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	1015954	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	579363	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	345665	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	254241	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:56:52 PM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F5 4/5/2019 3:15 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	90.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F5 4/5/2019 3:15 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	90.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F5 4/5/2019 3:15 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	90.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:56:52 PM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	76.97	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	96.26	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	117.02	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	130.57	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	140.93	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	149.93	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	179.74	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	213.65	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	234.70	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	249.91	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	262.34	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	302.86	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	346.11	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	371.85	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	390.59	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	404.93	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	64.19	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	72.44	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	82.08	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	86.83	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	90.98	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	94.41	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	105.55	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	115.96	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	121.28	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	124.71	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	127.11	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	135.71	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	141.94	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	144.09	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	145.47	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	145.68	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	100.23	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:56:52 PM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	120.47	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	142.94	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	156.81	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	167.75	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	177.18	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	208.44	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	243.09	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	264.18	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	279.30	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	291.51	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	331.88	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	374.09	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	398.79	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	416.80	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	430.34	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	816588	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	483515	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	293902	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	218197	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	176295	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	150330	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	89836	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	53372	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	39086	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	31262	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	26254	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	15097	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	8593	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	6179	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4849	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	4021	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	681058	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	363856	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	206151	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	145111	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	113818	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	94662	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	52755	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	28968	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	20199	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	15601	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	12721	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6765	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3524	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2394	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1806	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1447	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	1063323	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	605126	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	358994	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	262043	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:56:52 PM

Complete Result

Page 4 of 5

n"@0.8 rad/s	209844	Pa.s					Tested
n"@1.0 rad/s	177652	Pa.s					Tested
n"@2.0 rad/s	104181	Pa.s					Tested
n"@4.0 rad/s	60726	Pa.s					Tested
n"@6.0 rad/s	43997	Pa.s					Tested
n"@8.0 rad/s	34939	Pa.s					Tested
n"@10.0 rad/s	29174	Pa.s					Tested
n"@20.0 rad/s	16543	Pa.s					Tested
n"@40.0 rad/s	9288	Pa.s					Tested
n"@60.0 rad/s	6626	Pa.s					Tested
n"@80.0 rad/s	5174	Pa.s					Tested
n"@100.0 rad/s	4274	Pa.s					Tested
S"@0.1 rad/s	1.97	dNm					Tested
S"@0.2 rad/s	2.47	dNm					Tested
S"@0.4 rad/s	3.00	dNm					Tested
S"@0.6 rad/s	3.35	dNm					Tested
S"@0.8 rad/s	3.61	dNm					Tested
S"@1.0 rad/s	3.84	dNm					Tested
S"@2.0 rad/s	4.60	dNm					Tested
S"@4.0 rad/s	5.47	dNm					Tested
S"@6.0 rad/s	6.01	dNm					Tested
S"@8.0 rad/s	6.40	dNm					Tested
S"@10.0 rad/s	6.72	dNm					Tested
S"@20.0 rad/s	7.76	dNm					Tested
S"@40.0 rad/s	8.87	dNm					Tested
S"@60.0 rad/s	9.53	dNm					Tested
S"@80.0 rad/s	10.01	dNm					Tested
S"@100.0 rad/s	10.38	dNm					Tested
S"@0.1 rad/s	1.64	dNm					Tested
S"@0.2 rad/s	1.86	dNm					Tested
S"@0.4 rad/s	2.10	dNm					Tested
S"@0.6 rad/s	2.23	dNm					Tested
S"@0.8 rad/s	2.33	dNm					Tested
S"@1.0 rad/s	2.42	dNm					Tested
S"@2.0 rad/s	2.70	dNm					Tested
S"@4.0 rad/s	2.97	dNm					Tested
S"@6.0 rad/s	3.11	dNm					Tested
S"@8.0 rad/s	3.19	dNm					Tested
S"@10.0 rad/s	3.26	dNm					Tested
S"@20.0 rad/s	3.48	dNm					Tested
S"@40.0 rad/s	3.64	dNm					Tested
S"@60.0 rad/s	3.69	dNm					Tested
S"@80.0 rad/s	3.73	dNm					Tested
S"@100.0 rad/s	3.73	dNm					Tested
Strain@0.1 rad/s	13.93	%					Tested
Strain@0.2 rad/s	13.93	%					Tested
Strain@0.4 rad/s	13.92	%					Tested
Strain@0.6 rad/s	13.93	%					Tested
Strain@0.8 rad/s	13.93	%					Tested
Strain@1.0 rad/s	13.92	%					Tested
Strain@2.0 rad/s	13.92	%					Tested

Continental Mabor
Lousado

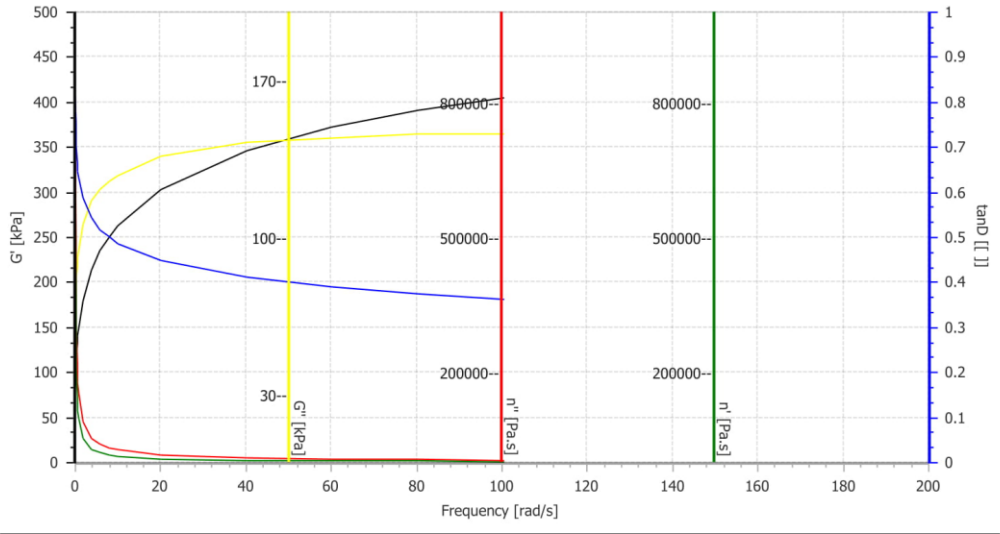


4/5/2019 5:56:52 PM

Complete Result

Page 5 of 5

Strain@4.0 rad/s	13.92 %					Tested
Strain@6.0 rad/s	13.92 %					Tested
Strain@8.0 rad/s	13.92 %					Tested
Strain@10.0 rad/s	13.92 %					Tested
Strain@20.0 rad/s	13.92 %					Tested
Strain@40.0 rad/s	13.93 %					Tested
Strain@60.0 rad/s	13.93 %					Tested
Strain@80.0 rad/s	13.93 %					Tested
Strain@100.0 rad/s	13.93 %					Tested
tanD@0.1 rad/s	0.834 []					Tested
tanD@0.2 rad/s	0.753 []					Tested
tanD@0.4 rad/s	0.701 []					Tested
tanD@0.6 rad/s	0.665 []					Tested
tanD@0.8 rad/s	0.646 []					Tested
tanD@1.0 rad/s	0.630 []					Tested
tanD@2.0 rad/s	0.587 []					Tested
tanD@4.0 rad/s	0.543 []					Tested
tanD@6.0 rad/s	0.517 []					Tested
tanD@8.0 rad/s	0.499 []					Tested
tanD@10.0 rad/s	0.485 []					Tested
tanD@20.0 rad/s	0.448 []					Tested
tanD@40.0 rad/s	0.410 []					Tested
tanD@60.0 rad/s	0.387 []					Tested
tanD@80.0 rad/s	0.372 []					Tested
tanD@100.0 rad/s	0.360 []					Tested



Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:57:39 PM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F6 4/5/2019 4:08 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	90.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F6 4/5/2019 4:08 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	90.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F6 4/5/2019 4:08 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	90.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:57:39 PM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	76.32	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	94.75	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	115.58	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	128.83	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	139.17	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	148.14	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	178.66	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	212.35	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	232.72	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	248.24	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	260.28	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	300.36	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	343.68	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	370.01	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	387.72	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	402.09	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	62.88	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	70.15	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	79.75	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	85.13	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	89.27	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	93.07	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	104.10	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	114.28	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	119.54	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	122.90	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	125.68	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	133.90	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	140.03	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	142.95	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	143.72	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	144.20	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	98.89	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:57:39 PM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	117.89	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	140.42	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	154.42	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	165.34	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	174.95	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	206.77	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	241.15	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	261.62	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	277.00	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	289.03	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	328.86	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	371.11	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	396.66	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	413.50	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	427.17	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	809685	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	475902	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	290268	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	215298	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	174096	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	148537	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	89294	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	53047	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	38757	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	31054	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	26047	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	14972	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	8533	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	6148	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4813	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3993	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	667143	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	352350	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	200285	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	142262	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	111670	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	93317	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	52029	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	28549	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	19908	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	15374	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	12577	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6674	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3477	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2375	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1784	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1432	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	1049128	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	592143	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	352660	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	258054	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:15:57 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	59.08	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	74.63	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	91.38	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	103.34	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	111.19	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	119.19	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	144.67	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	173.24	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	191.47	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	204.31	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	214.93	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	251.92	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	291.09	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	315.78	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	334.19	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	347.91	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	53.25	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	60.98	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	70.30	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	75.57	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	79.89	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	82.91	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	94.51	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	105.52	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	111.35	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	115.16	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	118.34	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	129.13	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	137.26	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	140.36	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	142.24	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	143.44	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	79.54	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:15:57 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F7 4/5/2019 6:09 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	100.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F7 4/5/2019 6:09 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	100.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F7 4/5/2019 6:09 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	100.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:15:57 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	96.37	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	115.29	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	128.02	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	136.91	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	145.19	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	172.81	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	202.85	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	221.49	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	234.54	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	245.36	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	283.09	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	321.83	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	345.57	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	363.20	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	376.32	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	626812	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	374847	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	229500	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	172687	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	139095	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	119508	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	72308	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	43278	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	31887	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	25559	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	21510	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	12558	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	7227	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5247	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4149	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3455	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	564935	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	306298	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	176553	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	126285	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	99935	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	83130	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	47239	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	26361	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	18544	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14407	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11843	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6437	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3408	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2332	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1766	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1425	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	843828	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	484075	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	289553	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	213936	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:15:05 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F8 4/5/2019 7:02 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	100.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F8 4/5/2019 7:02 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	100.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F8 4/5/2019 7:02 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	100.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:15:05 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	58.98	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	74.23	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	91.94	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	103.33	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	111.55	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	119.15	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	145.51	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	174.38	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	192.43	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	205.55	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	215.95	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	252.87	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	290.95	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	314.89	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	332.84	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	346.98	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	52.50	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	60.39	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	69.19	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	75.31	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	79.06	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	82.58	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	93.96	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	105.16	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	110.67	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	114.67	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	117.77	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	128.19	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	136.84	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	140.47	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	142.32	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	142.87	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	78.96	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:15:05 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	95.69	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	115.06	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	127.86	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	136.73	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	144.97	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	173.21	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	203.63	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	221.99	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	235.37	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	245.97	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	283.50	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	321.52	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	344.80	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	361.99	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	375.24	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	625756	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	372850	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	230898	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	172678	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	139546	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	119470	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	72728	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	43561	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	32048	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	25714	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	21611	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	12605	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	7224	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5232	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4132	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3446	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	556977	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	303315	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	173760	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	125850	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	98899	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	82800	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	46961	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	26270	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	18430	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14344	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11786	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6390	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3397	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2334	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1767	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1419	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	837732	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	480642	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	288975	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	213673	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:14:04 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F9 4/5/2019 9:55 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	100.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F9 4/5/2019 9:55 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	100.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F9 4/5/2019 9:55 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	100.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:14:04 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	56.47	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	71.25	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	88.74	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	100.01	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	108.44	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	115.89	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	141.87	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	171.10	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	189.44	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	203.10	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	213.82	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	251.87	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	292.02	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	315.65	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	334.57	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	348.62	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	50.03	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	58.40	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	67.32	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	72.77	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	76.59	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	80.18	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	91.68	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	102.43	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	108.47	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	112.49	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	115.24	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	124.98	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	133.57	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	136.17	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	138.31	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	139.02	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	75.45	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:14:04 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	92.13	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	111.39	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	123.68	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	132.76	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	140.93	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	168.92	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	199.42	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	218.30	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	232.17	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	242.90	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	281.17	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	321.12	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	343.77	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	362.03	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	375.32	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	599121	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	357908	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	222877	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	167129	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	135648	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	116201	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	70908	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	42743	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	31549	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	25407	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	21398	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	12555	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	7250	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5245	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4153	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3462	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	530829	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	293357	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	169080	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	121607	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	95817	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	80399	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	45823	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	25588	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	18065	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14072	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11533	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6230	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3316	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2263	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1717	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1381	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	800454	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	462770	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	279754	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	206689	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:12:59 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F10 4/5/2019 10:53 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	110.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F10 4/5/2019 10:53 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	110.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F10 4/5/2019 10:53 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	110.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:13:00 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	55.55	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	71.06	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	88.03	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	99.16	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	109.39	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	115.00	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	140.63	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	168.96	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	186.41	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	199.52	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	209.73	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	246.59	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	285.56	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	309.35	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	327.23	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	340.96	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	49.11	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	56.64	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	65.85	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	71.54	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	75.26	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	79.55	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	90.67	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	102.13	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	107.84	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	112.19	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	115.20	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	125.64	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	135.18	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	139.39	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	141.59	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	143.25	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	74.15	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:13:00 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	90.87	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	109.93	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	122.27	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	132.78	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	139.83	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	167.33	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	197.43	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	215.35	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	228.90	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	239.29	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	276.75	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	315.94	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	339.31	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	356.55	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	369.83	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	589377	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	356931	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	221089	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	165707	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	136848	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	115303	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	70288	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	42207	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	31044	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	24959	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	20989	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	12292	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	7090	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5140	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4062	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3386	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	521003	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	284499	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	165370	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	119557	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	94142	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	79762	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	45318	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	25513	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	17959	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14034	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11528	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6263	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3356	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2316	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1758	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1423	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	786644	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	456442	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	276093	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	204335	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:12:05 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F11 4/5/2019 11:46 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	110.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F11 4/5/2019 11:46 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	110.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F11 4/5/2019 11:46 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	110.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:12:05 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	55.23	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	70.40	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	87.45	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	97.88	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	106.10	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	112.96	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	137.57	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	163.75	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	179.73	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	191.22	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	200.53	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	234.89	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	274.30	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	298.45	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	317.63	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	332.67	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	49.44	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	57.01	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	66.77	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	72.01	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	75.78	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	79.01	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	90.64	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	101.95	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	107.46	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	111.77	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	114.77	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	125.92	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	137.23	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	141.66	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	144.88	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	147.07	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	74.13	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:12:05 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	90.58	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	110.03	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	121.51	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	130.38	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	137.85	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	164.75	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	192.89	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	209.40	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	221.49	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	231.06	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	266.51	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	306.72	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	330.37	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	349.11	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	363.73	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	585930	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	353598	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	219625	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	163564	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	132724	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	113262	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	68760	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	40905	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	29931	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	23920	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	20069	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	11709	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	6810	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	4959	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	3943	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3304	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	524552	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	286345	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	167696	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	120339	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	94801	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	79217	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	45304	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	25469	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	17897	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	13982	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11486	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6277	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3407	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2354	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1799	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1461	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	786428	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	455000	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	276328	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	203063	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:11:11 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F12 4/6/2019 1:00 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	110.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F12 4/6/2019 1:00 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	110.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F12 4/6/2019 1:00 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	110.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:11:11 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	58.39	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	73.51	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	90.67	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	101.14	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	109.84	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	118.30	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	143.51	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	171.97	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	189.63	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	202.52	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	212.84	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	248.48	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	288.41	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	312.42	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	330.50	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	344.85	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	50.12	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	57.82	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	67.01	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	72.96	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	76.50	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	79.86	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	91.93	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	103.01	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	109.31	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	112.93	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	116.60	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	127.76	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	136.37	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	140.77	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	143.22	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	144.88	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	76.95	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:11:11 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	93.52	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	112.75	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	124.71	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	133.85	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	142.74	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	170.43	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	200.46	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	218.88	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	231.88	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	242.69	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	279.40	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	319.02	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	342.67	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	360.20	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	374.05	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	619422	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	369239	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	227715	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	169016	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	137401	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	118618	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	71726	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	42960	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	31581	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	25335	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	21300	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	12386	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	7161	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5191	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4103	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3425	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	531722	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	290419	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	168297	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	121926	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	95702	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	80077	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	45946	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	25733	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	18205	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14127	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11669	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6369	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3386	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2339	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1778	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1439	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	816341	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	469767	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	283157	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	208404	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:09:38 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076
Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F13 4/6/2019 2:37 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	120.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076
Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F13 4/6/2019 2:37 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	120.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076
Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F13 4/6/2019 2:37 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	120.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:09:39 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	56.28	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	73.80	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	92.39	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	102.77	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	111.21	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	119.65	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	143.66	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	170.49	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	187.16	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	199.36	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	209.01	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	244.14	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	284.80	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	309.48	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	329.48	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	344.67	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	47.21	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	55.22	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	66.01	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	70.80	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	74.70	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	78.25	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	89.90	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	101.70	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	108.37	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	113.16	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	117.06	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	130.37	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	142.57	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	148.06	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	152.21	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	154.04	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	73.46	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:09:39 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	92.17	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	113.55	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	124.80	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	133.97	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	142.96	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	169.47	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	198.52	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	216.27	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	229.24	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	239.56	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	276.77	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	318.49	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	343.07	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	362.94	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	377.53	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	597048	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	370697	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	232043	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	171748	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	139125	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	119969	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	71801	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	42590	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	31169	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	24939	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	20917	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	12170	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	7071	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5142	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4090	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3423	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	500884	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	277369	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	165770	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	118318	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	93442	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	78457	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	44935	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	25406	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	18049	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14156	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11715	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6499	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3540	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2460	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1890	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1530	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	779327	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	462980	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	285173	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	208558	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:08:18 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 0 - Ready00

Batch

Specification

Date/Time

Status

F14

4/6/2019 4:27 AM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	120.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 1 - Delay01

Batch

Specification

Date/Time

Status

F14

4/6/2019 4:27 AM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	120.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 2 - Freq02

Batch

Specification

Date/Time

Status

F14

4/6/2019 4:27 AM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	120.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:08:18 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	58.11	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	75.97	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	96.30	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	107.74	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	117.27	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	125.99	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	152.02	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	181.30	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	199.43	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	213.15	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	223.97	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	261.07	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	302.45	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	327.79	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	346.20	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	361.18	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	48.21	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	56.28	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	65.03	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	71.45	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	75.85	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	79.92	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	91.75	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	103.44	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	109.68	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	114.10	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	117.60	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	129.41	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	139.57	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	144.57	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	147.27	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	149.09	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	75.50	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:08:18 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	94.55	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	116.20	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	129.28	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	139.66	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	149.20	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	177.56	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	208.73	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	227.60	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	241.76	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	252.97	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	291.39	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	333.10	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	358.25	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	376.23	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	390.74	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	616460	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	381613	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	241844	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	180050	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	146697	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	126332	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	75981	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	45290	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	33213	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	26664	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	22414	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	13014	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	7509	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5446	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4298	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3587	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	511524	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	282692	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	163318	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	119394	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	94888	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	80130	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	45855	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	25840	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	18266	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14274	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11769	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6451	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3465	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2402	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1828	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1481	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	801049	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	474914	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	291824	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	216040	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:06:27 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076
Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F15 4/6/2019 5:36 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	120.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076
Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F15 4/6/2019 5:36 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	120.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076
Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F15 4/6/2019 5:36 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	120.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:06:27 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	64.12	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	83.19	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	104.27	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	117.63	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	128.75	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	137.20	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	164.53	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	196.10	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	215.49	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	230.32	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	242.21	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	282.98	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	328.31	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	356.48	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	376.68	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	392.89	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	55.24	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	61.81	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	71.63	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	78.06	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	83.40	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	86.18	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	98.34	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	110.86	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	117.44	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	122.08	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	126.00	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	137.83	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	149.43	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	154.46	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	157.10	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	158.93	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	84.64	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:06:28 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	103.64	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	126.50	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	141.17	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	153.40	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	162.02	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	191.68	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	225.27	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	245.41	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	260.67	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	273.03	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	314.76	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	360.72	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	388.51	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	408.12	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	423.82	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	680300	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	417875	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	261869	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	196569	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	161064	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	137571	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	82232	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	48988	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	35888	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	28811	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	24240	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	14106	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	8151	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5923	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4676	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3902	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	586084	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	310474	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	179886	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	130454	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	104331	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	86406	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	49152	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	27695	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	19558	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	15272	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	12610	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6871	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3710	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2567	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1950	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1578	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	897944	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	520589	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	317702	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	235918	Pa.s					Tested

