



Desenvolvimento de um braço de suspensão de um automóvel eléctrico em material compósito

PAULO JORGE AGUIAR GONÇALVES

novembro de 2017

DESENVOLVIMENTO DE UM BRAÇO DE SUSPENSÃO DE UM AUTOMÓVEL ELÉCTRICO EM MATERIAL COMPÓSITO

Paulo Jorge Aguiar Gonçalves

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestrado de Engenharia Mecânica



DESENVOLVIMENTO DE UM BRAÇO DE SUSPENSÃO DE UM AUTOMÓVEL ELÉCTRICO EM MATERIAL COMPÓSITO

Paulo Jorge Aguiar Gonçalves

1110452

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 Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação da Engenheira Cláudia Sofia Queiroga Cristóvão e do Doutor Francisco José Gomes da Silva.

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestrado de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

A definir

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Co-orientadores

Engenheira Cláudia Sofia Queiroga Cristóvão

Engenheira de Polímeros, INEGI

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

A realização desta etapa importante da minha vida não seria possível se não fosse o apoio e presença de um grupo muito especial de pessoas. Sendo assim, gostaria de pelo menos mostrar a minha apreciação e gratidão por todos aqueles que se manifestaram, directa ou indirectamente, neste longo caminho de árduo trabalho.

Em primeiro lugar quero agradecer à minha supervisora **Eng.ª Cláudia Cristóvão** pela oportunidade que me forneceu ao aceitar a tarefa de orientar esta dissertação na empresa acolhedora. O seu constante apoio, a sua orientação, sugestões e disponibilidade em ouvir-me, foram o que possibilitou a minha adaptação e realização desta importante etapa. Muitas foram as vezes em que debatemos sobre o que era realmente importante e qual o caminho a seguir na realização desta dissertação, o que me permitiu adquirir uma diferente, mas uma melhor percepção das coisas.

Ao meu orientador **Eng.º Raul Campilho** que desde o início se prestou disponível em aceitar-me como seu orientando. Quero agradecer por toda a sua ajuda, orientação e opiniões, que me foi fornecendo durante este caminho e, também, pela atenção dispensada e profissionalismo com que sempre me recebeu.

Quero agradecer também aos meus colegas **Eng.º Rui Gomes, Eng.º João Silva** e a **Eng.ª Diana Pais**, foram eles que mais facilitaram a minha integração na equipa do projecto da qual esta dissertação faz parte. Os seus conselhos, comentários oportunos e “oportunos” ao longo dos dias ajudavam a suavizar as situações quando estas se mostravam mais difíceis.

À empresa acolhedora, **INEGI**, pela aceitação de me receber como estagiário para finalização do mestrado e, a toda a unidade da **UMEC** que me recebeu logo de início

com braços completamente abertos. Não há uma única pessoa desta incrível unidade que não mereça uma vénia de minha pessoa. Um grupo de pessoas muito solidário entre si e sempre com grande profissionalismo.

Por último, mas mais importante ainda, quero agradecer à minha família que desde o primeiro dos inícios esteve, e está, sempre lá para mim.

Ao meu pai, **Paulo Jorge Gavina Gonçalves**, que sempre se esforçou para que eu pudesse seguir sempre em frente com os meus estudos sem preocupações. Por estar sempre lá, mesmo quando embarcado, em todas as etapas da minha vida. À minha mãe, **Liliana Patrícia de Castro Aguiar Gonçalves**, por todo o apoio, carinho e paciência em aturar um filho como eu. Posso dizer, afirmar, que é graças a ela e à educação que me deu que sou capaz de estar onde estou neste momento. À minha irmã, **Fátima Daniela Aguiar Gonçalves**, pela sua presença durante estes anos, e espero por muitos mais, que sem o saber, me dava as forças para ultrapassar as dificuldades que ia encontrando. É a eles a quem mais dedico este documento.

Gostaria também de agradecer ao consórcio, pela oportunidade fornecida para a realização desta dissertação neste projecto, de me receberem nas reuniões com grande entusiasmo e expectativas, o que espero que sejam sido atingidas e superadas.

Esta tese foi realizada no âmbito de um dos projectos em curso no INEGI (instituição de acolhimento), o LaTCh II (Lightweight Thermoplastic Composites II), que conta com o cofinanciamento do COMPETE 2020 no âmbito do Sistema de Incentivos à I&DT na vertente de Co-promoção (Consórcio: Moliporex, Cadflow, MCG e INEGI).

Cofinanciado por:



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

PALAVRAS CHAVE

Braço de suspensão, *One-shot process*, Fibra de Carbono, PA6, Análise elementos finitos

RESUMO

Esta dissertação teve como objectivo principal o desenvolvimento de uma solução em material compósito para a produção de um componente da suspensão automóvel, o braço de suspensão, que se situasse num patamar intermédio na relação peso/custo relativamente às soluções já existentes em mercado, tipicamente em aço. Como valores alvo e tendo como referência um braço de suspensão em aço, era esperada uma redução em massa de cerca de 40% sem exceder o dobro dos custos de produção do mesmo.

Todo o trabalho desenvolvido foi orientado no sentido da exploração de tecnologias como a estampagem a quente de compósitos de matriz termoplástica combinada com a injeção (*one-shot process*). Na selecção de materiais a adoptar procuraram-se matérias-primas que apresentassem uma boa relação desempenho/custo, tendo sempre em vista o tipo de aplicação final.

A determinação de uma solução que desse resposta aos requisitos definidos foi obtida recorrendo-se à análise por elementos finitos (FEA). O estudo compreendeu várias análises de um processo iterativo, nas quais se fez variar factores como a geometria, os materiais e a configuração dos laminados, até se obter uma solução que cumprisse os objectivos de forma optimizada.

O trabalho desenvolvido permitiu alcançar uma solução em compósito, constituída por um laminado em matriz de PA6 e reforço de fibra de carbono contínua, onde posteriormente são sobre-injectadas *ribs* de PA6 carregadas com 60% de fibras de vidro curtas.

A solução encontrada garantiu uma redução de 45% do peso em relação ao componente em aço e num acréscimo de cerca de 1,65 vezes ao custo de produção.

KEYWORDS

Suspension Arm, One-shot process, Carbon Fiber, PA6, Finite Element Analysis

ABSTRACT

The main objective of this thesis was the development of a composite material solution to produce a component of the car suspension, the suspension arm, which would be at an intermediate level in terms of weight/cost with regard to solutions already on the market, typically in steel. As target values and having as reference a steel suspension arm, a mass reduction of about 40% was expected without exceeding twice the production cost thereof.

All the work developed was oriented towards the development of technologies such as hot stamping of thermoplastic matrix composites combined with injection (one-shot process). In the selection of materials to be adopted, raw materials were searched that presented a good performance/cost ratio, always considering the type of final application.

The determination of a solution that met the defined requirements was obtained by using finite element analysis (FEA). The study comprised several analyzes of an iterative process, in which factors such as geometry, materials and the configuration of the laminates were varied, until a solution was achieved that optimally fulfilled the objectives.

The developed work allowed to reach a composite solution consisting of a PA6 matrix laminate and continuous carbon fiber reinforcement, where PA6 ribs loaded with 60% short glass fibers are subsequently over-injected.

The solution found a reduction of 45% of the weight in relation to the steel component and an increase of about 1.65 times the cost of production.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AFP	<i>Automated Fiber Placement</i>
BCC	<i>Body-Centered Cubic Structure</i>
BMC	<i>Bulk Moulding Compound</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CE	Comissão Europeia
EEA	<i>European Environment Agency</i>
FCC	<i>Face-Centered Cubic Structure</i>
GMT	<i>Glass-Mat-reinforced Thermoplastics</i>
HCP	<i>Hexagonal Close Packing Structure</i>
HSLA	<i>High Strength Low-Alloy</i>
HSS	<i>High Strength Steel</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
PE	Polietileno
PEEK	Polieteretercetona
PEI	Polieterimida
PPS	Sulfeto de Polifenileno
RIM	<i>Reaction Injection Moulding</i>

RTM	<i>Resin Transfer Moulding</i>
SMC	<i>Sheet Moulding Composite</i>
TIM	<i>Thermoplastics Injection Moulding</i>
ULSAB	<i>Ultralight Steel Auto Body</i>

Lista de Unidades

%	Porcentagem
g	Gramma
GPa	Giga Pascal
kg	Quilograma
km/h	Quilómetros por hora
kW	Quilowatt
m	Metro
m/s ²	Metro por segundo ao quadrado
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
N	Newton
Nm	Newton metro
s	Segundo

Lista de Símbolos

E	Módulo de Young
E_1	Módulo de Young na direcção das fibras
E_2	Módulo de Young na direcção transversal às fibras
E_f	Módulo de Young das Fibras
E_m	Módulo de Young da Matriz
F	Força
G_f	Módulo ao corte das Fibras
G_m	Módulo ao corte da Matriz
t	Tempo
T_g	Temperatura de transição vítrea
$T_{serviço}$	Temperatura de serviço
v	Velocidade
V_f	Fracção volúmica das Fibras
V_m	Fracção volúmica da Matriz
X_c	Tensão de Compressão na direcção das fibras
X_t	Tensão de Tracção na direcção das fibras
Y_c	Tensão de Compressão na direcção transversal às fibras
Y_t	Tensão de Tracção na direcção transversal às fibras
Δt	Intervalo de tempo
ρ	Densidade
σ_1	Tensão Principal na direcção das fibras
σ_2	Tensão Principal na direcção transversal às fibras

σ_{ced}	Tensão de cedência
σ_{rot}	Tensão de ruptura
T_{12}	Tensão Principal de Corte do laminado
ν_f	Coefficiente de Poisson das Fibras
ν_m	Coefficiente de Poisson da Matriz

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - EMISSÕES CO ₂ DOS NOVOS CARROS NA EUROPA E NO JAPÃO ENTRE OS ANOS 1995-2013 [2]	1
FIGURA 2 - REGISTOS DAS EMISSÕES DE CO ₂ DOS CARROS DE PASSAGEIROS NO PRESENTE E PREVISÕES PARA O FUTURO [2]	2
FIGURA 3 - EDIFÍCIO DO INEGI	5
FIGURA 4 - BIW EM AÇO (NANOSTEEL) [10]	12
FIGURA 5 - ESTRUTURA SPACE FRAME EM ALUMÍNIO (SUZUKI) [13]	14
FIGURA 6 - BLOCO DE UM MOTOR DE QUATRO CILINDROS EM ALUMÍNIO [14]	15
FIGURA 7 - COMPARAÇÃO DE RIGIDEZ E RESISTÊNCIA ESPECÍFICA ENTRE MAGNÉSIO, ALUMÍNIO E FERRO [17]	16
FIGURA 8 - COMPARAÇÃO DE CUSTOS ENTRE DIFERENTES MATERIAIS [13]	17
FIGURA 9 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS FIBRAS EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE FIBRAS [19]	21
FIGURA 10 - PIRÂMIDE DOS TERMOPLÁSTICOS [20]	22
FIGURA 11 - LAMINADOS DE GMT [24]	24
FIGURA 12 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE UM LAMINADO GMT E SUA MOLDAÇÃO POR COMPRESSÃO [25]	24
FIGURA 13 - ESQUEMATIZAÇÃO DAS ETAPAS DO PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO [26]	25
FIGURA 14 - PROCESSO DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS [27]	26
FIGURA 15 - RELAÇÃO ENTRE OS DIVERSOS PROCESSOS RELACIONADOS COM O FABRICO DE COMPONENTES EM MATERIAIS COMPÓSITOS [2]	27
FIGURA 16 - PRINCIPAIS FASES DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM A QUENTE DE COMPÓSITOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA UNIDIRECCIONAIS [2]: 1 - CORTE E POSICIONAMENTO DOS TECIDOS OU DE BANDAS UNIDIRECCIONAIS (UD) DE PRÉ-IMPREGNADOS; 2 - CONSOLIDAÇÃO DAS TAPES UD USANDO CALOR E PRESSÃO; 3 – ESTAMPAGEM A QUENTE DO LAMINADO; 4 – CORTE DE MATERIAL EXCEDENTE (NÃO REPRESENTADO); 5 – SOBRE-INJEÇÃO	28
FIGURA 17 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICO AFP E UMA CABEÇA AFP [22]	28
FIGURA 18 - AS VÁRIAS FERRAMENTAS E SUAS INTERACÇÕES QUE O SOFTWARE SOLIDWORKS® APRESENTA [30]	33
FIGURA 19 - CONCEPÇÃO DE UMA SUSPENSÃO TRASEIRA ATRAVÉS DO INVENTOR® [32]	34

FIGURA 20 - SIMULAÇÃO DE UMA REDE DE TUBAGENS ATRAVÉS DO CATIA® [33].....	34
FIGURA 21 - MESHING DE UM BLOCO DE MOTOR ATRAVÉS DO ABAQUS CAE® [34].....	35
FIGURA 22 - SIMULAÇÃO DE UM MOTOR 6 CILINDROS COM NASTRAN® [35].....	36
FIGURA 23 - ANÁLISE DE ESFORÇOS SUBMETIDOS A UMA PONTE SUSPensa UTILIZANDO O ANSYS® [36]	36
FIGURA 24 - PREPREG DE SULFETO DE P-FENILENO (PPS) E UMA POSSÍVEL LIGAÇÃO AO LONGO DO PRÉ- IMPREGNADO [37].	37
FIGURA 25 - SIMULAÇÃO DA MOLDAÇÃO DE UM LAMINADO (AMARELO) COM RECURSO A MOLDES (CINZENTO) [38].....	38
FIGURA 26 - SIMULAÇÃO DO TEMPO DE INJEÇÃO DE UM COMPONENTE COM MOLDFLOW® (AUTODESK) [40].....	39
FIGURA 27 - ENVELOPE DE FALHA PELO CRITÉRIO DE TENSÃO MÁXIMA [41].....	40
FIGURA 28 - ENVELOPE DE FALHA PELO CRITÉRIO DE TSAI-HILL [42]	41
FIGURA 29 - COMPARAÇÃO ENTRE ENVELOPES DE FALHA [41]	43
FIGURA 30 - ACELERAÇÃO VERTICAL E HORIZONTAL DAS RODAS DE UM VEÍCULO [43].....	43
FIGURA 31 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CHASSI, SISTEMAS DE SUSPENSÃO E DIREÇÃO [43].	44
FIGURA 32 - EXEMPLIFICAÇÃO DE UMA SUSPENSÃO DE EIXO RÍGIDO [45].....	45
FIGURA 33 - EXEMPLO DE UMA SUSPENSÃO DE DUPLO A [47]	46
FIGURA 34 - EXEMPLIFICAÇÃO DE UMA SUSPENSÃO MULTIBRAÇO [48]	47
FIGURA 35 - EXEMPLO DE UMA SUSPENSÃO MACPHERSON [46]	47
FIGURA 36 - FORÇA SOBRE O BRAÇO DE SUSPENSÃO (SETA A VERDE INDICA O SENTIDO DA FORÇA DE TRAVAGEM)	52
FIGURA 37 - FORÇA SOBRE O BRAÇO DE SUSPENSÃO (SETA A VERDE INDICA O SENTIDO DA FORÇA DE ACELERAÇÃO).....	53
FIGURA 38 - FORÇAS SOBRE O BRAÇO DE SUSPENSÃO (SETAS A VERDE INDICAM OS SENTIDOS DAS FORÇAS DE TRACÇÃO E COMPRESSÃO).....	54
FIGURA 39 - RAZÃO ENTRE A RESISTÊNCIA E O PESO DE DIVERSOS MATERIAIS [2]	55
FIGURA 40 – 1- MÁQUINA DE INJEÇÃO; 2 - FORNO DE AQUECIMENTO DO LAMINADO COMPÓSITO; 3 - PROVETE RESULTANTE.....	60
FIGURA 41 - DIMENSÕES DA JUNTA ADESIVA DE CADA PROVETE (DIMENSÕES EM MM)	60
FIGURA 42 – 1 – SETUP DOS ENSAIOS DE CORTE; 2 – RESULTADOS DA RUPTURA DOS PROVETES NAS JUNTAS (EXPERIÊNCIA 3); 3 – RESULTADOS DA RUPTURA DOS PROVETES NOS SUBSTRACTOS (EXPERIÊNCIA 7).....	61

FIGURA 43 - TENSÕES MÁXIMAS DE CORTE DE CADA COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO	61
FIGURA 44 – LEVANTAMENTO DE FORMA DO BRAÇO DE SUSPENSÃO DE REFERÊNCIA (NISSAN LEAF) (AÇO)	62
FIGURA 45 – 1- BRAÇO DE SUSPENSÃO MACPHERSON COM AS COTAS DE ATRAVANCAMENTO (MM); 2 - SINOBLOCOS	63
FIGURA 46 - CONDIÇÕES DE FRONTEIRA PARA A SIMULAÇÃO DO BRAÇO DE SUSPENSÃO	64
FIGURA 47 – DIAGRAMA DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO (AÇO) EM SITUAÇÃO DE TRAVAGEM	65
FIGURA 48 – DIAGRAMA DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO (AÇO) EM SITUAÇÃO DE ACELERAÇÃO	65
FIGURA 49 – DIAGRAMA DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO (AÇO) EM SITUAÇÃO DE CURVA (TRACÇÃO)	66
FIGURA 50 – DIAGRAMA DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO (AÇO) EM SITUAÇÃO DE CURVA (COMPRESSÃO).....	66
FIGURA 51 - SINOBLOCOS E RÓTULA DA RODA	68
FIGURA 52 - SOLUÇÃO CONSTRUTIVA E REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA VERSÃO FINAL DO BRAÇO DE SUSPENSÃO EM COMPÓSITO	69
FIGURA 53 – ILUSTRAÇÃO DO CONCEITO DO BRAÇO DE SUSPENSÃO COM OS SINOBLOCOS E A RÓTULA DA RODA	69
FIGURA 54 – FLUXOGRAMA DAS SIMULAÇÕES ESTRUTURAIS.....	70
FIGURA 55 - GEOMETRIA EM "U" (ESQUERDA) E GEOMETRIA EM "I" (DIREITA).....	70
FIGURA 56 - DIAGRAMA DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO EM PA6 + 35%GF, PARA A CONDIÇÃO DE TRAVAGEM (VISTA INFERIOR).....	72
FIGURA 57 - DIAGRAMA DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO EM PA6 + 35%GF, PARA A CONDIÇÃO DE ACELERAÇÃO (VISTA INFERIOR)	73
FIGURA 58 - DIAGRAMA DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO EM PA6 + 35%GF, PARA A CONDIÇÃO DE TRACÇÃO (VISTA INFERIOR)	73
FIGURA 59 - DIAGRAMA DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO EM PA6 + 35%GF, PARA A CONDIÇÃO DE COMPRESSÃO (VISTA INFERIOR).....	74
FIGURA 60 - 1ª GEOMETRIA COM LAMINADO EM COMPÓSITO.....	76
FIGURA 61 - ORIENTAÇÃO DE CADA CAMADA DO LAMINADO EM COMPÓSITO	77
FIGURA 62 - DIAGRAMA DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO EM PA6 + 60%GF, PARA A CONDIÇÃO DE TRAVAGEM	77

FIGURA 63 - DIAGRAMA DE DESLOCAMENTOS RESULTANTES (MM) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO EM PA6 + 60%GF, PARA A CONDIÇÃO DE TRAVAGEM.....	78
FIGURA 64 - CRITÉRIO DE HASHIN DO BRAÇO DE SUSPENSÃO EM PA6 + 60%GF, PARA A CONDIÇÃO DE TRAVAGEM	78
FIGURA 65 - 2ª GEOMETRIA COM LAMINADO EM COMPÓSITO.....	79
FIGURA 66 - PRINCIPAIS VARIÁVEIS CONSIDERADAS NO DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO	80
FIGURA 67 - GEOMETRIA FINAL DO BRAÇO DE SUSPENSÃO EM MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA.....	81
FIGURA 68 - DIAGRAMA DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO COM A GEOMETRIA FINAL EM PA6 + 60%GF NA CONDIÇÃO DE TRAVAGEM	82
FIGURA 69 - DIAGRAMA DE DESLOCAMENTOS RESULTANTES (MM) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO COM A GEOMETRIA FINAL EM PA6 + 60%GF, NA CONDIÇÃO DE TRAVAGEM	83
FIGURA 70 - CRITÉRIO DE HASHIN NO LAMINADO EM COMPÓSITO DA GEOMETRIA FINAL EM PA6 + 60%GF, NA CONDIÇÃO DE TRAVAGEM.....	83
FIGURA 71 - DIAGRAMA DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO COM A GEOMETRIA FINAL EM PA6 + 60%GF, NA CONDIÇÃO DE ACELERAÇÃO.....	84
FIGURA 72 - DIAGRAMA DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO COM A GEOMETRIA FINAL EM PA6 + 60%GF, NA CONDIÇÃO DE TRACÇÃO	84
FIGURA 73 - DIAGRAMA DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) DO BRAÇO DE SUSPENSÃO COM A GEOMETRIA FINAL EM PA6 + 60%GF, NA CONDIÇÃO DE COMPRESSÃO	85
FIGURA 74 - SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM NO SOFTWARE ANIFORM®	87
FIGURA 75 – 0 - GEOMETRIA INICIAL; 1 - GEOMETRIA APÓS ESTAMPAGEM UTILIZANDO TENCATE CETEX® TC 1000; 2 – GEOMETRIA APÓS ESTAMPAGEM UTILIZANDO TENCATE CETEX® TC 1100; 3 – GEOMETRIA APÓS ESTAMPAGEM UTILIZANDO TENCATE CETEX® TC 1220	88
FIGURA 76 – 1 - GEOMETRIA BASE DO LAMINADO EM COMPÓSITO; 2 – GEOMETRIA BASE COM OS MOLDES DE ESTAMPAGEM; 3 – GEOMETRIA BASE COM OS MOLDES DE ESTAMPAGEM APÓS ESTAMPAGEM.....	89
FIGURA 77 - TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) NO LAMINADO EM COMPÓSITO TENCATE CETEX® TC 1000	89
FIGURA 78 - TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) NO LAMINADO EM COMPÓSITO TENCATE CETEX® TC 1100	90
FIGURA 79 - TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES (PA) NO LAMINADO EM COMPÓSITO TENCATE CETEX® TC 1220	90

FIGURA 80 - DISTRIBUIÇÃO DE ESPESSURA (MM) DE CAMADA DO LAMINADO EM COMPÓSITO TENCATE CETEX® TC 1100	91
---	----

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - MATERIAIS ALTERNATIVOS, POTENCIAIS OPÇÕES DE REDUÇÃO DE PESO VS. CUSTOS [4]	10
TABELA 2 - PROPRIEDADES DO MAGNÉSIO, ALUMÍNIO E FERRO [16]	16
TABELA 3 - TIPOS DE PROCESSOS, VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS TERMOENDURECÍVEIS [18]	18
TABELA 4 - ILUSTRAÇÃO DOS PROCESSOS DE FABRICO PARA COMPÓSITOS TERMOENDURECÍVEIS.....	19
TABELA 5 - PROPRIEDADES DE MATRIZES TERMOPLÁSTICAS [21, 22]	22
TABELA 6 - PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE ARAMIDA, CARBONO E VIDRO [21, 22]	23
TABELA 7 - ESPECIFICAÇÕES DO NISSAN LEAF	51
TABELA 8 – RESULTADOS DOS CÁLCULOS DA FORÇA DE TRAVAGEM.....	53
TABELA 9 - RESULTADOS DOS CÁLCULOS DA FORÇA DE ACELERAÇÃO	53
TABELA 10 - RESULTADOS DOS CÁLCULOS DA FORÇA DE TRACÇÃO E DE COMPRESSÃO.....	54
TABELA 11 - TIPO DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA E RESPECTIVO FORNECEDOR	56
TABELA 12 - COMPARAÇÃO ENTRE A ULTRAMID E PROMYDE	56
TABELA 13 - CONSTANTES DE ENGENHARIA DA LÂMINA PARA O COMPÓSITO TENCATE CETEX® TC910 NYLON 6.....	58
TABELA 14 – PLANO DE EXPERIÊNCIAS TAGUCHI PARA AVALIAÇÃO DA INTERFACE	59
TABELA 15 - TENSÕES MÁXIMAS DE CORTE DE CADA COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO	62
TABELA 16 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO BRAÇO DE SUSPENSÃO DE REFERÊNCIA	63
TABELA 17 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO BRAÇO DE SUSPENSÃO EM AÇO.....	67
TABELA 18 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA PA6 COM 35% OU 60% DE FIBRA DE VIDRO	70
TABELA 19 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE CARGA (COM CS DE 1,2), PARA AS DIFERENTES GEOMETRIAS E MATERIAIS.....	71
TABELA 20 - RESULTADOS OBTIDOS PARA O BRAÇO DE SUSPENSÃO EM PA6 + 35%GF, GEOMETRIA EM "I" COM SINOBLOCOS E RÓTULA SOBRE-INJECTADOS	74
TABELA 21 - PROPRIEDADES DA PA6 REFORÇADA DA BASF E DA NUREL	75
TABELA 22 - RESULTADOS OBTIDOS PARA O BRAÇO DE SUSPENSÃO EM PA6 + 60%GF NA GEOMETRIA EM I	75
TABELA 23 - CARACTERIZAÇÃO DO LAMINADO (CF)	77

TABELA 24 - RESULTADOS DA 1ª GEOMETRIA COM INSERÇÃO DO LAMINADO EM COMPÓSITO.....	79
TABELA 25 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DA 2ª GEOMETRIA COM INSERÇÃO DO LAMINADO EM COMPÓSITO	80
TABELA 26 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO BRAÇO DE SUSPENSÃO TODO EM PA6 + 30%GF	81
TABELA 27 - CARACTERÍSTICAS DAS MALHAS DE CADA COMPONENTE	82
TABELA 28 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA GEOMETRIA FINAL DO BRAÇO DE SUSPENSÃO EM COMPÓSITO	85
TABELA 29 - ANÁLISE DE CUSTO DO COMPONENTE ALVO (BRAÇO DE SUSPENSÃO) EM AÇO	91
TABELA 30 - MODELO DE CUSTO DA MCG (PARCEIRO DO CONSÓRCIO) PARA O COMPONENTE EM AÇO	92
TABELA 31 - CUSTOS DE REFERÊNCIA PARA MATERIAIS PRÉ-IMPREGNADOS E PA6 REFORÇADA PARA INJEÇÃO	93
TABELA 32 - CUSTOS ASSOCIADOS AO MATERIAL DA SOLUÇÃO FINAL PROPOSTA.....	93
TABELA 33 - COMPARAÇÃO DE MASSAS ENTRE A SOLUÇÃO FINAL PROPOSTA E A VERSÃO DE REFERÊNCIA EM AÇO	93
TABELA 34 - COMPARAÇÃO DE CUSTOS TOTAIS ENTRE O MATERIAL DE REFERÊNCIA (AÇO) E O MATERIAL DA SOLUÇÃO HÍBRIDA (COMPÓSITO + PLÁSTICO).....	94

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objectivos	4
1.3	Caracterização da empresa acolhedora	4
1.4	Organização do Relatório	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Materiais e Processos	9
2.1.1	Estado da arte de materiais e processos em componentes estruturais do automóvel	9
2.1.2	Materiais compósitos de matriz termoplástica e seus processos associados	20
2.2	Metodologias e ferramentas de auxílio ao desenvolvimento do produto	29
2.2.1	Principais fases do desenvolvimento do produto	29
2.2.2	Principais ferramentas de auxílio ao desenvolvimento do projecto	31
2.2.3	Critérios de falha em materiais compósitos laminados utilizando o método de elementos finitos (Tsai-Wu, Tsai-Hill, Hashin e Tensão Máxima)	39
2.3	Sistema de suspensão automóvel e tipologias de braços de suspensão	43
2.3.1	Suspensão de Eixo Rígido	45
2.3.2	Suspensão de Duplo A	46
2.3.3	Suspensão Multilink	46
2.3.4	Suspensão MacPherson	47
3	DESENVOLVIMENTO	51
3.1	Braço de suspensão, objecto de estudo e principais requisitos mecânicos (condições de carga)	51
3.1.1	Situação de travagem	52
3.1.2	Situação de aceleração	53

3.1.3	Situação de curva	54
3.2	Seleção e caracterização de materiais	54
3.2.1	Pré-impregnados de fibra contínua de matriz termoplástica	54
3.2.2	Termoplásticos para sobre-injecção	56
3.2.3	Caracterização de materiais	57
3.2.4	Caracterização da interface pré-impregnados de fibra contínua de matriz termoplástica com o termoplástico de sobre-injecção seleccionados a diferentes condições de processamento (sobre-injecção)	58
3.3	Desenvolvimento do braço de suspensão em materiais compósitos de matriz termoplástica	62
3.3.1	Levantamento de forma e composição química do braço de suspensão em aço	62
3.3.2	Modelação numérica e determinação do coeficiente de segurança	63
3.3.3	Modelação CAD	68
3.3.4	Análise CAE para as condições de carga estabelecidas (processo iterativo)	69
3.4	Processo de fabrico	86
3.4.1	Simulação do processo de fabrico (estampagem a quente de materiais de matriz termoplástica)	86
3.5	Análise técnico-económica da solução final	91
4	CONCLUSÕES	97
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	103
6	ANEXOS	109

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objectivos
- 1.3 Caracterização da empresa acolhedora
- 1.4 Organização do Relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Com os preços dos combustíveis fósseis cada vez mais elevados e com perspectivas de uma procura cada vez maior por parte das economias emergentes, é de esperar que o paradigma dos sistemas de transporte em geral tenha de mudar. Observa-se por isso uma dinâmica forte de R&D a nível mundial, no sentido de encontrar soluções mais leves, iniciada e liderada desde há algum tempo atrás pelo sector aeronáutico, mas agora seguida intensamente pelo sector automóvel.

Esta mudança de paradigma incide na utilização em mais larga escala de transportes com consumos de combustível controlado e, conseqüentemente, com uma taxa de emissões de CO₂ consideravelmente mais baixa. No limite, 50% de redução de peso num veículo pode traduzir-se numa redução de 40% no consumo de combustível [1, 2]. Abre-se também a porta à disseminação dos veículos eléctricos com taxas de emissão nulas, que dependem da diminuição do peso global para garantirem autonomias que tornem estes veículos uma opção viável para o quotidiano.

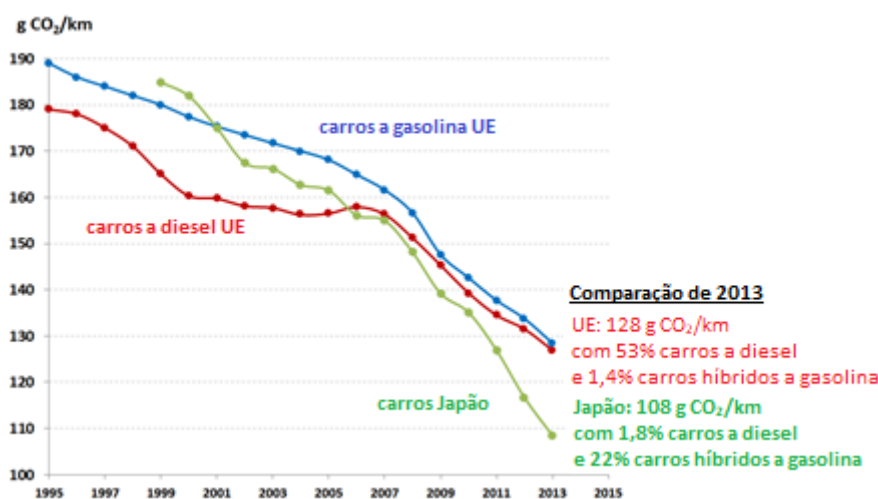


Figura 1 - Emissões CO₂ dos novos carros na Europa e no Japão entre os anos 1995-2013 [2]

Para reduzir as emissões poluentes do transporte rodoviário, como meio para combater as alterações climáticas, a Comissão Europeia (CE) definiu metas de redução das

emissões de CO₂ para os novos veículos ligeiros de passageiros, através de um regulamento de 2009 que estabelecia o limite de 130 g CO₂/km a atingir em 2015 e de 95 g CO₂/km a partir de 2020, fazendo baixar o consumo de combustível para 3,7 litros/100km. O relatório da *European Environment Agency* (EEA) de 2014 mostrou que já em 2013 o valor médio de 127 g CO₂/km fora alcançado, excedendo o valor *target* exigido para 2015. Estes dados demonstram o enorme esforço e mobilização que os fabricantes automóveis têm feito para atingir as metas propostas. A Figura 1 e a Figura 2 permitem uma leitura mais perceptível desse esforço.

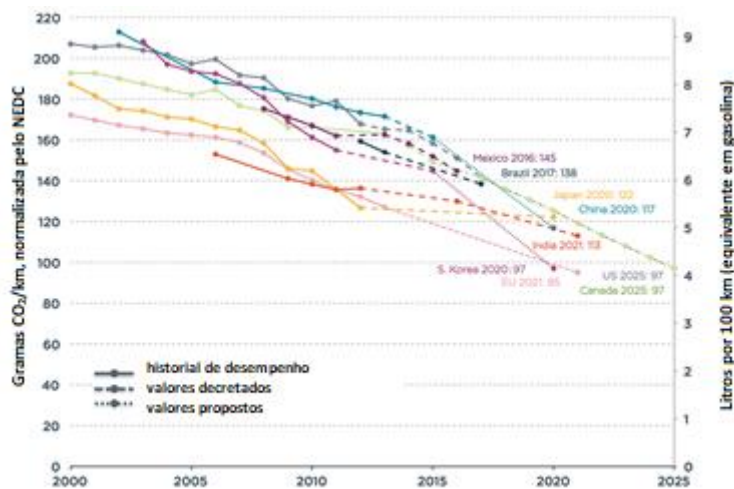


Figura 2 - Registos das emissões de CO₂ dos carros de passageiros no presente e previsões para o futuro [2]

A redução de peso de um veículo é ainda o meio que apresenta melhor relação custo-benefício para reduzir o consumo de combustível e, conseqüente, a redução das emissões de CO₂. Desta forma, todos os fabricantes de automóveis, fornecedores e produtores de componentes estão a investir significativamente na pesquisa e desenvolvimento de materiais leves com aplicação no sector. Para alcançar a construção de estruturas mais leves, os fabricantes automóveis têm investigado na substituição do aço pelo alumínio, magnésio e por compósitos. A reciclagem e valorização de veículos em fim de vida, que envolve metas de valorização de 85%, estão também a impulsionar a indústria automóvel a adoptar a tecnologia de materiais amigos do ambiente para atingir essas metas de recuperação. Graças à crescente optimização da relação peso/resistência dos compósitos de última geração, a indústria automóvel tem vindo a substituir o metal em inúmeras aplicações, com vantagens significativas. O principal obstáculo na aplicação de materiais leves, é o seu alto custo. É, portanto, necessário dar prioridade às actividades que visam reduzir custos através do desenvolvimento de novos materiais, e de novos processos de fabrico capazes de produzir em massa.

Do ponto de vista técnico, é indiscutível que a utilização de matrizes termoplásticas nos compósitos de fibras contínuas, quando comparados com os de matriz termoendurecível, contribui para uma melhoria muito significativa de algumas

importantes características finais destes materiais, que apresentam como principais vantagens o aumento da tenacidade, da tolerância ao dano e durabilidade, e ainda a possibilidade de reprocessamento, reciclagem e a implementação de ambientes de trabalho mais limpos. No entanto, a principal vantagem da utilização destes materiais é a possibilidade da significativa redução do ciclo de fabrico, factor de especial interesse em sectores como o automóvel.

Uma vez demonstradas as inúmeras vantagens dos materiais compósitos de matriz termoplástica sobre os metais e sobre os próprios materiais compósitos de matriz termoendurecível em aplicações estruturais diversas, incluindo as do sector automóvel, bem como a capacidade tecnológica de os transformar com sucesso, o problema reside agora na necessidade emergente de reduzir os custos associados, quer aos materiais de base, quer aos seus processos de transformação, através do desenvolvimento de novos materiais, e do desenvolvimento e/ou adaptação de processos capazes de produzir em massa.

A tecnologia de estampagem a quente de compósitos de matriz termoplástica é uma tecnologia emergente que é, em muitos casos, acompanhada com o processo de sobre-injecção, com vista a permitir o acabamento do componente e à integração de elementos de interface a outros componentes. A aplicação em massa destes materiais está ainda muito dependente da optimização de alguns dos processos de transformação existentes, bem como do desenvolvimento e/ou adaptação de outros às exigências do seu processamento. Por outro lado, o desenvolvimento de metodologias e de ferramentas auxiliares ao desenvolvimento de produtos (baseados nestes novos materiais) cada vez mais complexos e híbridos, é também urgente.

É neste contexto que surge o projecto LaTCh II (*Lightweight Thermoplastic Composites II*), projecto apoiado pelo COMPETE, cujas entidades que o integram são a Moliporex, a Cadflow, a MCG e o INEGI.

Este projecto visa dar continuidade ao projecto LaTCh com o objectivo da exploração das tecnologias associadas aos compósitos de matriz termoplástica, nomeadamente a estampagem a quente de compósitos de fibras contínuas de matriz termoplástica e a sobre-injecção como alternativa à estampagem dos metais. Uma vez demonstrada, através do projecto LaTCh, a viabilidade técnica da produção de componentes mais leves (comparativamente com os seus congéneres metálicos) de igual ou superior desempenho mecânico pelos processos acima referidos, o projecto LaTCh II apresenta como objectivos principais a redução do número de operações necessárias à obtenção do componente final, perspectivando reduzir o número de equipamentos, ferramentas e recursos humanos (*one-shot process*) enquanto prevê aumentar a complexidade da tipologia de produtos alvo, pela integração de elementos/mecanismos metálicos (componentes híbridos).

O tema e correspondente plano de trabalhos desta dissertação enquadra-se numa das principais fases deste projecto, a selecção e desenvolvimento do componente demonstrador. O INEGI constituiu-se como a instituição de acolhimento para a realização deste trabalho.

1.2 Objectivos

Esta dissertação tem como objectivo o estudo de uma solução economicamente mais atractiva e tecnologicamente viável para o fabrico de um componente estrutural de um sistema de suspensão automóvel, designadamente o braço de suspensão.

O componente em análise foi alvo de um estudo prévio por parte da empresa acolhedora durante o ano de 2016. Esse estudo consistia na avaliação da viabilidade técnico-económica de uma solução em compósito, em substituição dos materiais tradicionais como o aço, o ferro fundido, entre outros. O trabalho culminou numa solução cujo preço de produção ascendia em 1,65 vezes ao custo da peça original, mas que representa uma redução de 45% em massa.

Com recurso a Simulação Estrutural e a Ferramentas de Modelação 3D, procurou-se desenvolver uma solução que pudesse ser considerada uma melhoria relativamente aos braços de suspensão típicos existentes no mercado.

A solução ambicionada teria que garantir o desempenho estrutural e a redução de massa igual ou superior a 40% em relação ao componente produzido em aço. Todos os materiais e alterações de geometria contemplam a produção do componente através do processo de estampagem a quente com sobre-injecção, *one-shot process*.