8.9 ANEXO 9 – Relatórios de ensaios RPA – Composto com passagem no moinho

**Continental Mabor
Lousado**

4/5/2019 5:54:08 PM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 0 - Ready00**Batch****Specification****Date/Time****Status**

F1M

4/5/2019 12:01 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	80.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163----**Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 1 - Delay01**Batch****Specification****Date/Time****Status**

F1M

4/5/2019 12:01 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	80.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163----**Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 2 - Freq02**Batch****Specification****Date/Time****Status**

F1M

4/5/2019 12:01 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	80.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:54:08 PM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	73.95	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	93.60	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	115.49	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	129.66	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	140.30	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	148.91	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	179.28	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	212.51	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	233.56	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	248.58	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	260.73	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	300.42	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	342.86	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	367.72	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	386.00	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	399.84	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	62.68	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	70.36	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	79.08	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	84.93	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	88.97	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	92.02	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	102.33	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	112.39	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	116.99	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	120.28	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	122.50	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	130.53	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	135.40	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	137.14	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	137.73	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	137.84	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	96.94	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:54:08 PM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	117.10	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	139.97	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	155.00	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	166.13	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	175.05	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	206.43	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	240.40	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	261.23	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	276.15	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	288.08	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	327.55	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	368.63	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	392.46	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	409.84	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	422.93	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	784512	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	470155	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	290056	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	216685	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	175513	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	149311	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	89605	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	53088	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	38897	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	31096	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	26093	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	14975	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	8513	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	6110	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4792	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3971	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	664979	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	353395	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	198594	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	141932	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	111297	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	92269	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	51146	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	28075	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	19484	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	15046	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	12259	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6507	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3362	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2279	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1710	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1369	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	1028424	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	588161	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	351529	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	259031	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 6:35:18 PM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F2M 4/5/2019 1:01 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	80.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F2M 4/5/2019 1:01 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	80.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F2M 4/5/2019 1:01 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	80.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 6:35:18 PM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	73.56	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	93.17	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	114.24	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	128.12	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	136.92	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	147.94	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	178.43	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	211.94	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	232.54	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	247.69	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	259.92	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	300.41	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	342.23	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	367.50	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	384.73	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	398.96	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	61.58	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	69.37	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	78.67	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	84.29	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	88.02	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	91.43	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	102.24	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	111.58	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	116.36	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	119.54	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	122.02	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	129.66	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	134.61	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	136.73	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	137.18	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	137.30	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	95.93	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 6:35:18 PM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	116.16	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	138.70	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	153.36	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	162.77	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	173.91	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	205.65	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	239.52	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	260.03	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	275.02	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	287.14	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	327.20	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	367.75	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	392.11	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	408.45	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	421.93	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	780383	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	467969	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	286903	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	214104	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	171280	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	148337	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	89183	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	52946	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	38727	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	30985	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	26012	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	14975	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	8497	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	6106	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4776	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3962	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	653349	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	348450	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	197575	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	140852	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	110113	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	91675	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	51099	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	27873	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	19378	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14953	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	12212	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6463	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3342	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2272	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1703	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1364	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	1017773	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	583448	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	348352	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	256281	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:55:26 PM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F3M 4/5/2019 1:54 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	80.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F3M 4/5/2019 1:54 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	80.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0042

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 80°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F3M 4/5/2019 1:54 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	80.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:55:26 PM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	72.96	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	92.32	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	113.53	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	127.38	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	137.94	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	147.39	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	177.45	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	210.87	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	231.79	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	246.90	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	258.90	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	299.01	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	340.81	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	366.78	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	383.93	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	398.08	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	61.09	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	69.36	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	78.78	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	84.16	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	87.59	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	91.16	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	101.75	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	111.36	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	116.12	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	119.15	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	121.55	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	129.40	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	133.97	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	136.30	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	136.96	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	136.68	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	95.16	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:55:26 PM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	115.47	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	138.19	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	152.68	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	163.39	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	173.30	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	204.55	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	238.47	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	259.25	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	274.15	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	286.02	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	325.80	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	366.19	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	391.29	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	407.62	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	420.89	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	774029	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	463696	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	285135	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	212876	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	172551	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	147781	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	88691	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	52678	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	38603	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	30886	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	25910	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	14905	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	8462	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	6094	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4766	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3953	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	648137	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	348397	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	197862	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	140647	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	109567	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	91400	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	50855	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	27819	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	19339	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14905	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	12164	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6450	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3326	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2265	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1700	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1357	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	1009556	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	579995	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	347061	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	255143	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:56:32 PM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F4M 4/5/2019 2:48 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	90.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F4M 4/5/2019 2:48 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	90.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F4M 4/5/2019 2:48 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	90.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:56:32 PM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	59.03	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	76.36	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	94.54	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	107.97	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	117.09	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	126.92	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	156.11	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	188.24	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	208.07	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	222.91	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	234.24	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	274.39	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	316.00	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	341.81	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	359.28	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	373.17	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	55.58	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	64.63	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	74.70	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	80.43	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	84.48	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	87.85	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	100.06	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	110.29	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	115.71	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	119.45	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	121.97	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	130.17	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	136.91	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	139.31	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	140.48	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	140.91	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	81.07	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:56:32 PM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	100.04	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	120.49	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	134.63	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	144.39	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	154.36	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	185.43	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	218.17	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	238.08	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	252.90	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	264.10	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	303.70	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	344.39	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	369.11	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	385.76	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	398.89	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	626237	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	383574	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	237441	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	180429	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	146476	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	127263	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	78024	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	47024	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	34652	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	27885	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	23442	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	13677	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	7846	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5679	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4460	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3706	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	589629	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	324625	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	187595	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	134408	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	105682	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	88084	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	50013	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	27552	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	19270	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14943	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	12207	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6488	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3399	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2315	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1744	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1399	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	860136	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	502504	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	302606	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	224989	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:57:16 PM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F5M 4/5/2019 3:42 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	90.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F5M 4/5/2019 3:42 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	90.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F5M 4/5/2019 3:42 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	90.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:57:16 PM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	58.51	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	75.54	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	94.88	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	107.63	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	116.83	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	126.29	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	154.61	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	186.58	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	206.52	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	221.03	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	232.82	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	273.09	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	313.99	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	338.90	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	356.57	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	370.45	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	54.76	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	63.15	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	73.18	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	79.49	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	83.34	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	86.97	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	98.44	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	109.01	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	114.38	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	117.84	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	120.52	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	128.94	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	135.49	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	138.06	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	139.13	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	139.59	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	80.13	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:57:16 PM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	98.46	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	119.82	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	133.81	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	143.51	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	153.34	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	183.28	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	216.09	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	236.08	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	250.48	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	262.16	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	302.00	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	341.98	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	365.94	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	382.75	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	395.88	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	620722	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	379420	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	238289	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	179869	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	146152	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	126623	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	77274	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	46609	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	34394	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	27650	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	23300	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	13613	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	7796	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5631	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4426	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3679	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	580932	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	317190	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	183794	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	132846	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	104260	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	87206	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	49200	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	27232	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	19050	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14742	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	12062	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6427	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3364	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2294	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1727	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1386	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	850163	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	494539	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	300935	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	223609	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:58:00 PM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 0 - Ready00

Batch

Specification

Date/Time

Status

F6M

4/5/2019 4:35 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	90.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 1 - Delay01

Batch

Specification

Date/Time

Status

F6M

4/5/2019 4:35 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	90.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0043

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA frequency sweep 90°C --- 2 - Freq02

Batch

Specification

Date/Time

Status

F6M

4/5/2019 4:35 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	90.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:58:00 PM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	57.72	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	74.71	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	93.41	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	106.65	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	116.08	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	124.66	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	153.16	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	185.66	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	204.89	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	219.78	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	231.56	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	270.69	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	312.09	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	336.61	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	354.90	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	368.44	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	54.17	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	63.27	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	72.65	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	78.43	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	83.22	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	86.93	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	98.21	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	108.82	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	114.03	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	117.74	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	119.52	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	128.82	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	134.81	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	137.51	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	138.70	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	138.70	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	79.16	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/5/2019 5:58:00 PM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	97.90	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	118.34	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	132.38	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	142.83	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	151.98	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	181.94	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	215.20	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	234.48	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	249.34	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	260.58	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	299.78	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	339.96	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	363.62	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	381.04	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	393.68	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	612399	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	375271	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	234599	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	178219	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	145214	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	124994	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	76551	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	46379	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	34122	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	27494	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	23173	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	13493	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	7749	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5593	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4406	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3659	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	574713	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	317806	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	182449	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	131068	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	104099	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	87166	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	49089	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	27184	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	18991	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14729	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11961	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6422	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3347	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2285	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1722	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1377	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	839838	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	491762	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	297194	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	221226	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:15:26 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 0 - Ready00

Batch

Specification

Date/Time

Status

F7m

4/5/2019 6:35 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	100.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 1 - Delay01