1.3 Caracterização da empresa acolhedora

O INEGI é um Instituto de novas tecnologias, situado na interface Universidade – Indústria e vocacionado para a realização de actividade de investigação e de inovação de base tecnológica e transferência de tecnologia orientada para o tecido industrial. Nasceu em 1986 no seio do que são hoje os Departamentos de Engenharia Mecânica (DEMec) e de Engenharia e Gestão Industrial (DEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Com a figura jurídica de Associação Privada sem Fins Lucrativos, o estatuto de «Utilidade Pública» e uma equipa própria de 200 colaboradores, assume-se como um agente activo no desenvolvimento e consolidação de um modelo competitivo baseado no conhecimento, na densidade tecnológica dos produtos e processos, e na inovação de base tecnológica.

O INEGI desenvolve actividades de investigação, inovação e transferência de tecnologia, consultoria e serviços para um conjunto alargado de mercados e sectores de actividade.

O Instituto tem mais de 25 anos de experiência em projectos com empresas e em consórcios nacionais e internacionais.

O instituto tem uma tradição de prestígio nas áreas dos materiais e estruturas compósitas. Os trabalhos que tem desenvolvido nesta área, como os projectos da garrafa de gás Pluma, as colaborações com a ESA e a NASA, entre outros, demonstram o enorme *know-how* do INEGI nesta área. O INEGI apresenta soluções para o desenvolvimento de aplicações onde o factor leveza tem um peso decisivo. O Instituto domina técnicas que envolvem materiais laminados em compósito, betões poliméricos, fibras de vidro e carbono e apresenta competências para o desenvolvimento de produtos, soluções estruturais avançadas, bem como implementação de novas tecnologias de fabrico de materiais. Dispõe de vários laboratórios para ensaios de materiais, tais como reacção dos materiais ao fumo e fogo, termomecânicos, envelhecimento, deformabilidade, dureza, fadiga, entre outros. A Figura 3 mostra a instituição em questão.



Figura 3 - Edifício do INEGI

1.4 Organização do Relatório

Esta dissertação possui três capítulos principais que se dividem em diversos subcapítulos. O primeiro capítulo, de carácter essencialmente teórico e baseado em pesquisa bibliográfica, inclui temas como os materiais e as tecnologias associadas à produção de componentes estruturais, com maior foco nos de aplicação ao sector automóvel e nas ferramentas auxiliares ao desenvolvimento do produto (CAD/CAE). Acrescenta-se ainda uma análise aos principais critérios de falha para a avaliação da ruptura de um laminado em compósito e um enquadramento sobre os diversos sistemas

de suspensão automóvel existentes, suas principais diferenças e justificação do produto alvo (braço de suspensão).

O segundo capítulo engloba a componente prática do trabalho realizado, que inclui a definição de requisitos do produto (baseada em engenharia inversa realizada sobre um braço de suspensão de referência), a selecção e caracterização de materiais, bem como o processo iterativo da modelação CAD (Solidworks) e simulação estrutural CAE (ABAQUS) para as diversas condições de carga identificadas.

O terceiro e último capítulo apresenta as principais conclusões, que deverão incluir uma análise de peso e custos comparativa (braço de suspensão em aço vs. braço de suspensão em compósito).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais e Processos

2.2 Metodologias e ferramentas de auxílio ao desenvolvimento do produto

2.3 Sistema de suspensão automóvel e tipologias de braços de suspensão

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os resultados da revisão bibliográfica realizada em torno dos principais temas relevantes para a presente dissertação. Estes incluem uma revisão do estado da arte sobre os materiais e principais processos de fabrico utilizados na indústria automóvel, e na identificação das principais fases do desenvolvimento do produto, suas metodologias e ferramentas auxiliares. Acresce-se ainda uma componente de pesquisa orientada aos materiais compósitos de matriz termoplástica e aos principais critérios de falha em compósitos, já que estes materiais serão âmbito de estudo nesta tese.

2.1 Materiais e Processos

2.1.1 Estado da arte de materiais e processos em componentes estruturais do automóvel

O automóvel é o meio de transporte mais utilizado no mundo, sendo absolutamente indispensável ao dia-a-dia de centenas de milhões de pessoas espalhadas pelo mundo. Ao longo das últimas décadas, a indústria automóvel foi alvo de grande desenvolvimento e evolução, com o intuito de tornar os automóveis mais eficientes, leves e económicos. Os seus critérios de aceitação estão em primeiro lugar relacionados com o cumprimento de regulamentos e/ou legislação relativa a temas como a segurança ou o impacto ambiental, enquanto outros são oriundos da imposição dos principais *players*. Os três pilares da eficiência energética nos automóveis estão relacionados com o peso, a aerodinâmica e a mecânica. A título de exemplo, se fosse possível reduzir para metade o peso do automóvel, ele gastaria menos 40% de combustível, o que contribuiria, por sua vez, para reduzir as emissões poluentes na mesma percentagem [2]. Por outro lado, se conseguíssemos baixar o coeficiente aerodinâmico de penetração para $0,16 C_x$ (valores típicos $0,35$ e $0,25 C_x$), o consumo médio no ciclo de homologação desceria $0,6$ litros por cem quilómetros. Melhorar estas duas variáveis exige um tremendo esforço por parte da indústria.

É preciso otimizar as técnicas de fabrico, os componentes e os materiais, para conseguir diminuir o peso final do carro [3]. A estrutura principal do automóvel, também conhecida como o *Body In White* (BIW), é normalmente produzida através de metais estampados e soldados entre si de modo a formar uma estrutura rígida e resistente. Este processo de construção é utilizado em 99,9% dos automóveis produzidos no mundo. Os

restantes 0,1% tratam-se dos BIW construídos em alumínio e também podemos encontrar, com valores inferiores a 0,01%, BIW construídos em fibra de carbono [4].

As propriedades mecânicas do aço aplicado nos automóveis (elevada tensão de cedência e módulo), juntamente com a facilidade na produção e baixo custo de aquisição, dão origem à predominância deste tipo de materiais no mercado automóvel. Os elevados custos associados aos materiais alternativos, como o alumínio ou compósitos, atribuem ainda ao aço uma posição preferencial. O peso das aberturas (portas, capô, bagageira), *chassis* (suspensão) e a transmissão correspondem a 60% da quantidade de aço e metais ferrosos utilizado nos automóveis.

A Tabela 1 demonstra a relação redução de peso – custo da substituição do aço por alumínio ou magnésio em certos componentes do automóvel.

Tabela 1 - Materiais alternativos, potenciais opções de redução de peso vs. custos [4]

Componente	Aço (kg)	Alumínio (kg)	Magnésio (kg)	Redução Peso (%)	Redução Total (%)	Aumento do Custo (%)
BIW	285	218	N/A	23,5	3,90	250
Capô	14,8	8,3	N/A	44	0,48	300
Portas	15,7	9,5	N/A	39	0,40	275
Painel de Instrumentos	11,4	N/A	6,3	45	0,33	350

O custo sempre foi, e será, um dos factores mais importantes na indústria automóvel. Quando surge um novo material, este é sempre comparado com o material utilizado até então, sendo o custo um dos principais motivos para que este novo material possa vir a ser seleccionado, substituindo assim o seu antecessor. O custo inclui três componentes: o custo da matéria prima, o valor acrescentado após a produção, e o custo de *design* e teste do produto.

O alumínio e as ligas de magnésio são de facto materiais mais caros, quando comparados com o aço e com as ligas ferrosas. Como tal, de modo a que possam competir, é necessário reduzir o custo na produção destes materiais. Em termos de fundição, pode-se dizer que produtos de alumínio ou magnésio obtidos pelo processo de fundição, “*cast forming*”, podem tornar-se relativamente mais baratos que os de aço ou ferro, isto porque estes apresentam um tempo de produção mais reduzido, melhor maquinabilidade e melhores aptidões geométricas. Como o custo destes componentes é mais elevado quando comparado com os mesmos componentes, mas obtidos através

de aço ou ferro, a escolha do material é muitas vezes justificada pela funcionalidade do componente em si.

A segurança é também um dos critérios mais importantes e levada em consideração na indústria automóvel, o que leva a uma mais rigorosa escolha dos materiais a utilizar nas estruturas e componentes automóveis.

A capacidade de absorver a energia de um impacto e a manutenção da sobrevivência dos passageiros, é designada por “*crashworthiness*” da estrutura de um automóvel. A resistência à penetração é um outro critério de segurança relevante, que avalia o material quanto à capacidade de este absorver energia do impacto sem se fragmentar e sem criar projecteis [5].

Por outro lado, o comportamento na falha dos compósitos à compressão é diferente da dos metais. A grande maioria dos compósitos são considerados mais frágeis do que dúcteis, quando solicitados a carregamentos. Enquanto a ruptura nos metais tem como origem o esmagamento ou impacto por *buckling* e/ou dobramento, métodos típicos com uma extensa deformação plástica, a ruptura nos compósitos é realizada através de uma sequência de mecanismos de fractura, desde a fractura nas fibras, fissuras na matriz, falhas nas interacções fibra-matriz, descolagem das camadas e ruptura interlaminar. Para além do elevado custo destes materiais, o entendimento do comportamento destes materiais e o desenvolvimento de ferramentas auxiliares de apoio à engenharia, bem como a capacidade de produção em massa, têm sido os principais factores da baixa utilização destes promissores materiais no automóvel. No entanto, a experiência bem-sucedida adquirida com estes materiais no sector aeronáutico tem servido de inspiração para o sector automóvel, perspectivando-se um aumento significativo da sua utilização num futuro próximo [6].

A seguir apresentam-se algumas considerações relevantes acerca dos principais materiais e processos utilizados no sector automóvel.

2.1.1.1 Aço

A razão principal para a utilização do aço em componentes estruturais no automóvel é a sua grande capacidade de absorver a energia libertada no momento do impacto, somando-se a esse factor a sua formabilidade e capacidade de união [7].

A indústria do aço, em especial os fornecedores de matéria-prima, tem vindo a investir fortemente na inovação. Este investimento tem tido inúmeros resultados positivos, com especial foco em aços inoxidáveis e novas composições químicas de ligas ferrosas (HSS), derivado do rácio custo-eficiência destes materiais. Esta evolução deu naturalmente origem a novos *designs* de produto, processos de fabrico e técnicas de montagem.

Estes materiais são aplicados em diversas estruturas dos veículos que incluem, por exemplo, o BIW, os motores, os chassis e as rodas. O uso destes materiais tem

demonstrado uma redução no peso final dos componentes e, simultaneamente, um aumento na resistência e na rigidez das estruturas [8].

A redução do peso dos veículos, consequência destes avanços, é muito significativa, já que estes materiais representam cerca de 60-65% do peso num carro familiar. Nos últimos anos tem-se notado um uso crescente dos HSS e também das suas variantes, tais como os aços de baixa liga ou *high-strength low-alloy (HSLA)*.

Através destes novos tipos de metais que foram surgindo ao longo dos anos, foi possível criar uma estrutura automóvel *Ultralight Steel Auto Body (ULSAB)*, que regista uma redução de peso no valor de 19%, com uma melhor capacidade de resistência aos esforços e um melhor desempenho quando comparados com uma estrutura automóvel convencional. Com a redução no número de componentes necessários para a estrutura automóvel, obtém-se também uma redução nos custos de produção [9].



Figura 4 - BIW em aço (NanoSteel) [10]

Como se observou, o desenvolvimento de novos materiais impacta o *design* dos componentes e os processos produtivos.

Nos aços leves, podemos destacar três tipos de processos: a hidroformação, a estampagem de chapas laminadas (*tailored blanks*) e a soldadura a laser [4].

Hidroformação é um processo que consiste em dar forma a um componente num molde através de pressões internas com o uso de fluidos pressurizados. A hidroformação permite a concepção de componentes com formatos relativamente complexos, únicos, igualmente resistentes e leves quando comparados com os obtidos por estampagem [4].

Uma das áreas em que a hidroformação está a ganhar renome é na optimização de estruturas das carrinhas ligeiras. Exemplos disso são a General Motors (GM) e a Ford, que têm usado hidroformação na produção das estruturas das suas carrinhas.

Estampagem, consiste na combinação de chapas de aço de categorias e espessuras diferentes numa só permitindo assim optimizar o desempenho dos componentes [11].

É também possível a obtenção de materiais *sandwich* através da união de chapas, com introdução de um núcleo em plástico entre as camadas de aço, o que permite reduzir consideravelmente o peso das estruturas e simultaneamente aumentar a inércia e melhorar as propriedades vibro-acústicas. Um dos fabricantes deste tipo de material é a *Quiet Steel*[®], que introduz núcleos viscoelásticos entre os laminados de aço.

Tanto a hidroformação como os *tailored blanks* têm o potencial de permitir reduzir o número de componentes necessários para a construção de estruturas no automóvel, reduzindo assim o uso de ferramentas de corte e moldes, poupando tempo e simplificando a ligação dos elementos nas fases finais de montagem, melhorando a integridade dos componentes, as sub-ligações entre si, e a estrutura automóvel como um todo. Estes processos podem ser combinados entre si.

Soldadura a laser, comparativamente aos métodos de soldadura convencionais, fornece um cordão de soldadura mais limpo e resistente, graças à sua capacidade de penetração do feixe, com excesso de material mínimo. É um processo utilizado em múltiplas etapas na concepção de um componente em aço, permitindo, por exemplo, a ligação de diferentes chapas laminadas de diferentes metais. Assim, é possível obter o melhor material na melhor área possível, sem causar distorções ou modificações nas propriedades do material na área de soldadura, resultando numa melhoria na resistência, no aspecto visual e na qualidade da montagem final da estrutura automóvel.

À medida que os fabricantes automóveis foram ganhando experiência com o processo de soldadura a laser com impacto no *design* estrutural dos componentes, o nível dos custos de produção tem baixado significativamente. Um exemplo disso é o novo modelo Golf da Volkswagen, com tempos de produção por carro mais reduzidos e com cerca de 25% de redução de peso na estrutura automóvel, quando comparados com o modelo anterior [4].

2.1.1.2 Alumínio

O uso do alumínio na indústria automóvel oferece uma grande possibilidade de redução de peso das suas estruturas. Existem dois métodos para a produção de uma estrutura automóvel em alumínio. O primeiro é semelhante ao usado nos aços, a estampagem das chapas, o outro resulta de uma combinação de fundições, extrusões, estampagens e soldaduras, criando uma estrutura conhecida como *space frame* (Figura 5) [12].

Estudos indicam que se se substituir todo o aço utilizado num BIW por alumínio, consegue-se uma redução de 50% no peso deste, representando uma redução final entre 20-30% do peso total de toda a estrutura automóvel [4]. Existem dois tipos de estruturas possíveis de obter quando se processam componentes de alumínio: *space frame* extrudida que permite uma redução nos custos das ferramentas eliminando algumas estampagens no processo, e a estrutura monocoque convencional, onde oferece uma maior estabilidade ao longo do processo e preços baixos por peça.

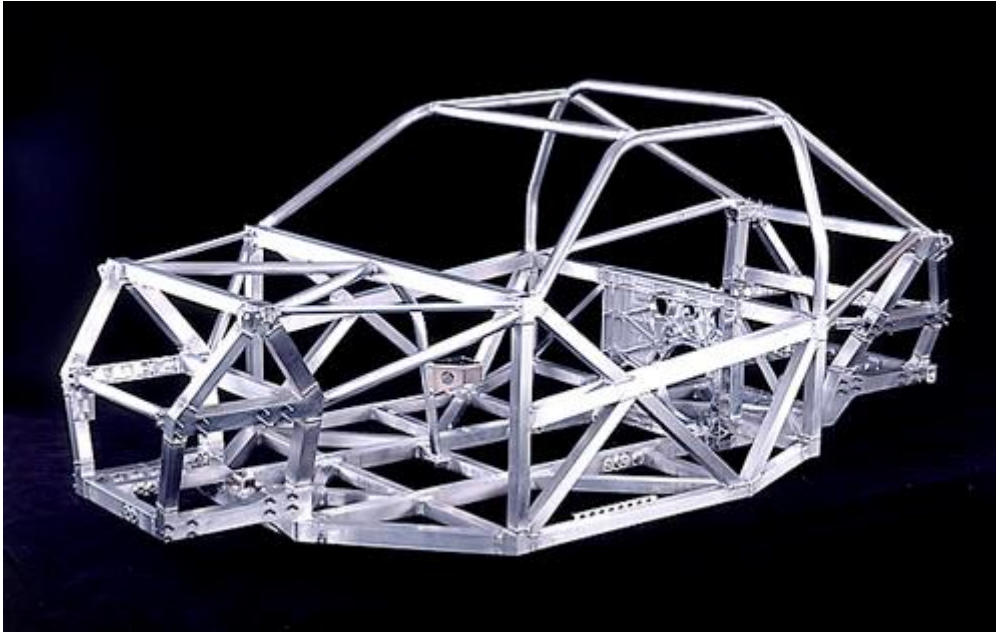


Figura 5 - Estrutura *space frame* em alumínio (Suzuki) [13]

É essencial que o alumínio tenha a capacidade de se adaptar a componentes com passagens interiores de ar e/ou água bem definidas durante o processo de fundição, para que este seja utilizado na indústria automóvel. Por outro lado, estes componentes irão estar sujeitos a elevados esforços oriundos das vibrações do motor e de dilatações térmicas. Esta combinação pode levar à fadiga dos componentes se estes não forem suficientemente pequenos, e se os componentes obtidos por fundição apresentarem defeitos como inclusões, óxidos e porosidades.

A utilização do alumínio na área automóvel tem vindo a aumentar gradualmente com o decorrer dos anos, com uma média de 140 kg por automóvel, de acordo com recentes artigos na área automóvel [4]. Existem fortes indícios de que o alumínio possa também ser utilizado nos capôs, nas bagageiras e nas portas, enquanto estes foram suportados por uma estrutura em aço. Em casos recentes, também se considera a utilização do alumínio em transmissões, chassis, carroçarias e ar condicionado.

Uma das tendências principais para a obtenção dos blocos do motor, um dos componentes mais pesados do automóvel, tem sido o uso do processo de fundição, onde ultimamente a substituição do ferro fundido por alumínio tem obtido resultados significativos na redução de peso do veículo automóvel, tornando-se assim um processo cada vez mais procurado, quando o material de escolha se torna o alumínio. É possível encontrar alumínio fundido em pistões, cabeças de cilindros, transmissões, rodas, travões e componentes de suspensão [4]. A Figura 6 exemplifica uma dessas aplicações.



Figura 6 - Bloco de um motor de quatro cilindros em alumínio [14]

2.1.1.3 Magnésio

O magnésio trata-se de um metal que consegue ser até 75% mais leve que o aço/ferro fundido, e 33% quando comparado com o alumínio. A resistência à corrosão das ligas de magnésio é muito melhor comparada com a das ligas de alumínio. No entanto, o magnésio possui uma tensão de cedência próxima da do alumínio, mas, a sua tensão de ruptura, resistência à fadiga e fluência são muito menores, resultando numa dilatação térmica superior à dos outros metais.

A Tabela 2 apresenta uma comparação das características dos diferentes metais utilizados. Apesar das propriedades do magnésio ficarem abaixo das do alumínio, existem também vantagens na utilização deste material. O magnésio apresenta-se como um metal com melhor maquinabilidade, maior tempo de vida útil e um processo de solidificação mais rápido que o alumínio, o que indica que é possível produzir uma maior quantidade de peças por fundição com magnésio do que com alumínio.

A resistência e a rigidez específica dos materiais e das estruturas são importantes na concepção de componentes com redução de peso. Esta redução do peso é particularmente importante em estruturas automóveis, componentes e outros produtos onde o consumo de energia e as limitações de potência são as maiores preocupações [15]. Para uma melhor comparação entre os três tipos de metais abordados em relação à resistência e rigidez específica, recorre-se à Figura 7.

Tabela 2 - Propriedades do magnésio, alumínio e ferro [16]

Propriedades	Magnésio	Alumínio	Ferro
Estrutura Cristalina	HCP	FCC	BCC
Densidade a 20°C (g/cm ³)	1,74	2,70	7,86
Coefficiente de Expensão Térmica 20-100°C (10 ⁶ /°C)	25,2	23,6	11,7
Módulo de Elasticidade (MPa)	44 126	68 947	206 842
Tensão de Cedência (MPa)	240	320	350
Ponto de Fusão (°C)	650	660	1 536

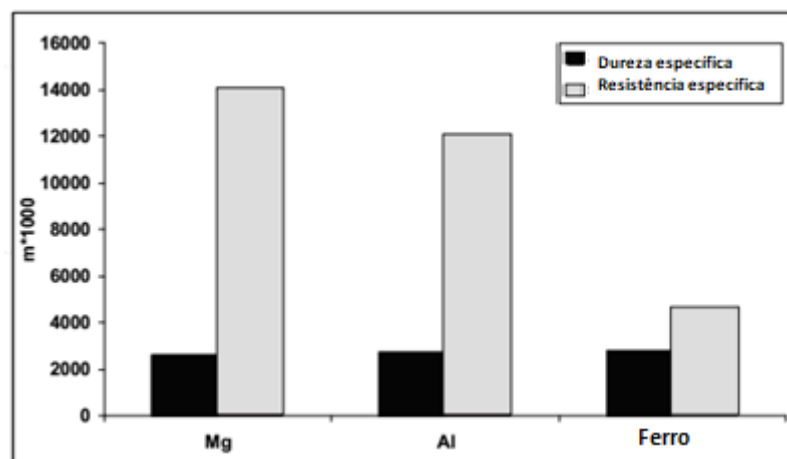


Figura 7 - Comparação de rigidez e resistência específica entre magnésio, alumínio e ferro [17]

2.1.1.4 Plásticos e Compósitos

Apesar de ser um tema com carácter novo, os materiais compósitos poliméricos têm sido utilizados na indústria automóvel há já algumas décadas. Exemplo disso é o modelo Corvette 1953. No entanto, estes materiais têm sido utilizados em aplicações com pouco volume de produção, devido ao longo tempo de produção e custos elevados relativamente aos de produção do aço. À medida que os tempos mudam, os materiais também mudam e os compósitos poliméricos não são excepção, a sua capacidade de reduzir o peso de um componente, flexibilidade, resistência à corrosão, e anisotropia, são factores aliciantes para a indústria automóvel.

No entanto, o custo deste tipo de materiais é normalmente muito elevado (podendo chegar até dez vezes mais, quando se utiliza fibras de carbono) comparativamente com a utilização dos metais convencionais, como se pode observar na Figura 8 [4].

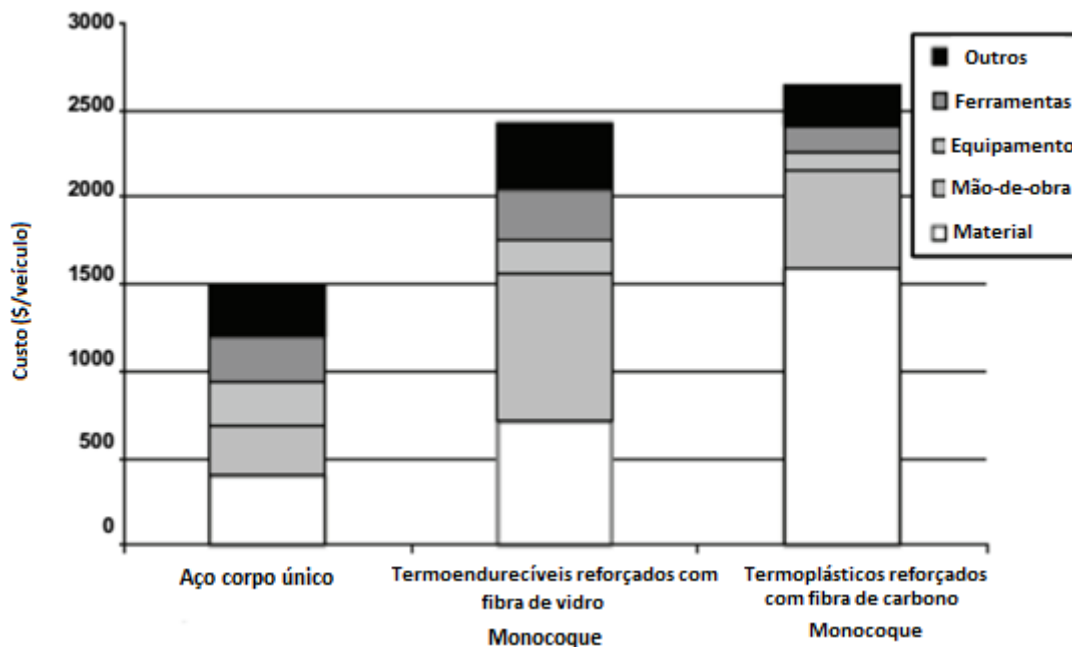


Figura 8 - Comparação de custos entre diferentes materiais [13]

Por esta razão, os desenvolvimentos destes materiais devem consistir no uso de compósitos híbridos (reforço com fibras de carbono ou aramida, onde é necessária uma maior resistência a esforços e rigidez na peça) e no desenvolvimento de processos novos e automatizados, incluindo a utilização de *prepregs* ou outros materiais semi-acabados.

Como foi possível observar, a escolha do processo de fabrico depende do custo e dos requisitos técnicos do componente a produzir. De modo a garantir uma produção económica, são necessários métodos com altos níveis de rendimento.

O uso de *prepregs* termoendurecíveis, materiais reforçados com fibras ou tecidos de vidro ou de carbono envolvidos com resina, tem um número limitado de aplicações a componentes, devido à sua baixa produtividade. Um dos maiores obstáculos à produção de grande volume deste tipo de compósitos estruturais é o tempo necessário para o empilhamento das fibras, e do tempo e custo do processo de cura (geralmente em autoclave). Isto resulta em longos tempos de ciclo, elevado custo de mão-de-obra e, portanto, em baixa produtividade.

Os processos de fabrico mais utilizados pelos fabricantes automóveis nos compósitos termoendurecíveis incluem o *sheet moulding composite* (SMC), o *bulk moulding compound* (BMC), o *reaction injection moulding* (RIM) e o *resin transfer moulding* (RTM). O SMC e o RIM são dos processos mais utilizados, contribuindo com cerca de 48% e 40%,

respectivamente, de todos os componentes termoendurecíveis usados em carros de passageiros. Em relação ao RTM, este mostra-se como sendo o processo que fornece melhor equilíbrio económico para componentes estruturais do automóvel.


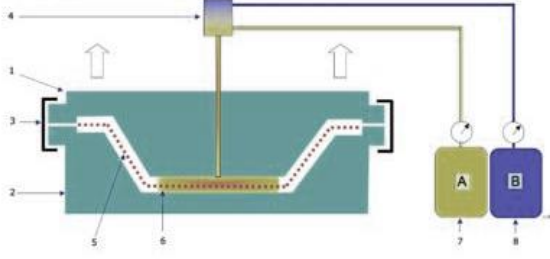
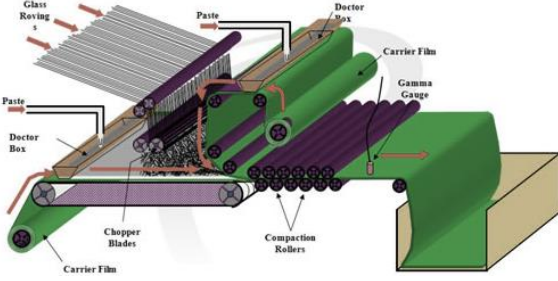
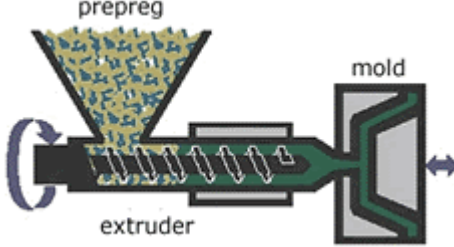
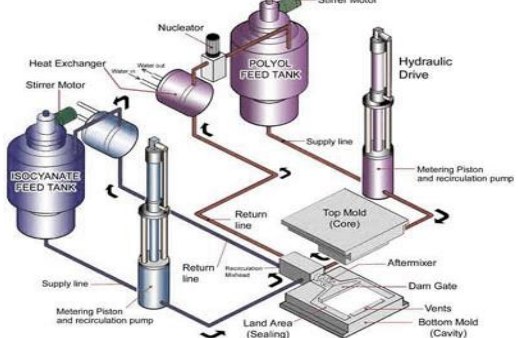
Estes processos possuem tempos de ciclo favoráveis e capacidade de produzir peças com qualidade superficial correspondente às especificações da indústria automóvel. A Tabela 3 permite comparar os diferentes tipos de processos de fabrico relativamente aos seus tempos de ciclo, e em termos de vantagens/desvantagens entre processos.

Tabela 3 - Tipos de processos, vantagens e desvantagens dos Termoendurecíveis [18]

Processo	Vantagens	Desvantagens	Tempo de ciclo
Moldação			
<i>Prepreg</i>	Melhor controlo ao nível do volume de fibra e menor % de vazios	Maior tempo de mão-de-obra para peças mais complexas/ maiores	5-10 horas
RTM	Acabamentos interiores e exteriores com auxílio de controlo de espessuras. Para peças mais complicadas, recorre-se ao vácuo	Necessário o uso de resinas com pouca viscosidade e com possibilidade de apresentar falhas sem o uso do vácuo	8-10 min para peças de grande dimensão 3-4 min quando com vácuo
<i>Compression</i>	Favorecido para produção de grandes volumes com alto volume de fibras	Caro para baixa cadência de produção	1-2 min
SMC	Eficiente em custos para produções de 10.000-80.000 peças/ano	Pouco aproveitamento em reduções de peso	50-100 s
BMC	Baixo custo do material base	Baixa qualidade estrutural, fraco acabamento superficial, pouca fibra e aleatoriamente orientada	30-60 s
RIM	Baixo custo em ferramentas e bom acabamento	Difícil de controlar, principalmente em casos de resinas de pouca viscosidade e tempos longos de cura	4 min

A Tabela 4 representa esquematicamente os processos referidos na Tabela 3.

Tabela 4 - Ilustração dos processos de fabrico para compósitos termoendurecíveis.

Processo	Ilustração
<i>Prepreg</i>	
RTM	
SMC	
BMC	
RIM	

Reduzir os custos de produção de componentes estruturais automóveis derivados de materiais leves, como os compósitos, de modo a que estes consigam ser competitivos com os materiais tradicionais, tem sido um dos principais objectivos do sector automóvel e seus principais *players*. Os investimentos de R&D têm dado prioridade às actividades orientadas para a redução dos custos associados aos materiais de base e ao desenvolvimento/adaptação/optimização dos processos de transformação (necessidade de produção em massa).

As tecnologias para a produção de compósitos devem ser desenvolvidas tendo em conta as geometrias e propriedades dos componentes, numa perspectiva custo-eficiência, rápida, repetitiva e com cuidado ambiental.

Uma das maiores dificuldades para a comercialização em massa de compósitos poliméricos é a falta de informação (por exemplo, bases de dados relativamente a propriedades de materiais), métodos de análise, ferramentas de *design* analítico e estrutural (modelos), e tempo de vida útil dos materiais. Está a ser realizado um esforço na divulgação de tecnologias e informação para uma melhor previsão das respostas que estes materiais possuem num determinado *design* estrutural após um longo período de carga, quando este se encontra exposto a diferentes ambientes e até mesmo em situações de colisão [4].

2.1.2 Materiais compósitos de matriz termoplástica e seus processos associados

2.1.2.1 Matrizes e fibras

A utilização de matrizes termoplásticas nos compósitos de fibras contínuas contribui para uma melhoria muito significativa de importantes características finais destes materiais. Algumas das principais vantagens compreendem o aumento da tenacidade, da tolerância ao dano e durabilidade, e ainda a possibilidade de reprocessamento, reciclagem e a implementação de ambientes de trabalho mais limpos [2]. Adicionalmente, a principal vantagem da utilização destes materiais sobre os de matriz termoendurecível traduz-se na possibilidade de reduzir o ciclo de fabrico, factor de especial interesse em sectores como o automóvel. Este relevante conjunto de benefícios permite perspectivar um crescimento mais acentuado na aplicação deste tipo de matrizes, do que dos polímeros termoendurecíveis. Por outro lado, a utilização de *tapes* com fibras contínuas unidireccionais e matriz termoplástica permite, sobre os tecidos, otimizar a resistência, a rigidez, a localização ou a orientação das fibras [2], conforme é demonstrado na Figura 9.

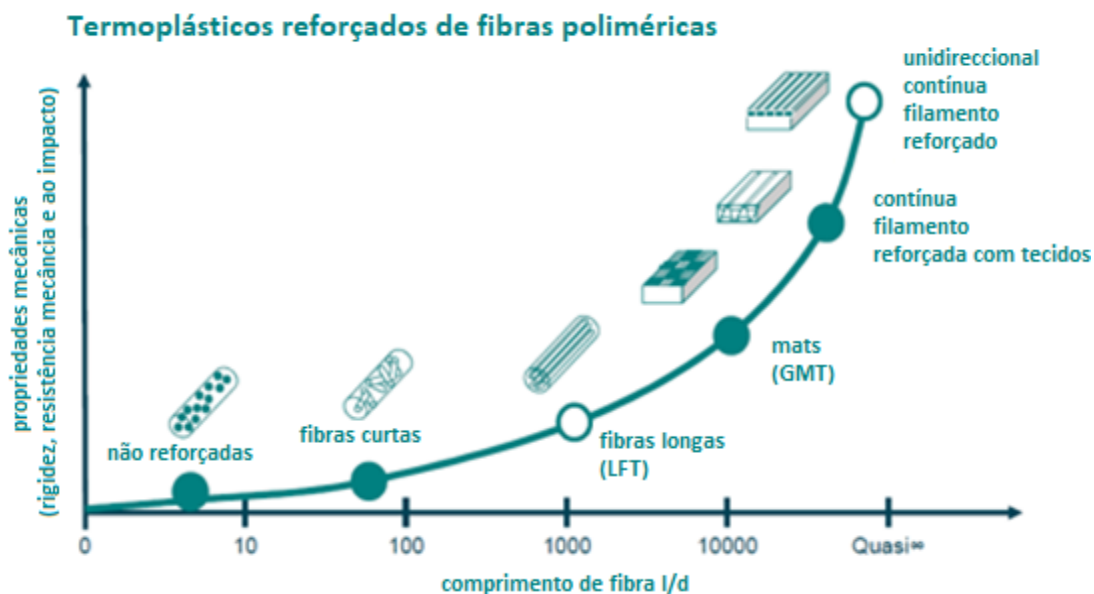


Figura 9 - Propriedades mecânicas das fibras em função do comprimento de fibras [19]

Desde a introdução, na década de 80, dos compósitos de fibra contínua de matriz termoplástica, o estado de maturação do tratamento de dados destes materiais, resume-se a uma gama de materiais como o PEI, o PEEK, o PE e o PPS, em combinação com a fibra de carbono. Apesar das excelentes propriedades deste último grupo de materiais, o elevado custo e limitações associadas aos seus métodos de processamento limitam a sua aplicação, na sua maioria a componentes aeroespaciais.

Os compósitos de matriz termoplástica de fibras unidireccionais, com recurso a matrizes consideradas de engenharia ou de uso corrente, deverão ser capazes de servir a indústria automóvel. De facto, estas matrizes apresentam um menor custo de matéria-prima e temperaturas de processamento mais baixas, levando assim a poupanças energéticas. Apesar da existência de mercado para alguns destes últimos materiais e respectivos fornecedores, a informação disponível sobre os parâmetros de processamento destes materiais é escassa.

Os termoplásticos podem ser amorfos ou semi-cristalinos, conforme podemos observar na Figura 10, resultando numa morfologia mais ou menos sensível a solventes. As resinas amorfas são sensíveis a solventes, enquanto as cristalinas são altamente resistentes, sendo que para estas deve ser garantido um nível uniforme de cristalização durante o processamento do compósito, através do controlo do aquecimento e arrefecimento.



Figura 10 - Pirâmide dos Termoplásticos [20]

Existe actualmente uma vasta gama de compósitos termoplásticos, dando como alguns exemplos desses termoplásticos, dos quais se destacam com base na sua frequência de utilização em aplicações industriais (automóvel, aeronáutica, etc.), os seguintes:

- Policarbonato (PC);
- Poliamidas (PA);
- Sulfeto de Polifenileno (PPS);
- Polietirimidas (PEI);
- Polieterecetonas (PEEK).

Podem-se observar na Tabela 5 as propriedades mecânicas destas matrizes.

Tabela 5 - Propriedades de matrizes termoplásticas [21, 22]

Termoplástico	Densidade	σ_{rot} (MPa)	$E_{flexão}$ (GPa)	T_g (°C)	$T_{serviço}$ (°C)
PC	1,15	65	2,8	270	120
PA6	1,14	70	2,8	260	60 - 105
PPS	1,35	85	3,45	88	218
PEI	1,27	105	3,1	215	200
PEEK	1,3	62	3,8	385	177 - 315

No que diz respeito às fibras, ou reforços, trata-se de componentes estruturais produzidos em materiais compósitos que necessitam de suportar elevados esforços e de possuir elevada rigidez, combinados com a capacidade de suportar determinadas temperaturas e exposição ambiente. A capacidade de suportar esforços e a resistência do compósito deve-se essencialmente ao agente de reforço. Apenas fibras que possuem elevada tensão de ruptura e módulo combinados com baixo peso específico, são utilizadas em compósitos de alto desempenho. Na Tabela 6 é possível observar quais as fibras mais utilizadas e as suas respectivas propriedades mecânicas.

Tabela 6 - Propriedades das fibras de aramida, carbono e vidro [21, 22]

Fibra	ρ (kg/m ³)	σ_{lim} tracção (GPa)	σ_{lim} específica (kNm/kg)	E Tracção (GPa)	E específico (MNm/kg)	σ_{lim} compressão (GPa)	Alongamento (%)
KEVLAR	1440	2,8	1944	62	43,0	0,34-0,48	3,8
PAN CF	1800	2,8	1555	270	150	1,05-2,75	1,5-2,4
S-2 Glass	2490	4,5	1800	86	34,5	1,1	5,7

Outras características a referenciar destas fibras são a sua estrutura molecular altamente orientada, o empacotamento lateral de moléculas ordenado e a reduzida concentração de defeitos axiais.

2.1.2.2 Principais processos de fabrico

A seguir apresentam-se os principais processos de transformação de compósitos de matriz termoplástica desde a moldação por injeção, que utiliza materiais reforçados com fibras curtas, até aos processos que utilizam materiais reforçados com fibras contínuas, como é o caso do *hot stamping* e do *automated fiber placement* (AFP).

2.1.2.2.1 Glass-mat-reinforced thermoplastics (GMT)

Os GMT são produzidos em laminados, com uso de uma resina termoplástica e um ou mais materiais de reforço. Este processo origina um compósito leve, parcialmente consolidado e semi-acabado, possuindo um intervalo de espessuras finais compreendido entre 1,3 a 1,4 mm. No entanto, novos tipos de laminado com novas espessuras têm vindo a surgir. O laminado poderá ser sujeito a corte para incorporação de superfícies em determinadas áreas. Os GMT têm também aplicação na produção de grandes componentes, com custos de ferramentas baixos e tempos de ciclo rápidos, graças à moldação por compressão. O potencial de consolidação dos componentes permite uma oportunidade na redução do peso total e no custo [23].