Batch

Specification

Date/Time

Status

F7m

4/5/2019 6:35 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	100.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 2 - Freq02

Batch

Specification

Date/Time

Status

F7m

4/5/2019 6:35 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	100.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:15:26 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	48.27	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	62.72	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	78.48	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	89.78	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	100.25	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	105.89	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	132.27	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	161.35	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	179.76	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	193.12	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	204.15	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	241.59	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	280.40	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	304.68	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	321.29	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	334.58	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	48.03	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	55.33	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	65.29	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	71.34	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	76.04	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	79.28	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	91.17	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	102.37	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	107.77	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	111.62	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	114.34	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	123.75	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	131.35	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	134.84	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	136.12	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	137.18	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	68.10	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:15:26 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	83.64	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	102.09	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	114.67	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	125.82	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	132.28	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	160.64	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	191.08	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	209.59	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	223.06	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	233.99	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	271.44	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	309.64	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	333.18	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	348.94	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	361.61	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	512152	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	315052	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	197094	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	150038	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	125409	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	106178	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	66109	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	40306	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	29938	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	24159	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	20430	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	12043	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	6962	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5062	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	3989	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3323	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	509553	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	277928	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	163985	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	119212	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	95117	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	79493	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	45565	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	25573	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	17948	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	13963	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11443	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6168	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3261	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2240	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1690	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1362	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	722457	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	420121	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	256392	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	191632	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:14:43 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 0 - Ready00

Batch

Specification

Date/Time

Status

F8M

4/5/2019 7:29 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	100.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 1 - Delay01

Batch

Specification

Date/Time

Status

F8M

4/5/2019 7:29 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	100.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 2 - Freq02

Batch

Specification

Date/Time

Status

F8M

4/5/2019 7:29 PM

Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	100.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:14:43 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	46.73	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	60.85	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	77.57	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	88.70	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	95.40	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	104.78	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	129.79	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	159.47	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	177.47	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	191.03	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	201.18	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	238.64	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	277.17	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	300.60	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	317.82	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	330.92	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	46.05	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	54.82	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	64.39	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	70.66	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	74.55	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	77.97	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	89.80	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	100.36	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	106.06	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	109.82	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	112.38	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	121.21	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	129.78	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	133.05	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	134.67	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	135.34	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	65.61	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:14:43 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	81.91	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	100.81	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	113.41	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	121.08	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	130.61	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	157.83	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	188.42	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	206.75	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	220.34	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	230.44	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	267.66	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	306.05	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	328.73	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	345.17	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	357.53	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	495812	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	305666	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	194806	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	148230	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	119347	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	105061	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	64872	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	39838	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	29557	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	23896	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	20134	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	11896	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	6882	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	4995	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	3945	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3286	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	488505	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	275365	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	161716	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	118088	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	93259	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	78180	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	44883	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	25070	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	17664	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	13738	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11247	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6042	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3222	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2211	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1672	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1344	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	696036	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	411410	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	253183	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	189518	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:13:30 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F9M 4/5/2019 10:22 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	100.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F9M 4/5/2019 10:22 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	100.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0078

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 100°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F9M 4/5/2019 10:22 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	100.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:13:30 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	47.92	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	61.85	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	78.88	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	89.17	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	97.63	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	106.21	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	131.04	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	160.78	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	178.93	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	192.45	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	202.98	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	239.19	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	278.66	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	302.47	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	319.15	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	332.51	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	46.95	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	55.47	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	65.66	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	71.19	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	75.51	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	78.97	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	90.31	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	101.76	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	107.43	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	110.85	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	113.70	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	122.59	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	130.79	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	134.55	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	135.77	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	136.40	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	67.09	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:13:30 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	83.08	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	102.63	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	114.10	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	123.43	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	132.35	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	159.14	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	190.28	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	208.71	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	222.09	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	232.65	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	268.78	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	307.83	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	331.05	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	346.83	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	359.40	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	508356	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	310680	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	198093	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	149019	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	122137	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	106496	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	65493	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	40165	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	29799	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	24075	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	20313	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	11923	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	6919	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5026	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	3962	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3302	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	498122	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	278616	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	164908	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	118959	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	94457	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	79178	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	45138	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	25420	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	17892	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	13867	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11378	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6111	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3247	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2236	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1685	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1355	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	711724	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	417312	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	257751	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	190677	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:12:27 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F10M 4/5/2019 11:20 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	110.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F10M 4/5/2019 11:20 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	110.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F10M 4/5/2019 11:20 PM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	110.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:12:27 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	48.16	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	62.73	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	79.01	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	89.78	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	98.32	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	106.63	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	132.09	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	161.23	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	179.49	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	192.98	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	203.86	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	241.48	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	280.48	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	303.48	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	321.53	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	335.16	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	46.28	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	54.84	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	64.16	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	70.38	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	76.66	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	78.43	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	90.88	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	102.15	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	108.01	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	112.33	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	115.15	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	126.03	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	133.88	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	136.94	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	139.56	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	140.51	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	66.79	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:12:27 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	83.32	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	101.78	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	114.08	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	124.67	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	132.37	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	160.33	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	190.87	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	209.48	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	223.29	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	234.13	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	272.39	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	310.79	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	332.94	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	350.51	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	363.42	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	510912	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	315101	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	198441	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	150029	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	122994	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	106916	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	66022	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	40277	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	29891	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	24141	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	20402	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	12037	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	6964	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5043	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	3992	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3329	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	491022	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	275464	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	161133	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	117617	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	95893	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	78641	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	45421	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	25519	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	17988	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14052	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11524	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6282	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3324	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2275	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1732	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1395	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	708614	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	418532	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	255622	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	190637	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:11:40 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F11M 4/6/2019 12:15 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	110.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F11M 4/6/2019 12:15 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	110.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F11M 4/6/2019 12:15 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	110.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:11:41 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	47.39	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	61.73	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	77.21	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	88.44	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	95.21	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	105.12	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	130.79	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	159.62	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	177.88	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	191.35	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	202.19	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	239.02	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	278.64	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	302.25	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	319.10	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	332.97	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	45.39	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	53.70	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	63.22	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	69.85	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	74.53	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	78.17	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	89.91	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	101.45	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	107.25	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	111.36	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	114.30	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	124.79	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	132.88	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	136.52	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	138.54	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	139.85	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	65.63	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:11:41 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	81.82	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	99.79	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	112.70	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	120.91	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	131.00	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	158.71	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	189.13	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	207.71	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	221.40	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	232.26	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	269.64	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	308.70	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	331.65	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	347.88	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	361.15	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	502794	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	310088	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	193921	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	147795	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	119107	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	105403	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	65370	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	39875	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	29624	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	23938	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	20234	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	11915	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	6918	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5022	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	3961	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3307	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	481604	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	269751	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	158775	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	116732	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	93231	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	78380	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	44938	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	25343	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	17862	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	13931	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11439	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6220	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3299	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2268	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1720	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1389	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	696235	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	410999	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	250629	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	188334	Pa.s					Tested

**Continental Mabor
Lousado**


4/8/2019 8:10:44 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
 F12M 4/6/2019 1:30 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Ready Temp	110.0	C					Setpoint
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
 F12M 4/6/2019 1:30 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	110.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0075

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 110°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
 F12M 4/6/2019 1:30 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	110.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:10:44 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	48.64	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	62.96	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	78.94	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	90.01	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	99.02	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	106.57	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	132.21	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	161.56	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	179.68	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	193.36	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	203.98	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	241.92	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	280.76	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	304.73	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	322.28	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	335.69	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	46.34	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	54.86	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	64.65	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	70.66	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	75.75	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	78.99	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	90.78	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	102.23	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	108.13	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	112.31	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	115.36	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	125.11	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	133.97	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	137.76	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	139.68	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	141.04	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	67.18	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:10:44 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	83.51	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	102.03	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	114.43	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	124.68	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	132.65	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	160.37	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	191.19	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	209.71	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	223.61	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	234.35	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	272.36	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	311.08	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	334.42	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	351.24	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	364.12	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	516027	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	316243	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	198246	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	150417	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	123875	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	106853	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	66080	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	40359	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	29924	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	24189	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	20414	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	12059	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	6971	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5063	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4001	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3334	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	491671	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	275546	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	162376	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	118088	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	94763	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	79202	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	45372	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	25539	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	18008	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14049	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11545	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6236	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3326	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2289	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1734	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1401	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	712758	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	419447	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	256257	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	191233	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:08:59 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F13M 4/6/2019 3:14 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	120.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F13M 4/6/2019 3:14 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	120.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F13M 4/6/2019 3:14 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	120.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:08:59 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	53.34	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	71.26	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	89.46	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	102.29	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	112.33	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	120.53	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	147.31	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	177.93	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	197.00	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	211.02	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	222.30	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	261.81	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	302.36	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	327.11	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	345.39	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	360.12	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	46.93	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	55.32	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	65.21	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	71.32	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	74.21	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	80.10	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	92.63	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	105.11	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	111.60	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	115.88	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	119.14	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	130.38	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	140.09	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	144.20	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	146.43	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	148.18	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	71.04	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:08:59 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	90.21	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	110.70	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	124.70	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	134.63	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	144.72	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	174.01	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	206.66	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	226.42	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	240.75	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	252.22	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	292.47	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	333.24	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	357.48	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	375.15	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	389.41	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	565877	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	357930	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	224678	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	170942	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	140524	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	120851	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	73625	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	44450	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	32808	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	26398	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	22247	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	13050	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	7507	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5435	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4288	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3576	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	497842	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	277886	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	163760	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	119188	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	92831	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	80314	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	46300	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	26258	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	18587	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14497	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11924	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6499	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3478	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2396	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1818	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1472	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	753699	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	453139	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	278024	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	208392	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:07:34 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076
Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F14M 4/6/2019 4:53 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	120.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076
Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F14M 4/6/2019 4:53 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	120.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076
Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F14M 4/6/2019 4:53 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	120.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:07:34 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	53.02	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	70.99	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	89.53	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	102.17	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	112.69	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	120.92	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	148.16	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	178.19	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	197.54	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	211.77	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	223.57	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	263.02	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	304.11	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	329.98	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	348.19	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	362.95	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	47.10	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	55.91	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	66.05	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	71.84	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	76.59	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	80.75	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	93.21	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	106.14	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	112.54	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	116.96	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	120.21	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	132.27	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	141.29	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	145.95	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	148.20	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	149.54	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	70.92	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:07:34 AM