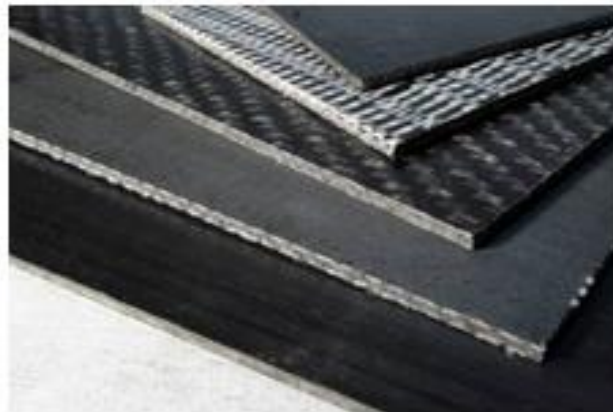


Figura 11 - Laminados de GMT [24]

Os primeiros GMT apresentam uma matriz em polipropileno (PP) com fibras de vidro contínuas/aleatórias. Este material apresenta elevada rigidez nos três eixos e excelente resistência aos impactos, mesmo a baixas temperaturas (-40°C). Estes materiais eram inicialmente utilizados em apoios dos bancos, caixas de baterias, pára-choques e fundos de bagageiras nos veículos de passageiros, sendo também possível encontrar estes materiais em componentes de tractores e militares [23]. Na Figura 12 é possível observar todo o processo de produção de um laminado GMT.

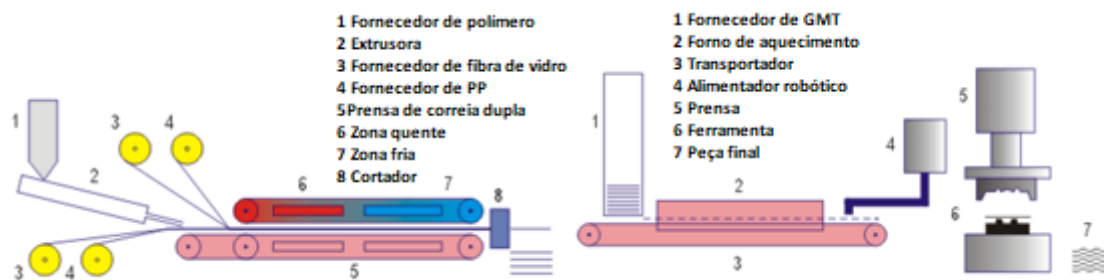


Figura 12 - Ilustração do processo de produção de um laminado GMT e sua moldação por compressão [25]

2.1.2.2.2 *Thermoplastics Injection Moulding (TIM)*

A moldação por injeção de termoplásticos rege-se pela rotina típica de transformação destes materiais envolvendo, sequencialmente, as seguintes etapas: aquecimento do material até este adquirir uma viscosidade suficientemente baixa; enformação sob pressão; e arrefecimento com consequentemente recuperação da rigidez [26]. A Figura 13 esquematiza sucintamente todo este processo.

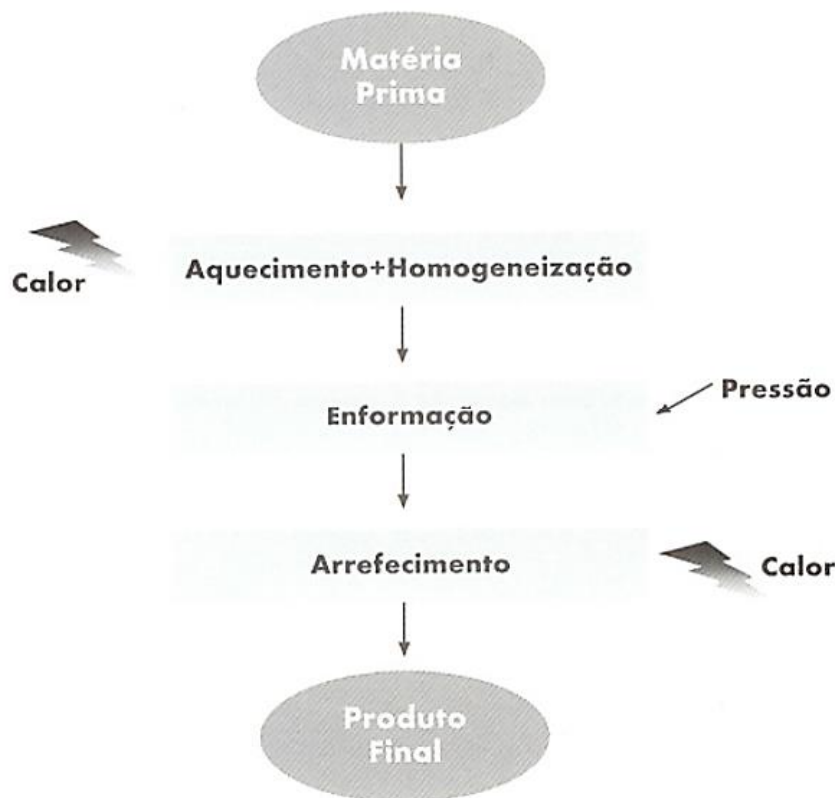


Figura 13 - Esquematização das etapas do processo de moldação por injeção [26]

Esta rotina aplica-se em compósitos com características específicas, onde se pode referenciar [26]:

- **Baixa difusividade térmica** – os plásticos são maus condutores de calor, dificultando as trocas térmicas necessárias à sua transformação. Por isso, é essencial minimizar a espessura das peças a moldar nas moldações por injeção;
- **Comportamento reológico** – no seu estado fundido, os termoplásticos apresentam-se sob a forma de fluidos de elevada viscosidade e com comportamento reofluidificante. A sua viscosidade é função da taxa de deformação imposta ao material, podendo ser relativamente baixa para velocidades de deformação elevadas. Por isso, o enchimento de impressões tende a ser efectuado com elevadas velocidades de enchimento;
- **Elevada dependência térmica da densidade** – o modo de organização das cadeias moleculares constituintes de um sistema polimérico é altamente dependente da temperatura. Um aumento da temperatura provoca o crescimento do volume livre intermolecular, e a conseqüentemente expansão do material. Este efeito traduz-se em valores elevados do coeficiente de dilatação linear (cerca de 5 a 6 vezes superiores ao do aço para termoplásticos não reforçados), e na existência de contracção associada ao arrefecimento das peças injectadas.

O equipamento utilizado e as estratégias escolhidas na optimização do processo deverão ter em conta a qualidade do produto final.

O processo de moldação por injeção de termoplásticos decorre da seguinte forma [26]:

- O material plástico a transformar, no estado sólido e normalmente sob a forma de grãos, é despejado na tremonha da máquina de injeção, a partir da qual este é de seguida alimentado para o interior das paredes do cilindro de plasticização, onde este será aquecido, para amolecer (plasticizar) e ser homogeneizado;
- O aquecimento do material é garantido pelo calor transmitido através das paredes do cilindro e pelo calor gerado por efeito de dissipação viscosa, resultante do trabalho mecânico realizado pela rotação do fuso;
- O fundido resultante é direccionado, sob pressão, para o interior de um molde, o qual irá encher a respectiva impressão, onde posteriormente irá arrefecer devido às trocas de calor com as superfícies moldantes;
- O processo conclui-se com a extracção da moldação, após o período de arrefecimento.

A Figura 14 ilustra o processo de injeção subdividido nas suas três unidades principais: injeção, molde e fecho.

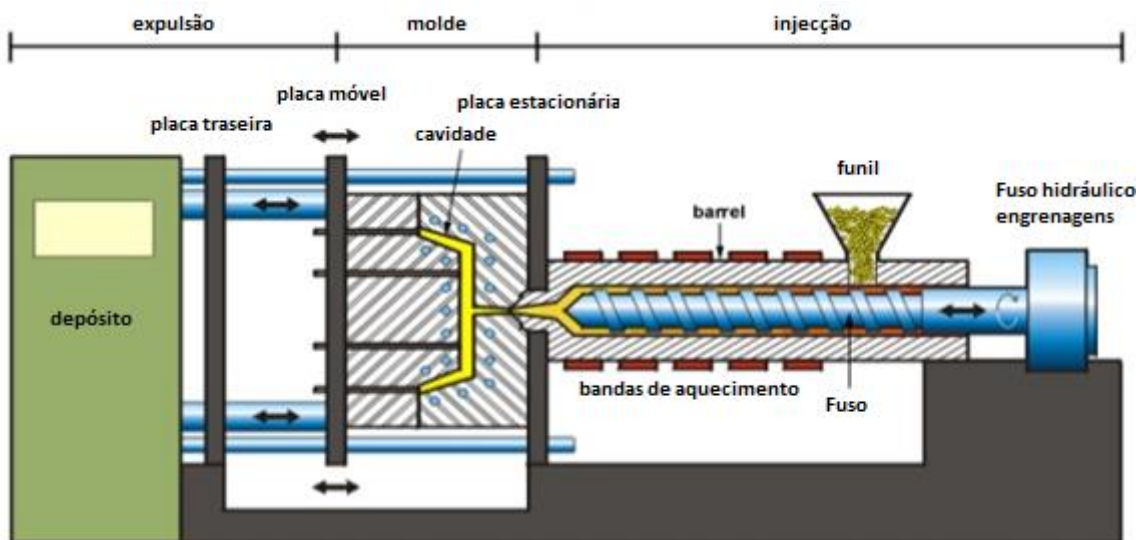


Figura 14 - Processo de injeção de termoplásticos [27]

2.1.2.2.3 Hot-Stamping

A estampagem a quente é uma variação de moldação por compressão, onde o compósito é aquecido até ao ponto de fusão da matriz termoplástica, sendo depois transferido para um molde de termoformação (molde e contra-molde), montado na prensa com o formato final da peça. Este molde fecha aplicando-se pressão, seguindo-

se o arrefecimento da peça. Ao fim de poucos segundos, o molde é aberto e a peça é removida [2].

A estampagem a quente de compósitos de matriz termoplástica, tipicamente combinada com a sobre-injecção, apresenta-se como um dos processos de maior foco de desenvolvimento na transformação de compósitos de reforço contínuo e matriz termoplástica [2].

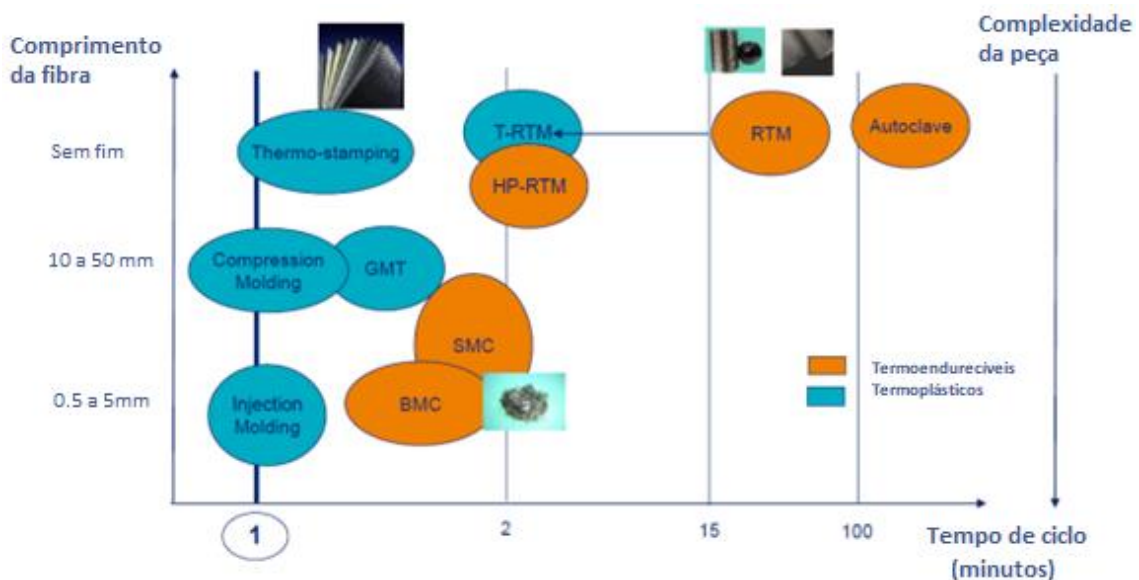


Figura 15 - Relação entre os diversos processos relacionados com o fabrico de componentes em materiais compósitos [2]

Este processo envolve quatro fases às quais se adiciona a sobre-injecção, que são a seguir resumidamente descritas e ilustradas na Figura 16 [2]:

1. **Corte e posicionamento dos tecidos ou de bandas unidireccionais (UD) de pré-impregnados:** os pré-impregnados termoplásticos, sob a forma de tecidos ou de bandas unidireccionais, são cortados e empilhados em camadas com orientações pré-definidas em função das propriedades finais desejadas na peça a produzir. No processo, com recurso a bandas unidireccionais, é possível produzir componentes com zonas de orifícios de grande dimensão, permitindo assim poupanças significativas de material por comparação com os tecidos pré-impregnados;
2. **Consolidação das *tapes* UD usando calor e pressão:** durante o processo de consolidação, as diversas camadas de tecidos e/ou *tapes* pré-impregnadas, previamente empilhadas, são unidas, dando origem ao laminado (*blank*). Essa união é conseguida com recurso a uma prensa com pratos de aquecimento e arrefecimento por acção de calor, pressão e posterior arrefecimento;
3. **Estampagem a quente do laminado:** o objectivo deste passo é transformar o laminado 2D numa geometria 3D. Para o efeito, o laminado é aquecido num forno acima da temperatura de fusão da matriz e é de seguida transportado até ao molde de termoformação (molde e contra-molde) montado na prensa. O

molde fecha, aplicando pressão, seguindo-se o arrefecimento da peça. Ao fim de poucos segundos, o molde é aberto e a peça é removida;

4. **Corte de material excedente:** nesta fase, é removido o excesso de material da peça (abas). Para o efeito, podem ser usados moldes com cortantes e sistemas de furação integrados ou gabaritos de maquinação;
5. **Sobre-injecção:** nesta fase o componente/inserto compósito é colocado no molde de injeção e sobre-injectado. Esta fase adicional visa, geralmente, dar acabamento ao componente e integrar elementos de interface em outros componentes.



Figura 16 - Principais fases do processo de estampagem a quente de compósitos de matriz termoplástica unidireccionais [2]: 1 - Corte e posicionamento dos tecidos ou de bandas unidireccionais (UD) de pré-impregnados; 2 - Consolidação das *tapes* UD usando calor e pressão; 3 – Estampagem a quente do laminado; 4 – Corte de material excedente (não representado); 5 – Sobre-injecção

2.1.2.2.4 Automated Fiber Placement (AFP)

O processo AFP consiste na deposição de *tows* pré-impregnados. Cada um dos *tows* é depositado no molde/mandril por um sistema robótico, com o comprimento, direcção e localização previamente definidos. A direcção dos *tows* é variável, permitindo uma optimização das propriedades da estrutura em função do carregamento a que está submetida. A compactação durante o empilhamento é proporcionada por um rolo elastomérico com controlo de temperatura e pressão. A Figura 17 permite uma melhor percepção do processo [22].

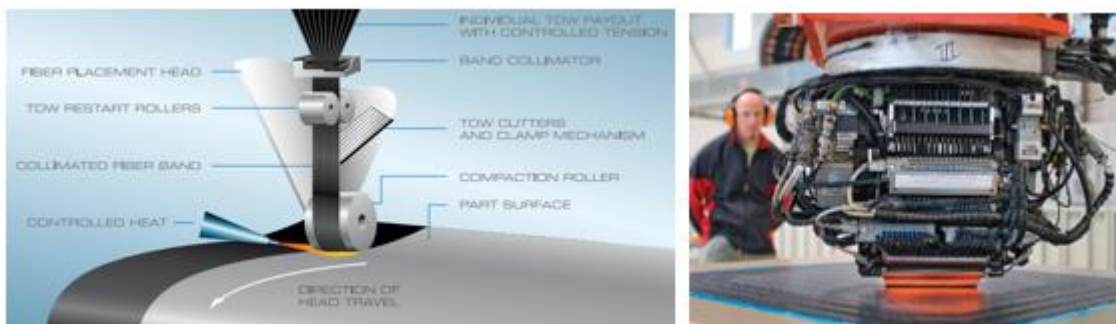


Figura 17 - Ilustração do processo de fabrico AFP e uma cabeça AFP [22]

Os sistemas AFP são geralmente desenvolvidos de acordo com a aplicação final. No entanto, existe uma série de subcomponentes comuns, nomeadamente [22]:

- Cabeça com rolo de compactação;
- Sistema de alimentação de fibra;
- Braço robótico;
- Painel de controlo.

Independentemente da base à qual a cabeça AFP é acoplada, o molde pode manter-se estático, ou é possível combinar os seus movimentos com os do robot e aumentar consideravelmente os graus de liberdade e, conseqüentemente, a complexidade das peças que é capaz de produzir. O controlo dos movimentos de alta precisão do robot e molde (para o caso de moldes dinâmicos) e dos parâmetros de processamento, como velocidade de colocação dos *tows*, força de compactação e temperatura da fonte de calor, são de extrema complexidade, e por isso os principais fabricantes deste tipo de equipamentos têm de forma geral um forte *background* em equipamentos CNC [22]. As principais vantagens do sistema AFP são [22]:

- Produtividade;
- Optimização da direcção das fibras;
- Repetibilidade de peça para peça;
- Baixo desperdício de material.

Quando comparados com o *hot-stamping*, este é um processo bastante mais caro, com investimentos muito significativos ao nível do equipamento, sendo por este motivo preferencialmente utilizado no sector aeroespacial.

2.2 Metodologias e ferramentas de auxílio ao desenvolvimento do produto

2.2.1 Principais fases do desenvolvimento do produto

O processo de desenvolvimento de um produto é uma sequência de etapas interligadas de processamento de informações. É um processo do qual são recolhidos dados sobre as necessidades do mercado e de possibilidades tecnológicas para a produção do produto que respondam a essas necessidades. Estas etapas podem ser enumeradas pela seguinte ordem:

1- Benchmarking e criação de um conceito

Esta primeira etapa consiste numa procura de informações do estado actual do mercado, que necessidades este possui de momento, se existe algum produto que responda a essas necessidades e, caso não exista, se é possível responder a essas necessidades. Se tal se verificar, analisar que tecnologias podem ser utilizadas para a produção desse produto. A criação de um conceito consiste na selecção dos mercados-alvo a explorar, no grau de rendimento, nos recursos necessários para a produção do

produto, na especificação das funções primárias e estruturais que este precisa satisfazer, e no impacto financeiro que esta concepção trará.

2- Planeamento e especificação do produto

Nesta segunda etapa, define-se o conceito do produto a ser produzido, identificando as suas vantagens em relação a outros produtos semelhantes e esclarecendo a sua funcionalidade. Nesta fase, estabelece-se um plano de actividades a realizar até à produção final do produto [28].

3- Concepção do conceito

É nesta etapa que se dá início à resposta das necessidades a que o produto deverá satisfazer, sem nunca esquecer os requisitos estruturais a que este está sujeito, ou seja, as propriedades físicas e mecânicas que o produto deverá apresentar. Para isso, é necessária uma escolha adequada dos materiais e dos processos de fabrico a utilizar, garantindo que estes sejam viáveis e economicamente sustentáveis. Dá-se, portanto, prioridade ao cumprimento dos requisitos funcionais e estruturais, nomeadamente a resistência aos esforços a que este será submetido, e os deslocamentos e deformações que este sofrerá devido a esses esforços aplicados. Segue-se a preocupação com outros possíveis requisitos como o aspecto visual, o *layout* do produto, entre outros [29]. Uma análise da viabilidade técnica e económica deve acompanhar a evolução do produto.

No decorrer desta etapa, como já foi referido anteriormente, determina-se os tipos de solicitações a que o produto a produzir será submetido, e os requisitos necessários a atingir, quer seja a nível de esforços máximos suportados ou limites estipulados aos deslocamentos que a peça possa sofrer.

Assim sendo, esta etapa incorpora as seguintes quatro subdivisões:

- **Seleção de material** – a selecção do material de forma adequada, é de extrema importância para o sucesso dos desenvolvimentos que se seguem. Este é escolhido em função das suas propriedades físicas e mecânicas, pela sua adequabilidade, e pelo seu custo, sendo este último muitas vezes o critério que determina a utilização de um material em detrimento de outros;
- **Modelação CAD** – consiste no desenho 3D do produto, na atribuição de medidas e relações geométricas que este irá possuir. Este é o primeiro passo da criação física, ou seja, a base do produto, que com o decorrer das simulações (processo iterativo), sofrerá alterações geométricas (espessuras, alturas, entre outras);
- **Simulação CAE** – esta é a fase onde se determina se um produto cumpre os requisitos estruturais estipulados. Esta fase consiste na simulação estrutural do produto, onde são introduzidas as propriedades dos materiais utilizados, com todos os carregamentos a que este será submetido em termos reais, todas as condições fronteira

(encastramentos, ligações aparafusadas, entre outras) que este possui, de modo a que os resultados obtidos sejam os mais próximos possível do que ocorrerá na realidade. Se os resultados obtidos no final de cada simulação não forem satisfatórios, é necessário voltar à modelação CAD do produto e realizar as alterações necessárias, até à obtenção de valores que assegurem o funcionamento do produto. No entanto, há situações onde o problema é mesmo a nível de material, o que resulta na substituição do material utilizado até então por um com melhores propriedades mecânicas;

- **Simulação CAM** – nesta fase o foco é ao nível de produção da peça, sendo necessário efectuar uma simulação dos processos de fabrico que serão utilizados na produção do produto. Cada processo tem as suas limitações, sejam estas a nível geométrico do produto (espessuras, curvaturas, tamanhos, entre outros) ou em termos de limitações de custo das ferramentas a utilizar.

Com uma melhor observação destas quatro componentes, é possível reparar que estas se encontram ligadas entre si, não sendo possível avançar para a prototipagem do produto, sem que estas estejam todas aprovadas.

4- Prototipagem e Testes

É nesta fase de projecto que se materializa fisicamente o produto, até então desenvolvido com recurso a tecnologias de prototipagem. Dependendo da tecnologia a utilizar, estes protótipos podem ter carácter estético ou estético-funcional. Caso este se apresente funcional, o mesmo poderá ser submetido aos esforços validados, via simulação CAE. Nesta fase, é ainda possível fazerem-se correcções e ajustes, se necessário, já que as ferramentas produtivas ainda não foram produzidas. Convém ainda referir que estes protótipos não incluem a influência do processo produtivo final no produto, já que as tecnologias de prototipagem e os materiais nelas utilizados são por si conceptualmente diferentes [29].

5- Produção final do produto

Se a avaliação dos testes anteriormente referidos for positiva, o produto segue para a fase de produção, onde posteriormente será lançado nos mercados inicialmente definidos [28].

2.2.2 Principais ferramentas de auxílio ao desenvolvimento do projecto

Actualmente, existe um conjunto alargado de ferramentas para o auxílio no desenvolvimento do projecto, onde se pode notar a existência de várias semelhanças entre algumas delas, já que são utilizadas para as mesmas funções. Os termos de distinção entre estes *softwares* limitam-se por vezes ao grau de instrução que o utilizador possui em relação a cada ferramenta. Na maior parte dos casos, depende da finalidade para que o *software* será utilizado, ou seja, se este será utilizado apenas para

uma breve análise dos esforços aplicados, onde o rigor e a obtenção de dados rigorosos não sejam exactamente a finalidade a obter ou, se será necessária uma maior abordagem ao estudo das cargas, deslocamentos e critérios de ruptura. Estes também podem ser distinguidos pelo próprio tipo de utilizador, se serão utilizados por estudantes para apoio a trabalhos académicos ou por empresas, onde este tipo de *software* se torna um bem indispensável para a concepção e desenvolvimento de estruturas. Finalmente estes *softwares* podem ser limitados em termos do próprio custo do mesmo, já que é possível encontrar discrepâncias entre preços dos vários tipos de *softwares* existentes.

É possível agrupar os *softwares* existentes em duas categorias, ferramentas *Computer Aided Design* (CAD), cuja principal função é o auxílio no desenho dos componentes, e em ferramentas *Computer Aided Engineering* (CAE), onde a análise de esforços, tensões, deslocamentos e deformações é colocada mais em ênfase. Ainda dentro das ferramentas CAE, é possível fazer uma análise aos processos de fabrico dos componentes em análise, através de ferramentas técnicas próprias dos *softwares*, os tais *Computer Aided Manufacturing* (CAM).

2.2.2.1 Principais ferramentas CAD

SolidWorks®

O SolidWorks® é um *software* de CAD desenvolvido pela SolidWorks Corporation, adquirida em 1997 pela Dassault Systèmes S.A., que funciona nos sistemas operativos Windows. Este *software* baseia-se em computação paramétrica, criando formas tridimensionais complexas a partir de formas geométricas elementares. No ambiente do programa, a criação de um sólido ou superfície começa tipicamente com a definição da topologia num esboço 2D ou 3D. A topologia define a conectividade e relações geométricas entre vértices e curvas, no esboço e externas ao esboço.

As soluções SolidWorks® apresentam hoje um ecossistema integrado, desenvolvido a pensar nas necessidades das empresas que efectuam *design* e desenvolvimento de produto, engenharia e produção.

Para além da modelação 3D, a oferta SolidWorks® estende-se a outras áreas de actuação como a simulação, a documentação técnica, o projecto eléctrico e a gestão de informação de projecto. A Figura 18 sintetiza as várias ferramentas que o SolidWorks® fornece ao seu utilizador.

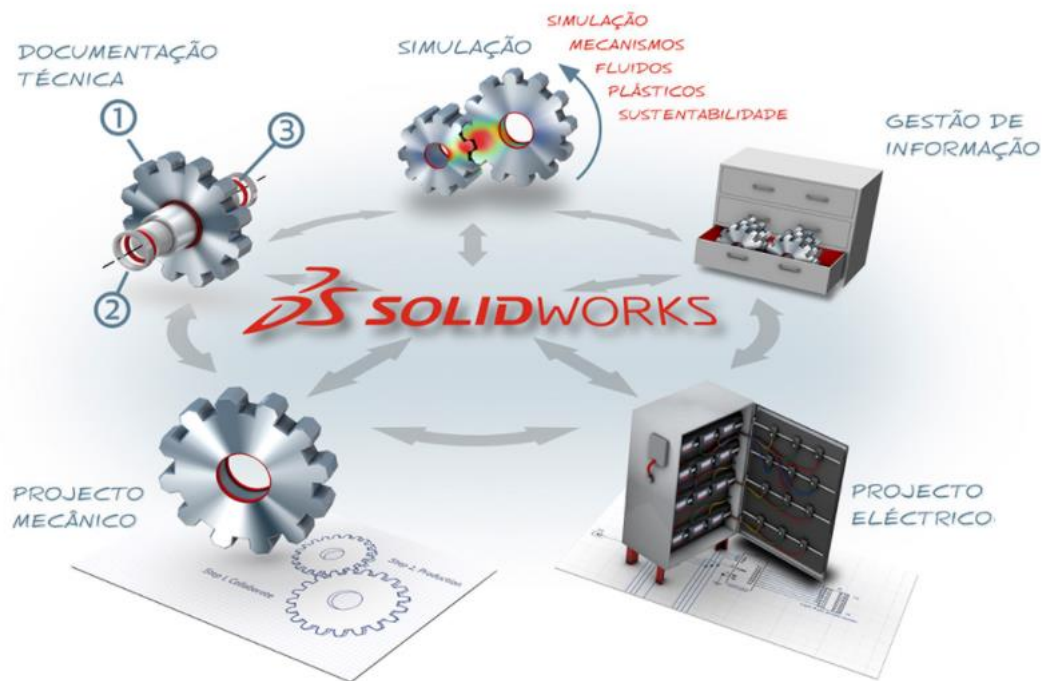


Figura 18 - As várias ferramentas e suas interações que o *software* SolidWorks® apresenta [30]

Inventor Autodesk®

O Inventor® é um *software* de modelação 3D desenvolvido pela Autodesk para a criação de modelos digitais 3D de protótipos. Com ele, é possível realizar o desenho mecânico 3D dos componentes, criar e manter uma rede de comunicação entre todos os integrantes da concepção do componente, e simular os componentes sob os esforços a que estes irão ser submetidos. É um *software* que ajuda os utilizadores a ter uma percepção prévia dos componentes, ao nível de *design*, visualização e simulação [31]. Permite observar os contactos entre componente e realizar uma análise dos esforços a que cada contacto está submetido. Para este efeito, é permitido introduzir valores de carga, valores dinâmicos, coeficientes de fricção e efectuar a devida simulação, para observar o comportamento dos componentes na realidade. O Inventor® permite, por exemplo, otimizar a resistência e o peso de peças para a indústria automóvel, identificar as zonas de tensões mais elevadas, identificar e reduzir vibrações não desejadas, e até mesmo dimensionar motores para reduzir o seu consumo energético [31].

Como exemplo da utilização do *software* Inventor®, recorre-se à Figura 19 que ilustra a concepção de uma suspensão traseira.

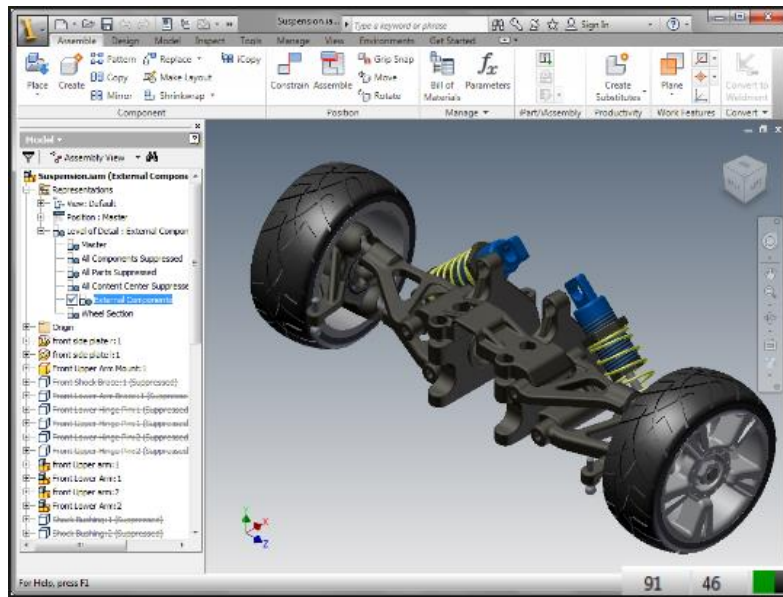


Figura 19 - Concepção de uma suspensão traseira através do Inventor® [32]

CATIA®

O *Computer Aided Three Dimensional Interactive Application* (CATIA®) apresenta-se como um *software* para várias plataformas com aplicações CAD, CAM, CAM, PLM (*Product Lifecycle Management*) e modelação 3D. É possível encontrar a utilização do CATIA em diferentes etapas do desenvolvimento do produto, desde o *design/styling* do produto, passando depois pelos vários tipos de engenharia existentes através do seu leque de aplicações, desde engenharia mecânica, sistemas eléctricos, de fluídos, até à concepção final do produto, e em vários tipos de indústria, como aeroespacial, automóvel, naval, equipamento industrial, energias, arquitectura, entre outros.

É possível observar a concepção de uma rede de tubagens utilizando o CATIA como mostra a Figura 20.



Figura 20 - Simulação de uma rede de tubagens através do CATIA® [33]

2.2.2.2 Principais Ferramentas CAE

2.2.2.2.1 Análise estrutural

Abaqus CAE®

O Abaqus CAE® apresenta-se como uma ferramenta especializada para a análise de elementos finitos de estruturas, sendo assim possível determinar valores de tensões, deformações, coeficientes de segurança, etc., com um óptimo rigor de resultados, através do refinamento de malhas de cada componente da estrutura em estudo, Figura 21. É também possível atribuir diferentes tipos de malhas a diferentes componentes da mesma estrutura, dependendo das geometrias e/ou especificidades destes, atribuir propriedades aos materiais de utilização, desde elementos sólidos a elementos *shell*, tornando-se, assim, uma ferramenta muito utilizada na análise de esforços a que uma determinada estrutura se encontra solicitada.

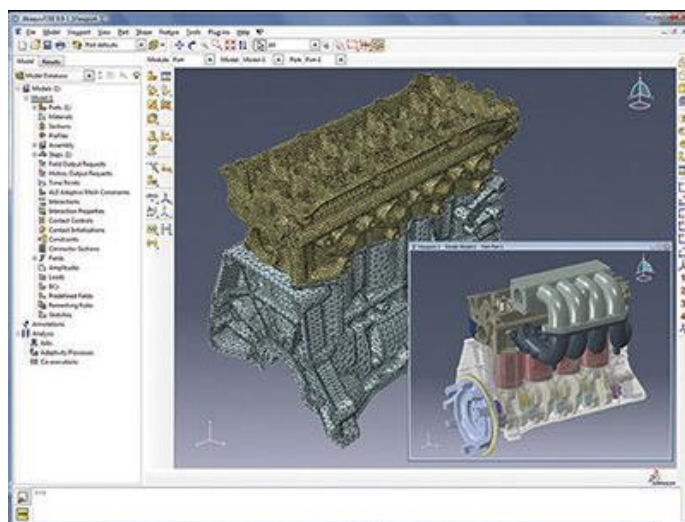


Figura 21 - Meshing de um bloco de motor através do Abaqus CAE® [34]

MSC Nastran®

O MSC Nastran® é um *software* para análise estrutural multidisciplinar, utilizado por engenheiros para a realização de análises estáticas, dinâmicas e térmicas dentro dos domínios lineares ou não lineares, com capacidade para optimização estrutural e estudo à fadiga dos componentes. A sua utilização é preferida pela segurança no *design*, prestada ao nível da resistência a esforços, dureza e tempo de vida antes de falha das estruturas (sujeitas a excesso de cargas, vibrações, impactos ou deformações), que o *software* transmite ao utilizador na concepção do produto, Figura 22. Permite uma pré-visualização do protótipo numa fase prévia do *design*, reduzindo os custos do *physical prototyping*. A obtenção de valores através de protótipos físicos sujeitos a esforços reais, permite uma intervenção imediata no produto, no caso da identificação de alguns problemas durante os ensaios. O Nastran®, como a grande maioria dos *softwares* CAE,

é baseado em métodos numéricos, sendo o mais predominante o Método de Elementos Finitos (MEF).

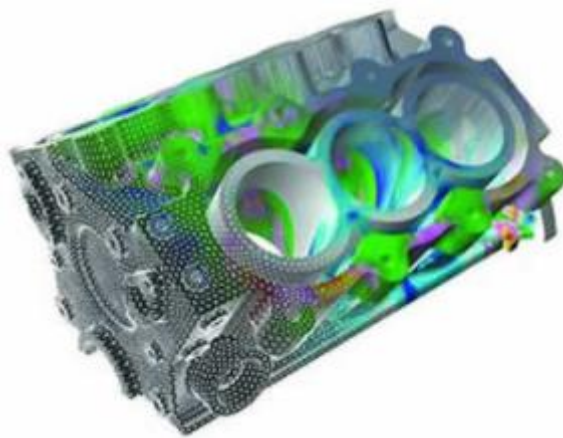


Figura 22 - Simulação de um motor 6 cilindros com Nastran® [35]

Anslys®

O Ansys® é um *software* geralmente utilizado por engenheiros para simular interações de todas as áreas da física a nível estrutural, Figura 23, vibrações, hidrodinâmica, transferência de calor e electromagnetismo, permitindo assim observar o comportamento das estruturas em ambientes de trabalho virtuais, identificar os pontos fracos destas e realizar as optimizações necessárias antes da produção [3].

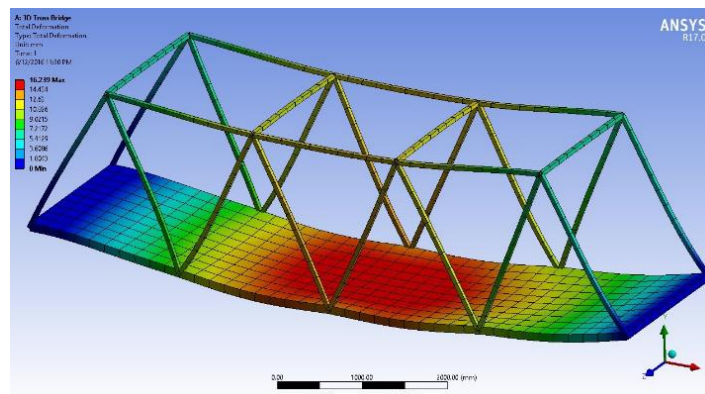


Figura 23 - Análise de esforços submetidos a uma ponte suspensa utilizando o Ansys® [36]

É um *software* que consegue importar ficheiros CAD e fazer alterações geométricas às peças. De forma idêntica aos outros *softwares* de elementos finitos, é possível a realização e refinação de malhas para uma devida análise de esforços, onde esta pode ser obtida através de *outputs* de resultados e/ou com recurso a gráficos [3].

Realiza rápida e seguramente análises através da variação de algoritmos de contacto, com cargas realizadas ao longo do tempo, e com materiais com comportamentos não lineares [3].

É possível encontrar a utilização do Ansys® em vários tipos de indústria: aeroespacial, automóvel, construção, energia, maquinaria industrial, equipamentos médicos, entre outros.

2.2.2.2.2 Simulação de Processo de Fabrico

PAM-FORM®

O PAM-FORM® permite uma simulação realística da conformação a quente de peças em pré-impregnados. Permite escolher o tipo de material, o desenho da ferramenta e os parâmetros mais apropriados para a produção do componente. O PAM-FORM® permite prever e localizar a origem de defeitos, rugas, bolhas e fissuras que o pré-impregnado possa apresentar, corrigindo e otimizando os parâmetros desse processo com visualização de cada camada do laminado representado no modelo, conforme é demonstrado na Figura 24. Duma forma sucinta, o PAM-FORM® permite definir e otimizar:

- O processo de produção: estampagem, termoformação, *stretch forming*, entre outros;
- As condições de aperto;
- Os parâmetros de produção: velocidade, pressão, temperatura, entre outros;
- Permite também prever/prevenir tensões ao nível das camadas;
- A ocorrência de rugas no componente;
- Diferenças de espessuras ao longo do componente;
- Orientação final das fibras;
- Ligações do componente conformado com futuros insertos, tornando o componente híbrido.

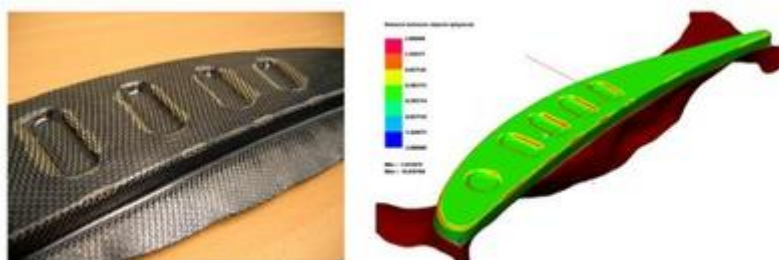


Figura 24 - *Prepreg* de sulfeto de p-fenileno (PPS) e uma possível ligação ao longo do pré-impregnado [37].

AniForm®

O AniForm® Suite trata-se de um *software* baseado também no MEF e pode ser dividido em dois tipos de programas, AniForm® PrePost e AniForm® Core.

O AniForm® PrePost trata-se da interface gráfica de modelação do processo de conformação do compósito. O modo de pré-processamento, antes da produção do componente, permite criar um novo modelo de simulação, enquanto o modo de pós-processamento permite analisar os resultados dessa simulação. Esses resultados são obtidos através do AniForm® PrePost, que transmite os dados das simulações para o AniForm® Core, que por sua vez faz a recolha destes dados e o devido tratamento.