Complete Result

Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	90.37	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	111.26	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	124.90	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	136.26	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	145.40	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	175.04	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	207.41	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	227.35	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	241.92	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	253.83	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	294.40	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	335.33	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	360.81	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	378.42	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	392.55	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	562498	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	356585	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	224864	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	170742	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	140973	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	121242	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	74052	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	44514	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	32898	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	26492	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	22374	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	13111	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	7550	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5483	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4322	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3605	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	499646	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	280846	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	165884	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	120059	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	95817	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	80966	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	46588	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	26515	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	18742	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14631	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	12030	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6593	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3508	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2425	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1840	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1485	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	752363	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	453902	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	279430	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	208727	Pa.s					Tested

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:05:54 AM

Complete Result

Page 1 of 5

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 0 - Ready00

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F15M 4/6/2019 6:07 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sample Preheat Time	0.01	min					Setpoint
Ready Temp	120.0	C					Setpoint
Ready Temp Range	0.5	C					Setpoint
Ready Time	0.20	min					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 1 - Delay01

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F15M 4/6/2019 6:07 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Time	5.00	min					Setpoint
Temp	120.0	C					Setpoint
Freq	0.0	rad/s					Setpoint
Angle	0.000	%					Setpoint

Compound: FMS-B00163---- **Order:** 20190405-0076

Caply Skimcoat Compound

Test: RPA Frequency Sweep 120°C --- 2 - Freq02

Batch **Specification** **Date/Time** **Status**
F15M 4/6/2019 6:07 AM Tested

Variable	Result	Unit	LSL	LWL	UWL	USL	Status
Sweep Length	16.000	[]					Setpoint
Number of Readings	5.000	[]					Setpoint
Temperature	120.0	C					Setpoint
Freq@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Setpoint
Freq@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Setpoint
Freq@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Setpoint
Freq@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Setpoint
Freq@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Setpoint
Freq@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Setpoint
Freq@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Setpoint
Freq@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Setpoint
Freq@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Setpoint
Freq@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Setpoint
Freq@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Setpoint
Freq@20.0 rad/s	20.0	rad/s					Setpoint
Freq@40.0 rad/s	40.0	rad/s					Setpoint
Freq@60.0 rad/s	60.0	rad/s					Setpoint
Freq@80.0 rad/s	80.0	rad/s					Setpoint

Continental Mabor Lousado



4/8/2019 8:05:56 AM

Complete Result

Page 2 of 5

Freq@100.0 rad/s	100.0	rad/s					Setpoint
Angle	13.950	%					Setpoint
Frequency@0.1 rad/s	0.1	rad/s					Tested
Frequency@0.2 rad/s	0.2	rad/s					Tested
Frequency@0.4 rad/s	0.4	rad/s					Tested
Frequency@0.6 rad/s	0.6	rad/s					Tested
Frequency@0.8 rad/s	0.8	rad/s					Tested
Frequency@1.0 rad/s	1.0	rad/s					Tested
Frequency@2.0 rad/s	2.0	rad/s					Tested
Frequency@4.0 rad/s	4.0	rad/s					Tested
Frequency@6.0 rad/s	6.0	rad/s					Tested
Frequency@8.0 rad/s	8.0	rad/s					Tested
Frequency@10.0 rad/s	10.0	rad/s					Tested
Frequency@20.0 rad/s	20.1	rad/s					Tested
Frequency@40.0 rad/s	40.3	rad/s					Tested
Frequency@60.0 rad/s	60.2	rad/s					Tested
Frequency@80.0 rad/s	80.6	rad/s					Tested
Frequency@100.0 rad/s	100.7	rad/s					Tested
G'@0.1 rad/s	52.16	kPa					Tested
G'@0.2 rad/s	69.77	kPa					Tested
G'@0.4 rad/s	88.61	kPa					Tested
G'@0.6 rad/s	100.84	kPa					Tested
G'@0.8 rad/s	110.00	kPa					Tested
G'@1.0 rad/s	118.82	kPa					Tested
G'@2.0 rad/s	145.94	kPa					Tested
G'@4.0 rad/s	176.13	kPa					Tested
G'@6.0 rad/s	195.32	kPa					Tested
G'@8.0 rad/s	209.54	kPa					Tested
G'@10.0 rad/s	220.81	kPa					Tested
G'@20.0 rad/s	260.27	kPa					Tested
G'@40.0 rad/s	301.52	kPa					Tested
G'@60.0 rad/s	326.74	kPa					Tested
G'@80.0 rad/s	345.18	kPa					Tested
G'@100.0 rad/s	359.41	kPa					Tested
G''@0.1 rad/s	46.41	kPa					Tested
G''@0.2 rad/s	55.70	kPa					Tested
G''@0.4 rad/s	65.14	kPa					Tested
G''@0.6 rad/s	71.87	kPa					Tested
G''@0.8 rad/s	77.15	kPa					Tested
G''@1.0 rad/s	80.00	kPa					Tested
G''@2.0 rad/s	92.89	kPa					Tested
G''@4.0 rad/s	105.02	kPa					Tested
G''@6.0 rad/s	111.65	kPa					Tested
G''@8.0 rad/s	116.00	kPa					Tested
G''@10.0 rad/s	119.39	kPa					Tested
G''@20.0 rad/s	131.06	kPa					Tested
G''@40.0 rad/s	140.49	kPa					Tested
G''@60.0 rad/s	144.27	kPa					Tested
G''@80.0 rad/s	146.77	kPa					Tested
G''@100.0 rad/s	148.30	kPa					Tested
G* @0.1 rad/s	69.82	kPa					Tested

Continental Mabor Lousado



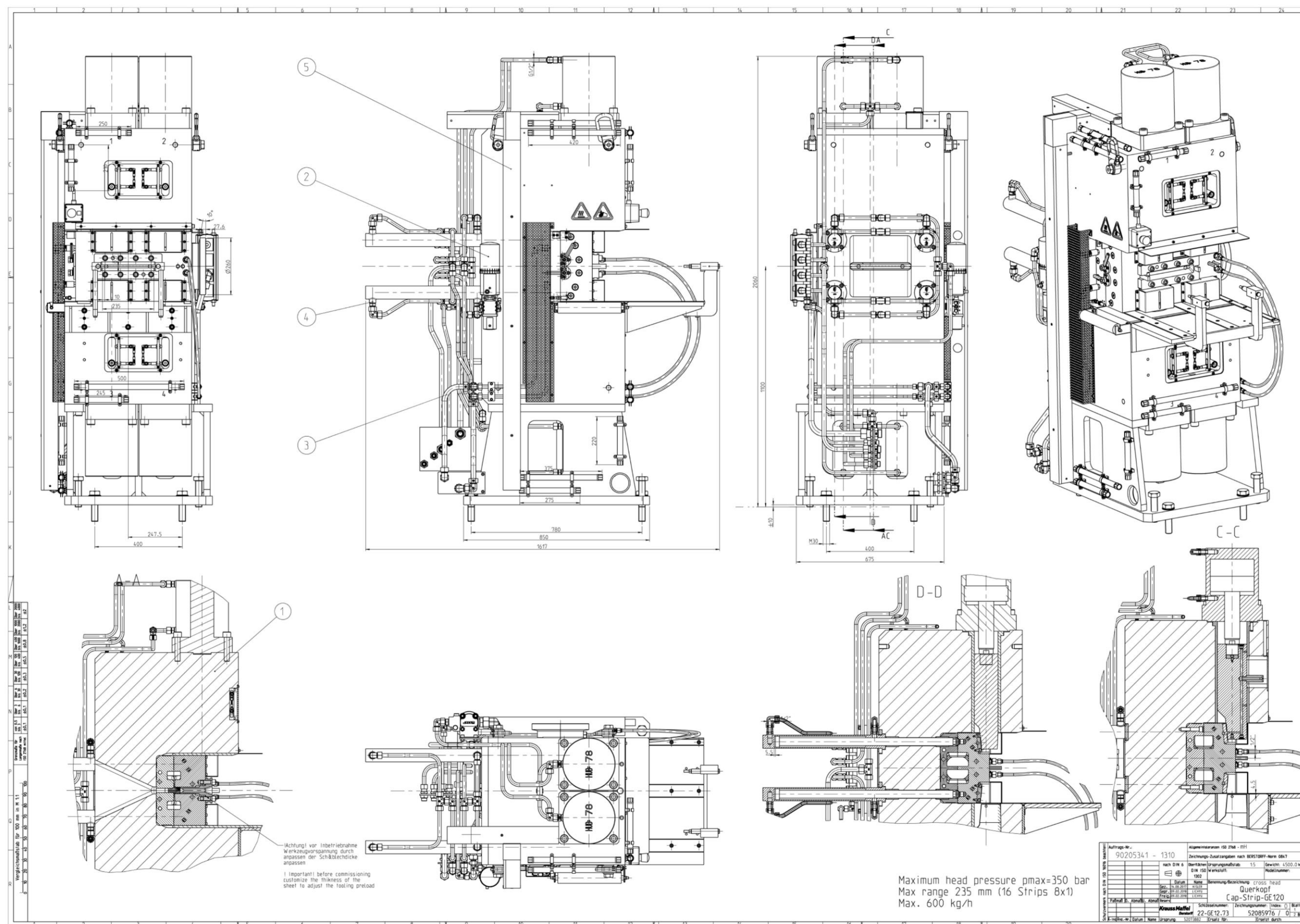
4/8/2019 8:05:56 AM

Complete Result

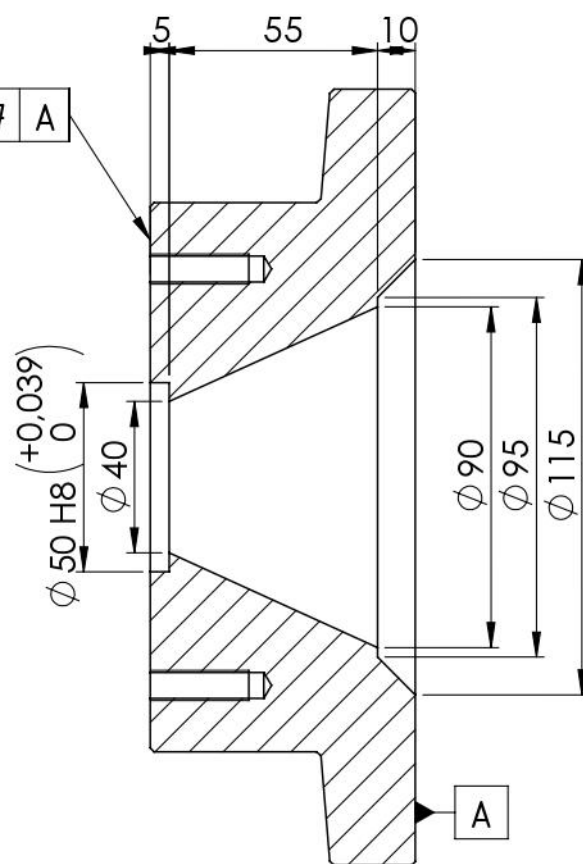
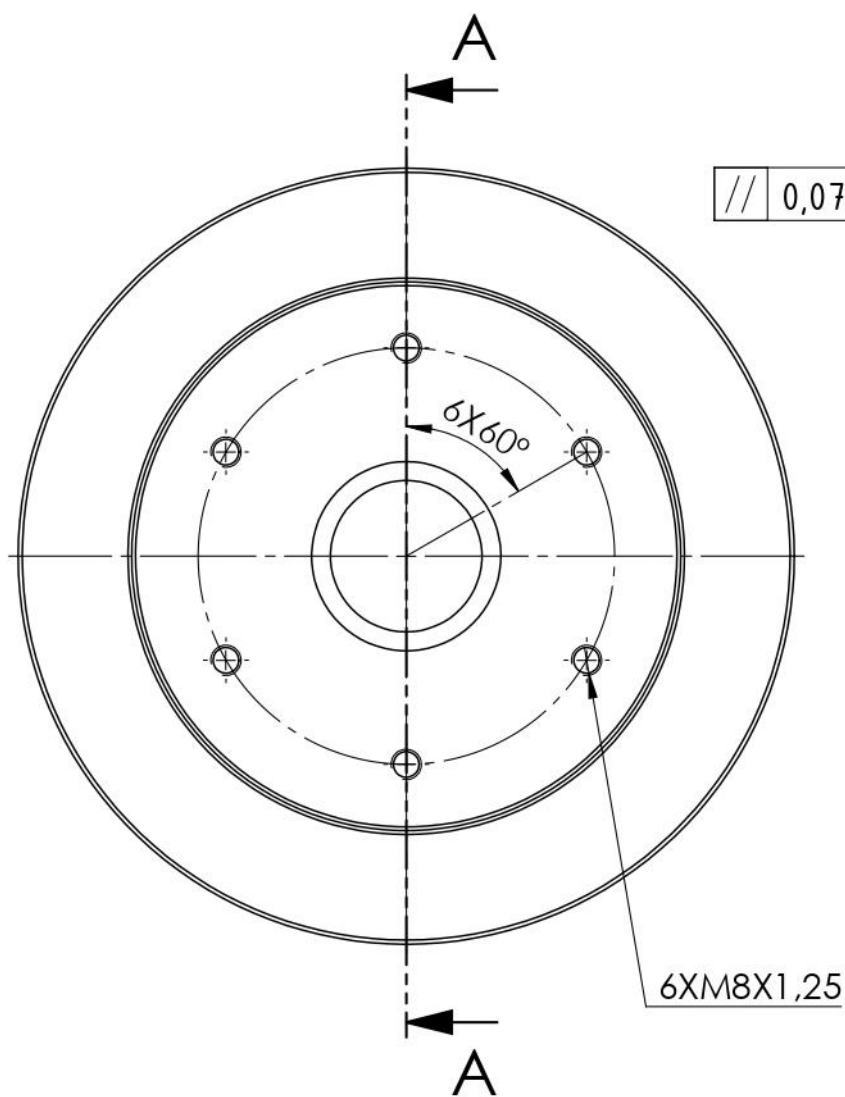
Page 3 of 5

G* @0.2 rad/s	89.27	kPa					Tested
G* @0.4 rad/s	109.98	kPa					Tested
G* @0.6 rad/s	123.83	kPa					Tested
G* @0.8 rad/s	134.36	kPa					Tested
G* @1.0 rad/s	143.24	kPa					Tested
G* @2.0 rad/s	172.99	kPa					Tested
G* @4.0 rad/s	205.06	kPa					Tested
G* @6.0 rad/s	224.98	kPa					Tested
G* @8.0 rad/s	239.51	kPa					Tested
G* @10.0 rad/s	251.02	kPa					Tested
G* @20.0 rad/s	291.40	kPa					Tested
G* @40.0 rad/s	332.64	kPa					Tested
G* @60.0 rad/s	357.17	kPa					Tested
G* @80.0 rad/s	375.09	kPa					Tested
G* @100.0 rad/s	388.80	kPa					Tested
n" @0.1 rad/s	553374	Pa.s					Tested
n" @0.2 rad/s	350440	Pa.s					Tested
n" @0.4 rad/s	222537	Pa.s					Tested
n" @0.6 rad/s	168509	Pa.s					Tested
n" @0.8 rad/s	137610	Pa.s					Tested
n" @1.0 rad/s	119134	Pa.s					Tested
n" @2.0 rad/s	72942	Pa.s					Tested
n" @4.0 rad/s	43998	Pa.s					Tested
n" @6.0 rad/s	32528	Pa.s					Tested
n" @8.0 rad/s	26213	Pa.s					Tested
n" @10.0 rad/s	22098	Pa.s					Tested
n" @20.0 rad/s	12974	Pa.s					Tested
n" @40.0 rad/s	7486	Pa.s					Tested
n" @60.0 rad/s	5429	Pa.s					Tested
n" @80.0 rad/s	4285	Pa.s					Tested
n" @100.0 rad/s	3569	Pa.s					Tested
n' @0.1 rad/s	492402	Pa.s					Tested
n' @0.2 rad/s	279752	Pa.s					Tested
n' @0.4 rad/s	163595	Pa.s					Tested
n' @0.6 rad/s	120112	Pa.s					Tested
n' @0.8 rad/s	96506	Pa.s					Tested
n' @1.0 rad/s	80216	Pa.s					Tested
n' @2.0 rad/s	46425	Pa.s					Tested
n' @4.0 rad/s	26236	Pa.s					Tested
n' @6.0 rad/s	18595	Pa.s					Tested
n' @8.0 rad/s	14511	Pa.s					Tested
n' @10.0 rad/s	11948	Pa.s					Tested
n' @20.0 rad/s	6533	Pa.s					Tested
n' @40.0 rad/s	3488	Pa.s					Tested
n' @60.0 rad/s	2397	Pa.s					Tested
n' @80.0 rad/s	1822	Pa.s					Tested
n' @100.0 rad/s	1473	Pa.s					Tested
n* @0.1 rad/s	740731	Pa.s					Tested
n* @0.2 rad/s	448408	Pa.s					Tested
n* @0.4 rad/s	276199	Pa.s					Tested
n* @0.6 rad/s	206935	Pa.s					Tested

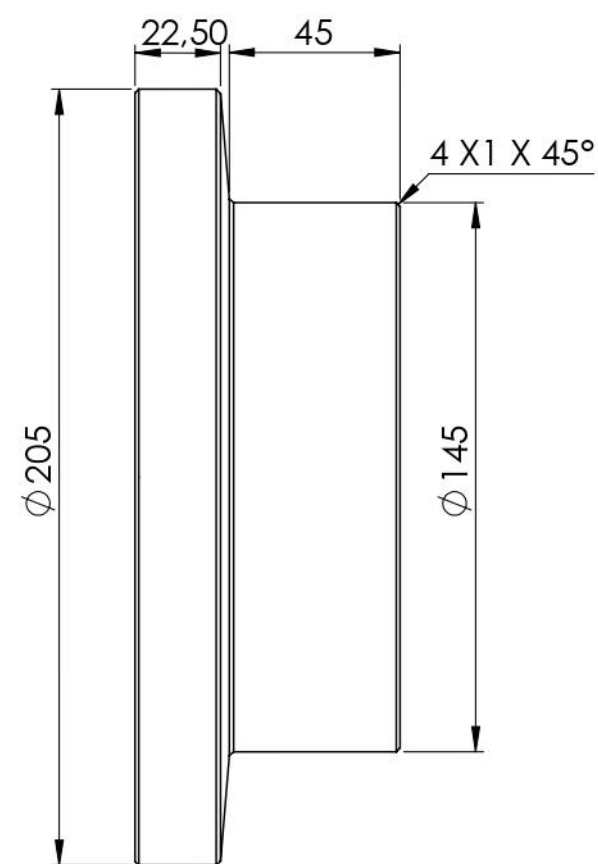
8.10 ANEXO 10 – Desenho técnico do cabeçote de uma *Cap strip*



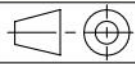
8.11 ANEXO 11 – Desenho técnico do equipamento para ensaios de extrusão