Adicionalmente, o AniForm® está optimizado para trabalhar com altas anisotropias (compósitos reforçados com fibras) e deformações, casos em que não é possível obter uma leitura apropriada de dados num outro *software* baseado no MEF.

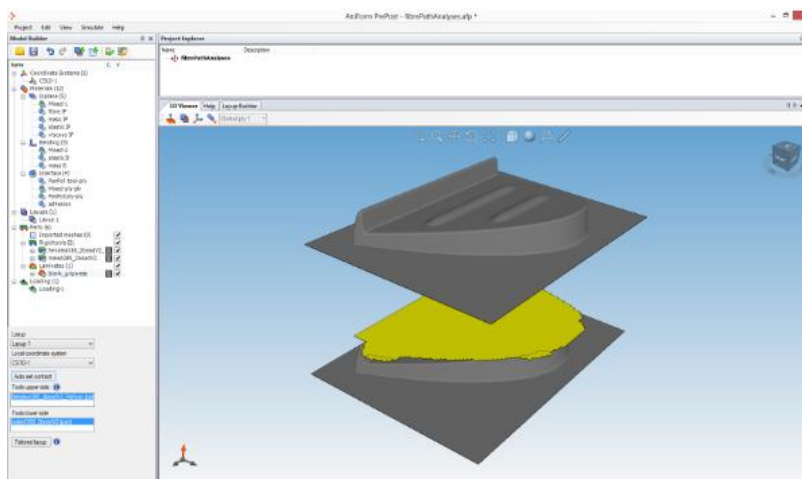


Figura 25 - Simulação da moldação de um laminado (amarelo) com recurso a moldes (cinzento) [38]

MoldFlow® Autodesk

O MoldFlow® é mais um dos *softwares* desenvolvidos pela Autodesk, que permite a realização de simulações do fluxo de injeção do plástico com vista à melhoria/optimização do *design* dos moldes de injeção, garantindo a qualidade do produto final. Esta análise, como é possível observar na Figura 26, providencia uma visualização de como o plástico irá preencher as cavidades do molde e destaca possíveis áreas com problemas (localização de linhas de união, contracções e empenos, entre outros). Este *software* permite o dimensionamento do sistema de alimentação e dos canais de arrefecimento do molde. Esta simulação do processo, previamente à produção final do componente em si, permite fazer as alterações necessárias antes da produção da ferramenta. A sua utilização proporciona a redução de custos de desenvolvimento, a diminuição do tempo de *setup* e ciclo produtivo, evitando desperdícios de matéria-prima, aumentando a produtividade e qualidade das peças plásticas injectadas [39].

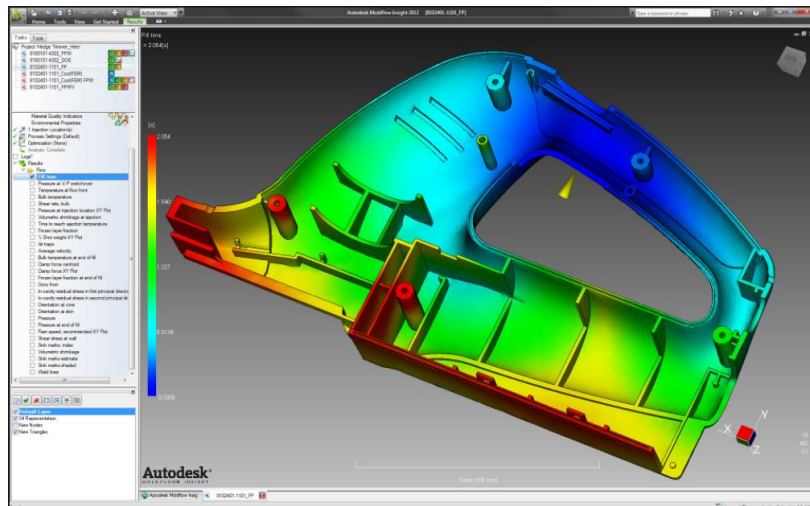


Figura 26 - Simulação do tempo de injeção de um componente com MoldFlow® (Autodesk) [40]

2.2.3 Critérios de falha em materiais compósitos laminados utilizando o método de elementos finitos (Tsai-Wu, Tsai-Hill, Hashin e Tensão Máxima)

A complexidade da análise dos materiais compósitos está relacionada com a sua anisotropia, já que os valores das tensões e constantes de elasticidade dependem da orientação do material, sendo assim necessário recorrer-se a metodologias de análise que sejam capazes de determinar a resistência destes materiais a diferentes tipos de esforços.

Os critérios de falha são ferramentas que permitem avaliar as tensões ou deformações máximas suportadas pela estrutura ou componente, utilizando valores de resistência obtidos através de ensaios uniaxiais ou biaxiais.

Os critérios de falha podem ser divididos em três grupos:

- Independentes:
 - Máxima Tensão;
 - Máxima Deformação;
- Interactivos:
 - Tsai-Hill;
 - Tsai-Wu;
- Parcialmente interactivos:
 - Hashin.

Os critérios independentes são aqueles que predizem a carga pela comparação directa entre os valores limite de tensão, ou deformação do material, com os esforços a que estão a ser sujeitos. Por outro lado, os critérios interactivos fazem uso de uma equação

polinomial quadrática, ou de maior ordem, envolvendo todas as componentes das tensões.

Por outro lado, designam-se por parcialmente interactivos os critérios que separam a falha da fibra e da matriz em dois critérios distintos. Dentro deste grupo de critérios, as equações podem depender de um ou mais componentes de tensão, e as interacções não seguem uma regra geral, ou seja, podem variar de critério para critério.

2.2.3.1 Critério de Tensão Máxima

O critério de tensão máxima pode ser entendido como uma extensão do critério de Rankine (máxima tensão normal), aplicado aos materiais ortotrópicos. Este critério depende de cinco subcritérios, ou limites (não levando em consideração as interacções existentes entre as componentes de tensão), onde estes correspondem aos modos de falha principais (tração e compressão nas direcções principais do material, σ_1 e σ_2 , e a tensão de corte, τ_{12}). Se um destes limites for ultrapassado, pela respectiva tensão nos eixos principais, afirma-se a existência de falha do material, ou seja:

$$\sigma_1 \geq X_T \text{ ou } \sigma_1 \leq X_C \text{ ou } \sigma_2 \geq Y_T \text{ ou } \sigma_2 \leq Y_C \text{ ou } |\sigma_{12}| \geq S_{12}, \quad (1)$$

em que:

$$\sigma_1 = \begin{cases} X_T & \text{se } \sigma_1 > 0 \\ X_C & \text{se } \sigma_1 < 0 \end{cases} \quad \sigma_2 = \begin{cases} Y_T & \text{se } \sigma_2 > 0 \\ Y_C & \text{se } \sigma_2 < 0 \end{cases} \quad t_{12} = S_{12}. \quad (2)$$

No cálculo das tensões, é importante observar se as orientações do alinhamento das fibras coincidem com a da tensão aplicada, ou seja, se existe um ângulo entre a direcção da tensão em relação às fibras do compósito. Se tal se verificar, as tensões obtidas encontram-se em função desse ângulo, e neste caso, é necessária a utilização de equações trigonométricas para obter as tensões principais. A Figura 27 descreve a avaliação por esse critério.

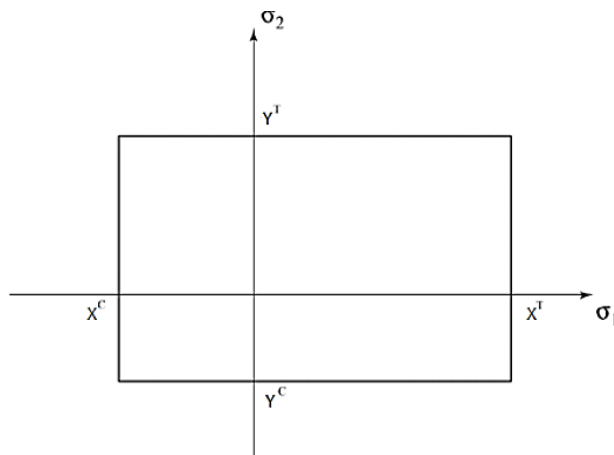


Figura 27 - Envelope de falha pelo critério de tensão máxima [41]

2.2.3.2 Critério de Tsai-Hill

O critério proposto por Tsai-Hill baseia-se na teoria da energia de distorção, presente no critério de von Mises para materiais isotrópicos. Primeiramente aplicado por Hill em materiais anisotrópicos, foi adaptado por Tsai para uma lâmina unidireccional. O envelope de falha deste critério, Figura 28, combina as tensões principais, e as suas interacções, através da seguinte expressão:

$$\frac{\sigma_2^2}{F_2^2} + \frac{\sigma_1^2}{F_1^2} + \frac{\tau_{12}^2}{F_{12}^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{F_1^2} = 1, \quad (3)$$

onde os valores F_1 e F_2 são os limites de resistência nas direcções longitudinal e transversal, respectivamente, que podem ser diferenciados entre tracção e compressão segundo o sinal apresentado pelas tensões normais, e F_{12} refere-se ao valor da resistência ao corte.

$$F_1 = \begin{cases} X_T & \text{quando } F_1 > 0 \\ X_C & \text{quando } F_1 < 0 \end{cases} \quad F_2 = \begin{cases} Y_T & \text{quando } F_2 > 0 \\ Y_C & \text{quando } F_2 < 0 \end{cases} \quad (4)$$

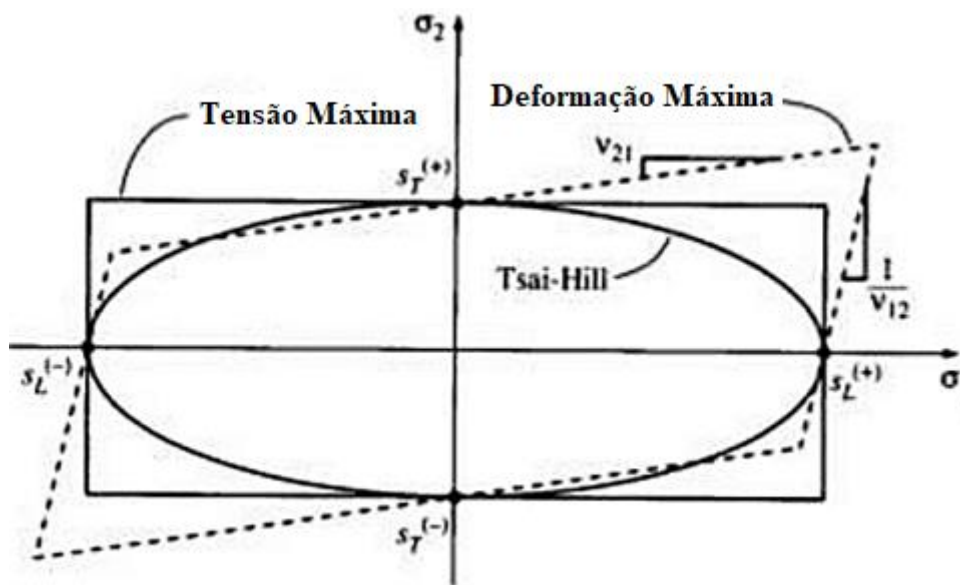


Figura 28 - Envelope de falha pelo critério de Tsai-Hill [42]

2.2.3.3 Tsai-Wu

O critério proposto por Tsai e Wu (5) assume a existência de uma superfície de falha, baseada num tensor polinomial, no espaço das tensões.

$$F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12} + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 \geq 1, \quad (5)$$

onde:

$$F_{11} = \frac{1}{X_T X_C} \quad F_{22} = \frac{1}{Y_T Y_C} \quad F_{66} = \frac{1}{S^2} \quad F_1 = \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C} \quad F_2 = \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}. \quad (6)$$

Os denominadores X_t , X_c , Y_t , Y_c são as tensões de resistência à tracção e compressão nas direcções principais do material e S a resistência ao corte. O termo F_{12} é obtido através de um ensaio biaxial, no entanto, Narayanaswami e Adelman [41] concluíram que este termo é geralmente insignificante para aplicações de engenharia, e sugeriram assumi-lo como nulo.

2.2.3.4 Critério de Hashin

O critério de Hashin é dividido em subcritérios, em que cada um deles avalia diferentes modos de falha do material. É um critério de falha para materiais compósitos com fibras unidireccionais, transversalmente isotrópicos, e que se baseia num polinómio quadrático de tensões. Através deste critério, são avaliados quatro modos de falha no estado plano de tensão, onde podemos afirmar que estamos perante a falha do material se as seguintes equações forem satisfeitas:

- Falha da fibra à tracção

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

- Falha da fibra à compressão

$$-\sigma_1 = X_C \quad (\sigma_1 < 0 \text{ e } X_C > 0) \quad (8)$$

- Falha da matriz à tracção

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

- Falha da matriz à compressão

$$\left(\frac{\sigma_2}{2S}\right)^2 + \left(\frac{Y_C}{2S} - 1\right) \frac{\sigma_2}{Y_C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (10)$$

A Figura 29 permite observar os diferentes critérios de falhas referidos e as diferenças entre os seus respectivos domínios.

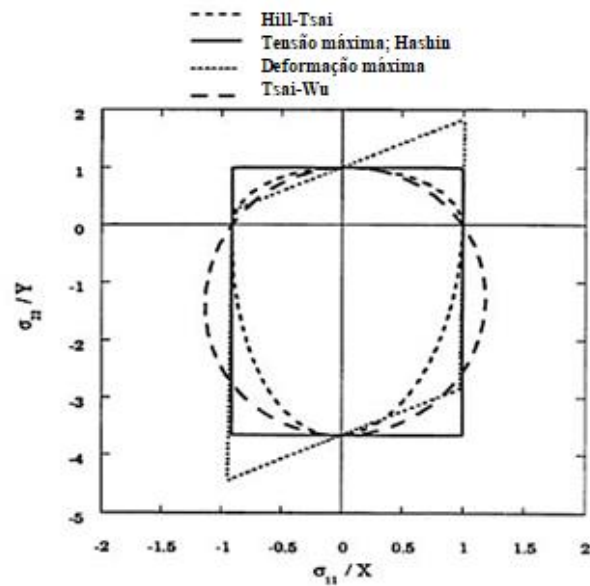


Figura 29 - Comparação entre envelopes de falha [41]

2.3 Sistema de suspensão automóvel e tipologias de braços de suspensão

O sistema de suspensão é um agente fundamental no que respeita à segurança activa do automóvel. É formado por vários elementos flexíveis, que estabelecem a ligação entre os pneus e as partes do veículo que não estão em contacto com o solo. A função deste sistema é absorver as irregularidades do terreno, manter contacto entre o veículo e o solo, garantindo o bem-estar dos ocupantes e melhorando o desempenho automóvel.

De acordo com as leis de deslocamento de Newton, todas as forças possuem tanto magnitude/intensidade como direcção. Uma ondulação no solo faz com que a roda se mova para cima e para baixo, perpendicularmente à superfície, Figura 30. A magnitude da força vai depender se a roda atinge uma grande ondulação, ou uma partícula minúscula [43].

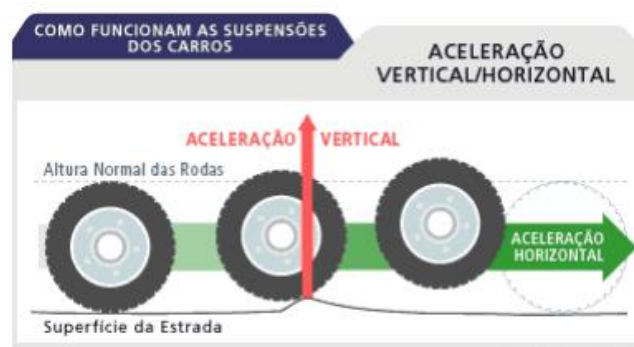


Figura 30 - Aceleração vertical e horizontal das rodas de um veículo [43]

Sem um sistema de suspensão, toda a energia vertical das rodas é transferida para o chassi, que se move na mesma direcção. Numa situação dessas, as rodas podem perder completamente o contacto com o solo. É então necessário um sistema, Figura 31, capaz de absorver a energia da roda acelerada verticalmente, permitindo que o chassi e o corpo permaneçam inalterados, enquanto as rodas seguem as irregularidades do solo. A suspensão do carro é, na verdade, parte do chassi [43].

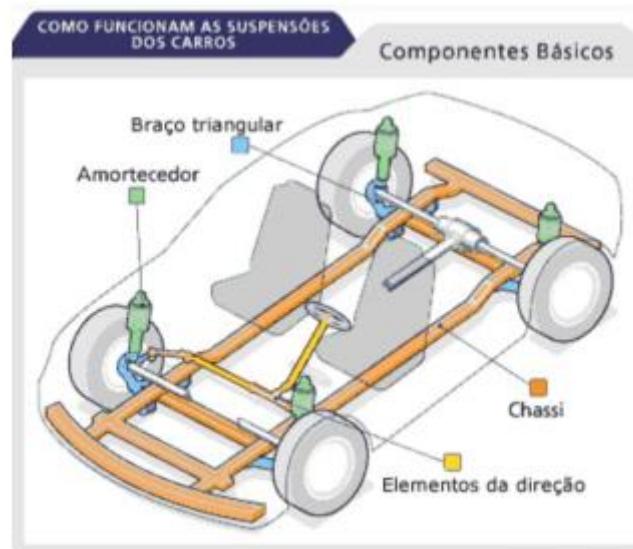


Figura 31 - Representação esquemática do chassi, sistemas de suspensão e direcção [43].

O braço de suspensão trabalha em harmonia com os demais componentes da suspensão, ligando a roda ao chassi do veículo e contribuindo para a melhor estabilidade, conforto e segurança do sistema. A sua construção é geralmente formada por uma estrutura estampada, forjada ou fundida, buchas e pivô. Este tem como funções [44]:

- Ligar a roda ao chassi do veículo, através dos elementos bucha e pivô;
- Determinar o alinhamento das rodas (tamanho, formato e posicionamento);
- Permitir movimentos verticais da suspensão (subir e descer);
- Suportar forças laterais (nas curvas);
- Limitar e controlar movimentos longitudinais das rodas (travagens e arranques);
- Permitir que uma suspensão seja independente (lado direito independente do esquerdo).

As molas controlam e determinam a altura do carro elasticamente, e os amortecedores controlam a energia armazenada por estas. Dessa forma, os braços de suspensão têm como função controlar o posicionamento dos componentes da suspensão perante as mais diversas situações, como o subir e descer (ex. passagem em lombas), para a frente

e para trás (ex. arranques e travagens), ou para dentro e para fora (ex. curvas). Este controlo do braço proporciona o máximo desempenho da suspensão, além de garantir o perfeito alinhamento da direcção. O braço de suspensão, por ser o componente de suspensão mais próximo do solo, é o primeiro a receber o choque de um impacto sofrido pela suspensão. Das diversas funções que possui no conjunto da suspensão, a principal é ligar as rodas ao chassis. Isso mostra que o braço de suspensão está intimamente ligado com a segurança do veículo e dos seus ocupantes.

É de notar que existem vários tipos de suspensão, alguns usados mais frequentemente do que outros. O tipo de suspensão varia de acordo com a gama do automóvel. Certos tipos já caem em desuso, mas que convém considerar para ser possível ter sempre um ponto de referência de onde se começou, e o que já se alcançou. Nos subcapítulos a seguir, irá ser realizada uma breve síntese de alguns destes tipos de suspensão, todas frontais, já que o objecto de estudo desta dissertação se trata também de um componente de uma suspensão frontal.