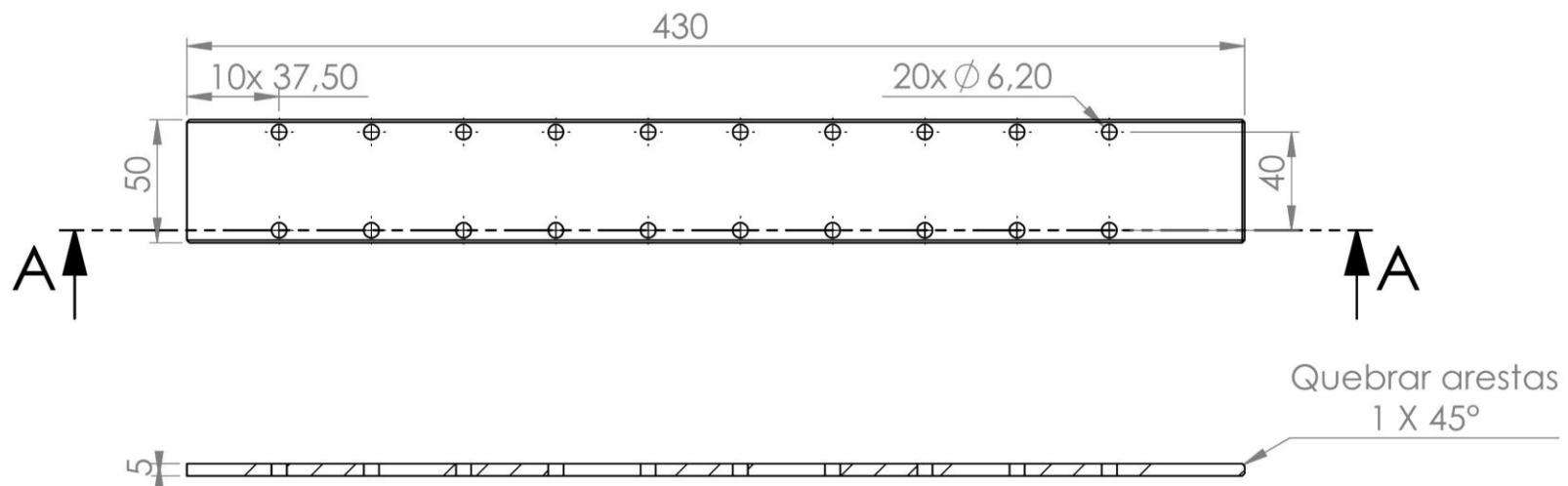


Secção A-A

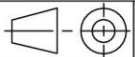


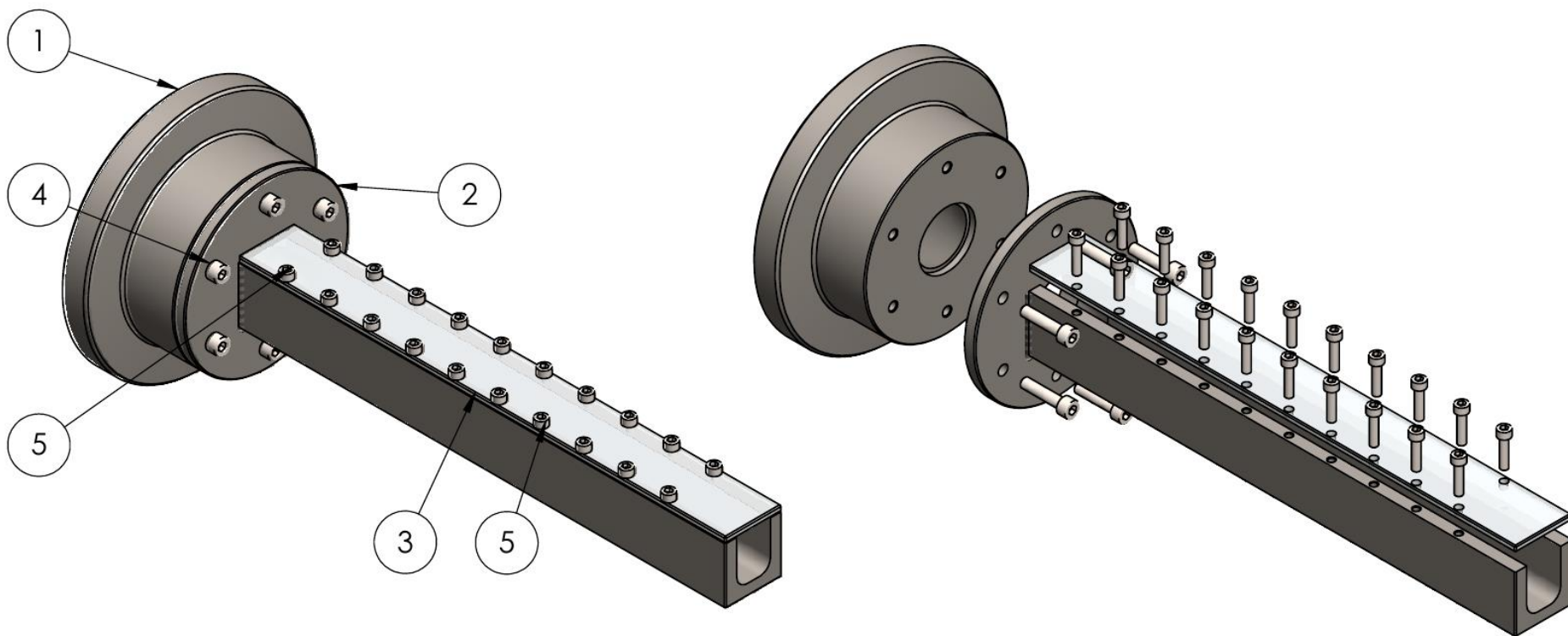
✓ Ra 1,6

	Nome	Data					Quantidade	1
Des.	André S.	07/02/2019					Massa (kg)	9.63
Vist.							Tratamento	-
Aprov.	Pedro N.	10/02/2019	ISO 2768	mK	Escala- 1:2		Material	C45E
Nome	Adaptador						Descrição	
							Desenho	1/1



Secção A-A

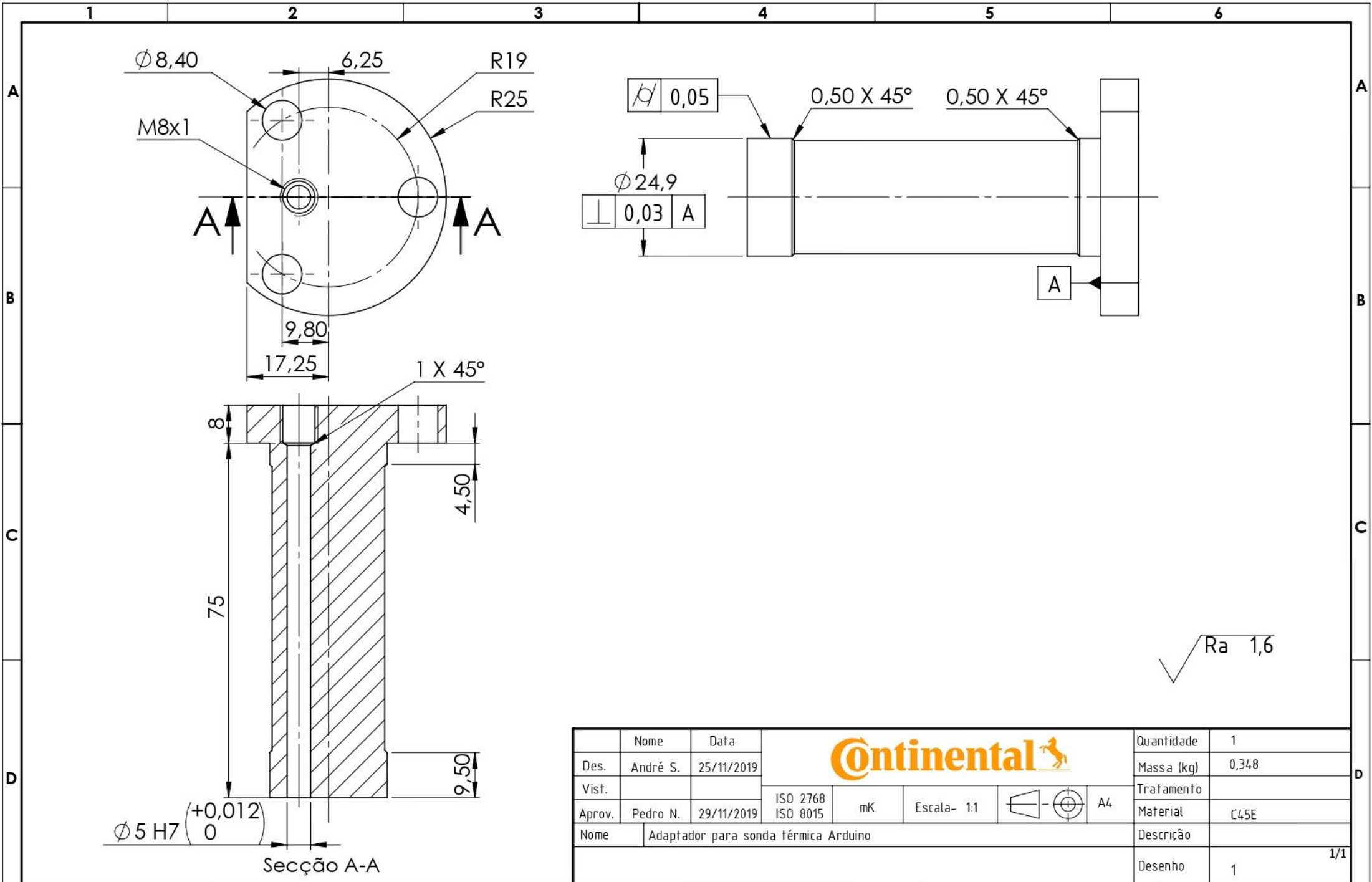
	Nome	Data						Quantidade	1
Des.	André S.	07/02/2019						Massa (kg)	-
Vist.								Tratamento	Nenhum
Aprov.	Pedro N.	10/02/2019	ISO 2768	mK	Escala- 1:3		A4	Material	PC® 1000
Nome		Tampa de Policarbonato						Descrição	-
								Desenho	31/1

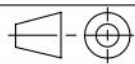


Pos.	Nome	Des. Nº	Material	Descrição	Tipo	Qty.	CL
1	Adaptador	1	Ck 45			1	
2	Provete	2	Ck 45			1	
3	Acrílico	3	PC® 1000			1	
4	ISO 4762 M8 x 35 - 35C		Aço			6	
5	ISO 4762 M6 x 25 - 25C		Aço			20	

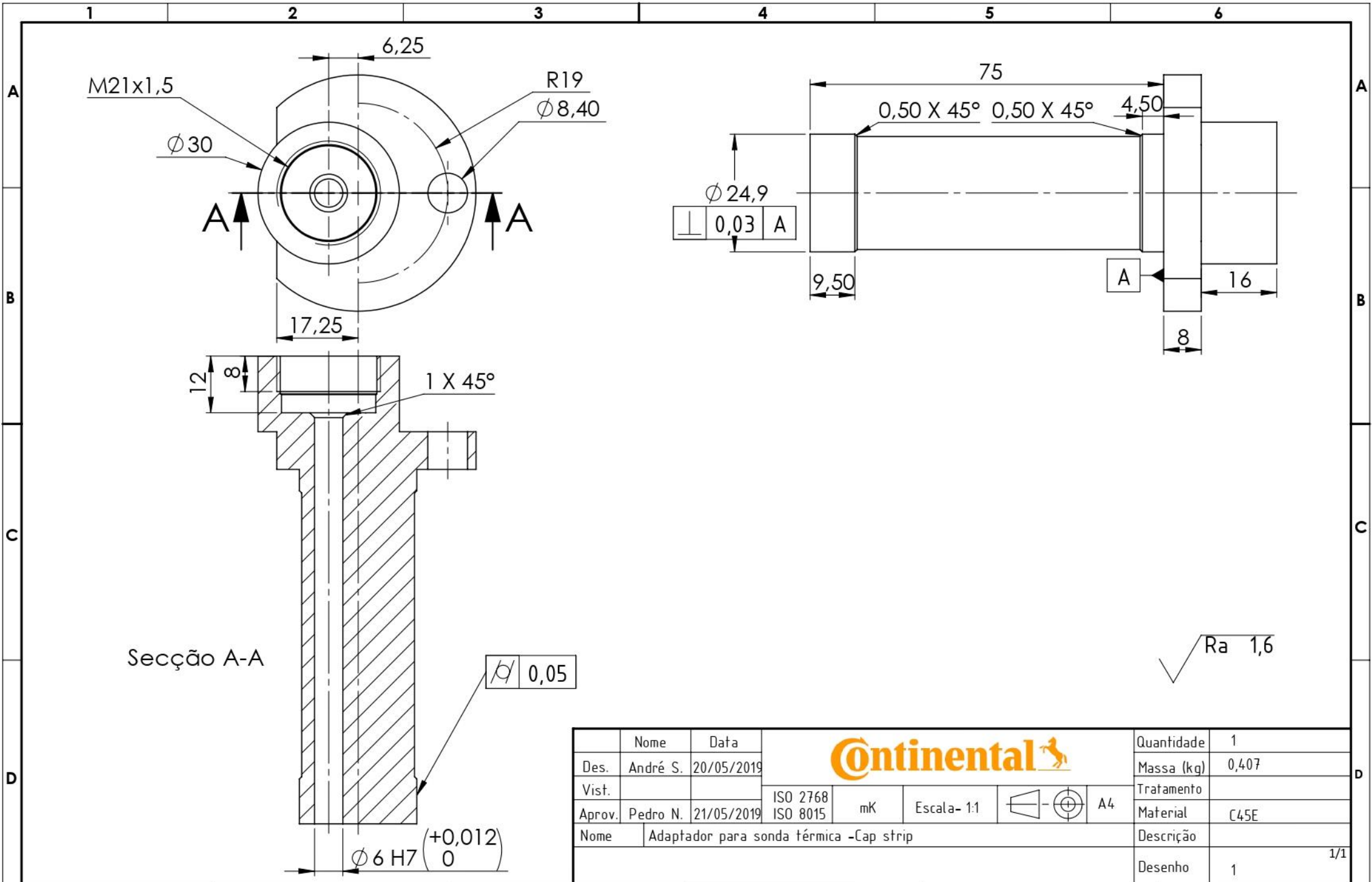
	Nome	Data						Quantidade	
Des.	André S.	07/02/2019						Massa (kg)	
Vist.								Tratamento	
Aprov.	Pedro N.	11/02/2019	ISO 2768	mK	Escala- 1:4		A4	Material	
Nome	Montagem de conjunto							Descrição	
								Desenho	1/1

8.12 ANEXO 12 – Desenho técnico do adaptador para sonda térmica (Arduino®)

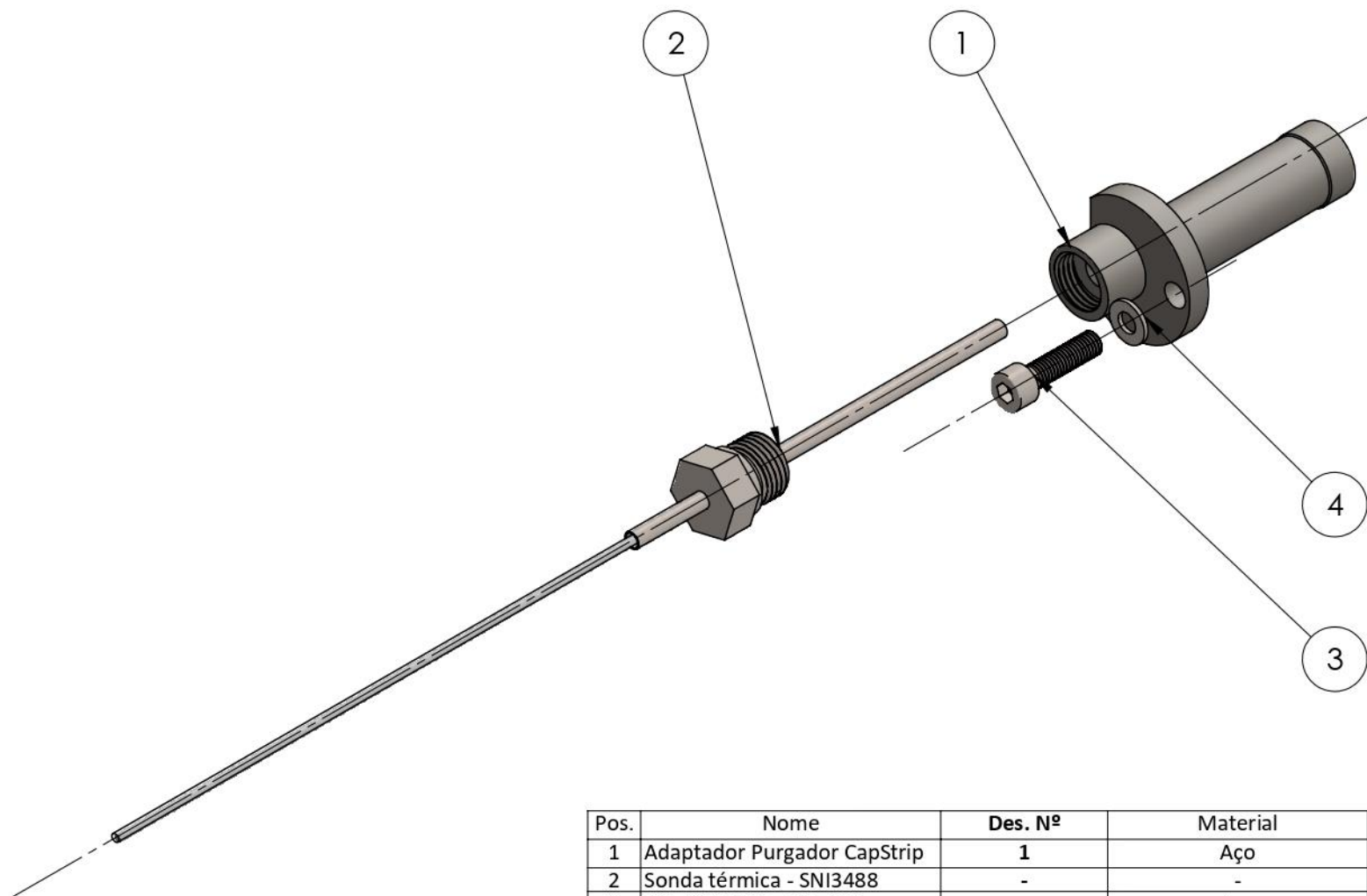


	Nome	Data	Continental				Quantidade	1
Des.	André S.	25/11/2019					Massa (kg)	0,348
Vist.							Tratamento	
Aprov.	Pedro N.	29/11/2019	ISO 2768 ISO 8015	mK	Escala- 1:1	 A4	Material	C45E
Nome		Adaptador para sonda térmica Arduino					Descrição	
							Desenho	1 1/1

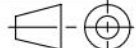
8.13 ANEXO 13 – Desenho técnico do adaptador para a nova sonda RTD PT100



	Nome	Data						Quantidade	1
Des.	André S.	20/05/2019							
Vist.			ISO 2768 ISO 8015	mK	Escala- 1:1		A4	Tratamento	
Aprov.	Pedro N.	21/05/2019						Material	C45E
Nome		Adaptador para sonda térmica -Cap strip						Descrição	
								Desenho	1 1/1



Pos.	Nome	Des. Nº	Material	Descrição	Tipo	Qty.	CL
1	Adaptador Purgador CapStrip	1	Aço	-	-	1	-
2	Sonda térmica - SNI3488	-	-	-	-	1	-
3	ISO 4762 M8 x 30 - 30S	-	Aço	-	-	1	-
4	ISO 10673-7.4-S	-	Aço	-	-	1	-

4	ISO 10079-7:43		A4				Quantidade	1
	Nome	Data					Massa (kg)	0,593
Des.	André S.	21/05/2019					Tratamento	Sem tratamento
Vist.								
Aprov.	André S.	21/05/2019	ISO 2768	mK	Escala- 1:2		A4	
Nome		Vista explodida - Purgador CS02					Descrição	
							Desenho	2
								1/1