2.3.1 Suspensão de Eixo Rígido

Este tipo de suspensão, Figura 32, tal como o nome nos transmite, é constituído por um eixo rígido, onde as rodas se encontram situadas em cada extremidade desse eixo. Este é um tipo de suspensão que remonta ao tempo da carroça puxada a animais, e foi introduzido nos primeiros tipos de automóveis, porque até então não era necessário ter qualquer tipo de preocupação em termos de suspensão. Actualmente, este tipo de solução é utilizada só nas suspensões traseiras.

Apesar de se tratar dum *design* já desactualizado, e também desapropriado para automóveis ligeiros, este tipo de suspensão ainda se pode encontrar em veículos pesados e semi-pesados devido à grande capacidade de suportar cargas [45].

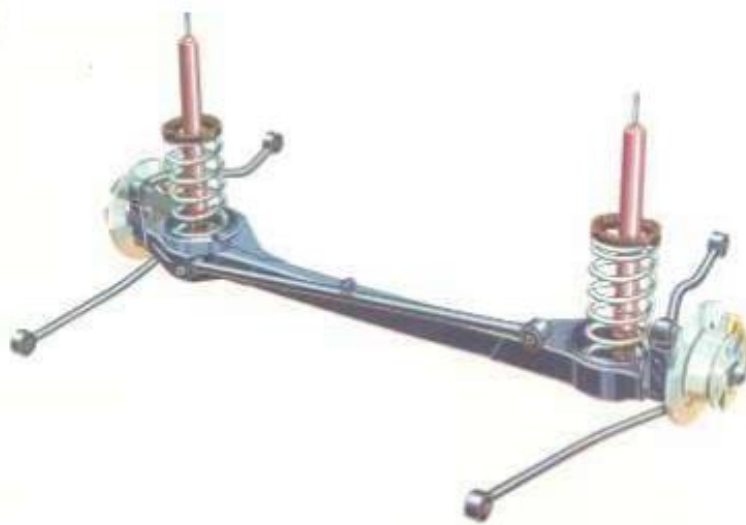


Figura 32 - Exemplificação de uma suspensão de eixo rígido [45]

2.3.2 Suspensão de Duplo A

O tipo de suspensão de Duplo A, ou do inglês “*double wishbone*”, Figura 33, é formado por dois braços triangulares. Cada braço triangular, que possui dois pontos de articulação no chassi e um ponto de articulação na roda, possui um amortecedor e uma mola helicoidal para absorver vibrações. Com esta forma dos braços, e com a própria tracção do automóvel, é possível controlar o alinhamento e a posição do automóvel durante a condução com facilidade. Apresenta-se como uma estrutura rígida, sendo muito mais utilizada nos carros desportivos, onde o controlo e a estabilidade são mais solicitados [46]. No entanto, apresenta-se também como uma estrutura muito complexa, com necessidade de muitos componentes, o que, conseqüentemente, vai prejudicar o peso total do automóvel [47].



Figura 33 - Exemplo de uma Suspensão de Duplo A [47]

2.3.3 Suspensão Multilink

Este tipo de suspensão deriva de sistema Duplo A, mas num estado mais avançado, Figura 34. Como o nome *multilink* indica, ou do português multibraço, esta suspensão resulta da ligação de vários braços (normalmente 3 a 5 braços) à estrutura, separados entre si, existindo muita liberdade relativamente ao posicionamento. Este maior número de braços permite controlar o movimento em diversas direcções e mantém as rodas em contacto constante com a superfície do pavimento. É um tipo de suspensão que recai também mais na área dos carros de tracção frontal de alto desempenho, mas sendo também utilizada em carros com tracção traseira, mas com elevada potência [46].

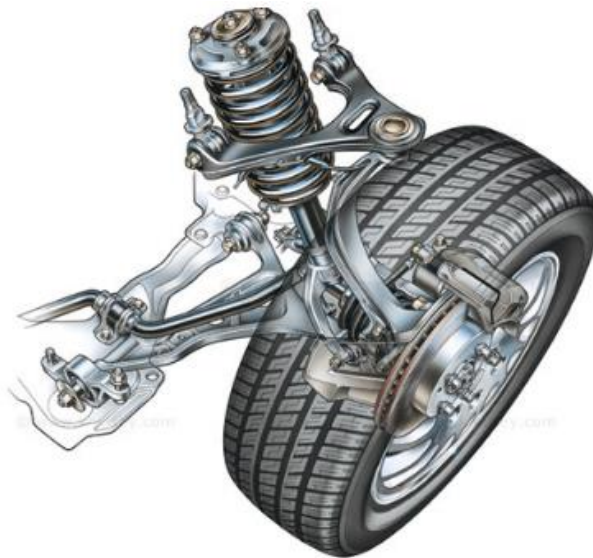


Figura 34 - Exemplificação de uma Suspensão Multibraço [48]

2.3.4 Suspensão MacPherson

Este tipo de suspensão, patenteada por Earle Steele MacPherson em 1946, Figura 35, foi o tipo de suspensão mais recorrente nos anos 70 em carros pequenos com tracção às rodas da frente. Este tipo de suspensão consiste numa mola directamente conectada com a junta de direcção da roda, e actua como um elemento de união na suspensão, tornando-o assim num sistema de suspensão simples e robusto. Este tipo de suspensão é muito característico nos carros pequenos produzidos actualmente, devido ao baixo custo de produção em massa, bom comportamento dinâmico e dimensões compatíveis com os carros de tracção frontal [45].



Figura 35 - Exemplo de uma Suspensão MacPherson [46]

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Braço de suspensão, objecto de estudo e principais requisitos mecânicos (condições de carga)
- 3.2 Selecção e caracterização de materiais
- 3.3 Desenvolvimento do braço de suspensão em materiais compósitos de matriz termoplástica
- 3.4 Processo de fabrico
- 3.5 Análise técnico-económica da solução final

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Braço de suspensão, objecto de estudo e principais requisitos mecânicos (condições de carga)

No âmbito do projecto LaTCh II, foi decidido pelo consórcio que o braço de suspensão de referência em aço seria o braço dianteiro de um Nissan Leaf (tipo MacPherson), por se tratar de um veículo eléctrico, onde a redução do peso é um factor importante, e pela sua adequação às tecnologias propostas pelo projecto (estampagem e injeção). Assim, foram definidas, também pelo consórcio, três situações reais a que o braço de suspensão é solicitado durante a sua vida útil, seguindo-se a determinação das forças envolvidas em cada situação:

- Situação de Travagem – força exercida no braço de suspensão durante uma travagem de emergência;
- Situação de Aceleração – força exercida no braço de suspensão durante a aceleração, quando solicitado à potência máxima;
- Situação de Curvas – forças exercidas nos braços de suspensão durante a uma curva (compressão na roda exterior e tracção na roda interior).

Com base nas especificações do automóvel (Tabela 7), fornecidas pelo consórcio e das equações 11, 12, 13 e 14, é possível obter a resultante das forças de cada uma das situações solicitadas.

Tabela 7 - Especificações do Nissan Leaf

Especificações Nissan Leaf	
Peso máximo	1 990 kg
Distribuição frontal	1 030 kg
Distribuição traseira	960 kg
Binário máximo do motor	280 Nm
Relação de transmissão	7,9777 : 1
Binário máximo às rodas	2 222,56 Nm
Aceleração 0 -> 100 km/h	11,5 s
Raio das rodas	315,95 mm

- Equação da aceleração através da equação das velocidades (a):

$$v(t) = v_0 + at \rightarrow a = \frac{v_0}{t} . \quad (11)$$

- Equação da energia cinética (E):

$$E = \frac{1}{2}mv^2 . \quad (12)$$

- Conversão de energia para potência (P):

$$P = \frac{E}{t} . \quad (13)$$

- 2ª Lei de Newton (F):

$$F = ma . \quad (14)$$

em que:

a – aceleração (m/s^2); v_0 – velocidade inicial (m/s); t – tempo (s);
 E – energia cinética (J); m – massa (kg); v – velocidade (m/s);
 P – potência (W); F – força (N).

3.1.1 Situação de travagem

A Figura 36 e a Tabela 8 esquematizam a condição de carga da travagem e apresentam as suas respectivas forças.

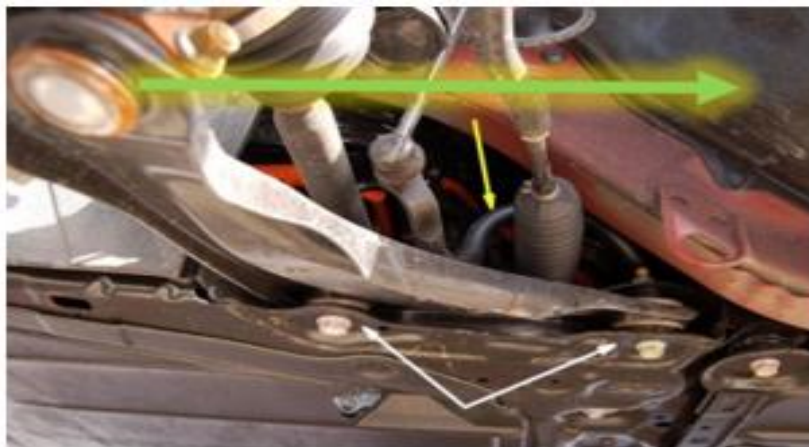


Figura 36 - Força sobre o braço de suspensão (seta a verde indica o sentido da força de travagem)

Tabela 8 – Resultados dos cálculos da força de travagem

Travagem	
Distribuição frontal	70%
Distribuição traseira	30%
Travagem de emergência 100 -> 0 km/h	3,2 s
V inicial	100 km/h
Cálculos	
Potência média	239,92 kW
Desaceleração	8,681 m/s ²
F travagem total	17 274,31 N
F travagem eixo dianteiro	12 092,01 N
F travagem 1 roda	6 046,01 N
F braço de suspensão	7 696,38 N

3.1.2 Situação de aceleração

A Figura 37 e a Tabela 9 esquematizam a condição de carga da aceleração e apresentam as suas respectivas forças.

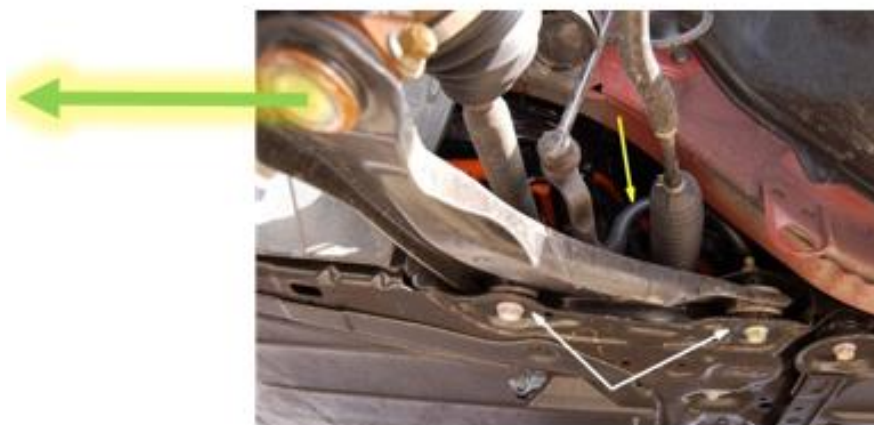


Figura 37 - Força sobre o braço de suspensão (seta a verde indica o sentido da força de aceleração)

Tabela 9 - Resultados dos cálculos da força de aceleração

Aceleração	
Cálculos	
Potência média	66,76 kW
F aceleração eixo dianteiro	7 034,52 N
F aceleração 1 roda	3 517,26 N
F braço de suspensão	4 477,36 N

3.1.3 Situação de curva

A Figura 38 e a Tabela 10 esquematizam a condição de carga da tracção e da compressão do braço de suspensão, no caso de uma curva, e apresentam as suas respectivas forças.



Figura 38 - Forças sobre o braço de suspensão (setas a verde indicam os sentidos das forças de tracção e compressão)

Tabela 10 - Resultados dos cálculos da força de tracção e de compressão

Curva	
Cálculos	
F total	15 419,94 N
F eixo dianteiro	7 981,18 N
F roda dentro (tracção)	3 192,47 N
F braço de suspensão (tracção)	4 063,92 N
F roda fora (compressão)	4 788,71 N
F braço de suspensão (compressão)	6 095,88 N

3.2 Selecção e caracterização de materiais

3.2.1 Pré-impregnados de fibra continua de matriz termoplástica

Como referido anteriormente, a utilização de compósitos de matriz termoplástica de fibras unidireccionais com recurso a matrizes consideradas de engenharia, deverá ser capaz de servir a indústria automóvel. Assim sendo, pela avaliação dos materiais pré-impregnados termoplásticos unidireccionais disponíveis no mercado (considerando

apenas os de engenharia e de grande consumo), conclui-se que a poliamida (PA) é a matriz que apresenta a melhor relação propriedades/custo.

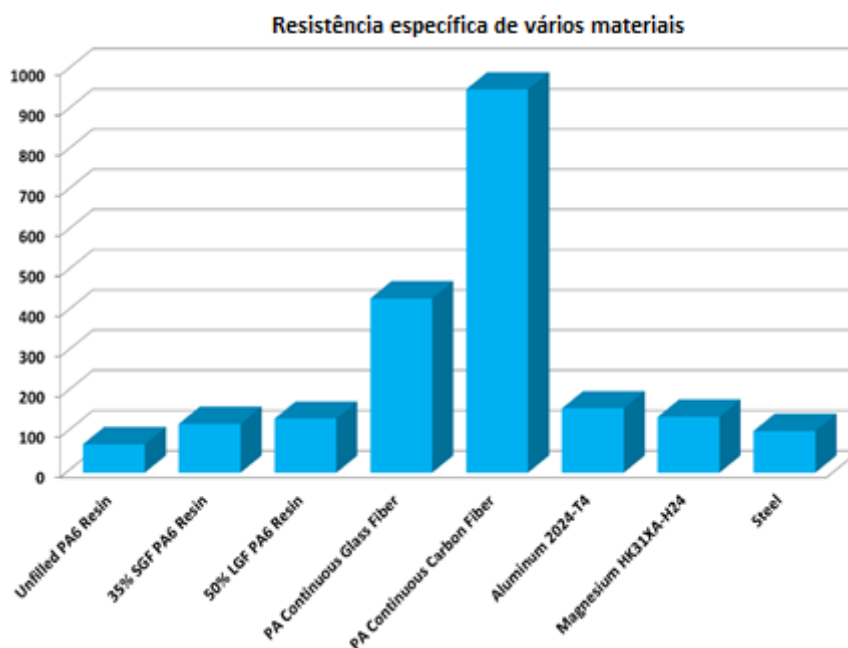


Figura 39 - Razão entre a resistência e o peso de diversos materiais [2]

A Figura 39 apresenta a razão entre a resistência e o peso de diversos materiais compósitos tendo por base uma matriz de PA6 em comparação com materiais como o alumínio, o magnésio e o aço. É também possível observar a excelente razão resistência/peso, para o caso de um compósito de PA com fibra de carbono contínua.

Devido à natureza estrutural do braço de suspensão e do objectivo de optimização do peso, a necessidade de materiais pré-impregnados com fibra contínua de carbono é inquestionável. Neste contexto, e olhando para os pré-impregnados baseados em matrizes termoplásticas de engenharia combinadas com o carbono, conclui-se que a PA6 é o material que mais se adequa às condições de carga propostas.

Com efeito, foram numa primeira fase identificados potenciais fornecedores destes materiais, dos quais se destacam a BASF, a TENCATE e a Teknosav. A BASF foi o fornecedor eleito por dispor de um material de injeção desenvolvido para a sobre-injeção do pré-impregnado e, portanto, com compatibilidade garantida.

No entanto, o pré-impregnado da BASF acabou por ser descontinuado, dando origem à escolha da TENCATE, cujo pré-impregnado apresenta as mesmas características do da BASF. A Tabela 11 indica o nome comercial do pré-impregnado da TENCATE (Anexo A).

Tabela 11 - Tipo de matriz termoplástica e respectivo fornecedor

Reforço	Fornecedor	Produto	Tipo
Fibra de Carbono	TENCATE	TenCate Cetex® TC910 Nylon 6	UD Tape

3.2.2 Termoplásticos para sobre-injecção

A escolha do material de sobre-injecção é efectuada após a selecção do pré-impregnado com vista a garantir uma melhor compatibilidade entre os dois materiais. Naturalmente, o material de sobre-injecção deverá apresentar a mesma matriz do pré-impregnado, neste caso uma poliamida 6.

Neste contexto, o material escolhido primariamente foi o Ultramid da BASF (Anexo B e Anexo C), sendo posteriormente substituído pelo Promyde da Nurel (Anexo D e Anexo E), que apresenta características muito semelhantes. Tanto o Ultramid como o Promyde são materiais reforçados com fibra de vidro (GF) curtas, em percentagens que variam entre os 30 e os 60%. A Tabela 12 apresenta as principais características dos materiais referidos.

Tabela 12 - Comparação entre a Ultramid e Promyde

Fornecedor	Material	Condição	Tensão Rotura (MPa)	Módulo Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
BASF (Ultramid)	PA6 + 35%GF	Condicionado*	112	6 170	0,35
	PA6 + 35%GF	Após secagem**	170	10 000	
	PA6 + 60%GF	Condicionado	170	14 200	
	PA6 + 60%GF	Após secagem	260	20 800	
Nurel (Promyde)	PA6 + 30%GF	Condicionado	110	6 500	
	PA6 + 30%GF	Após secagem	160	9 900	
	PA6 + 60%GF	Condicionado	190	17 000	
	PA6 + 60%GF	Após secagem	240	21 000	

*Condicionado = de acordo com a norma ISO 1110

**O tratamento do material segundo as condições após secagem são as seguintes:

- Temperatura de desumidificação: 80 °C;
- Tempo de desumidificação: 4-6 horas.

3.2.3 Caracterização de materiais

3.2.3.1 Constantes da Lâmina

Com os dados fornecidos em ficha técnica pelo fornecedor, Anexo A, realizou-se uma série de cálculos com vista à obtenção de outras propriedades necessárias à simulação estrutural (constantes de engenharia da lâmina), nomeadamente os módulos longitudinais e transversais (E_1 e E_2 , respectivamente), os módulos ao corte nas três dimensões (G_{12} , G_{13} e G_{23}) e o coeficiente de Poisson na direcção 12 (ν_{12}). De acordo com a lei das misturas para materiais compósitos, sabendo a percentagem do volume de fibra e da matriz, e respectivamente os seus módulos (tracção e corte) e os seus coeficientes de Poisson, é possível determinar as constantes de engenharia da lâmina.

As equações aplicadas com base na lei das misturas são as seguintes:

- Fracção volúmica da matriz;

$$V_m = 1 - V_f. \quad (15)$$

- Módulo longitudinal à direcção das fibras;

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m. \quad (16)$$

- Módulo transversal à direcção das fibras;

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_f E_m + V_m E_f}. \quad (17)$$

- Módulo ao Corte (G_{12});

$$\begin{aligned} E_3 &= E_2 \\ G_{31} &= G_{12}, \\ \nu_{13} &= \nu_{12} \\ G_{12} &= \frac{G_f G_m}{V_f G_m + V_m G_f}. \end{aligned} \quad (18)$$

- Coeficiente de Poisson (ν_{12});

$$\nu_{12} = V_f \nu_f + V_m \nu_m. \quad (19)$$

- Coeficiente de Poisson (ν_{23});

$$\nu_{23} = \frac{V_m E_f \nu_m + V_f E_m \nu_f}{V_m E_f + V_f E_m}. \quad (20)$$

- Módulo ao Corte (G_{23}).

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})} \quad (21)$$

Através das equações apresentadas é possível obter as constantes de engenharia da lâmina para o compósito TenCate Cetex® TC910 Nylon 6, que estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Constantes de engenharia da lâmina para o compósito TenCate Cetex® TC910 Nylon 6

Propriedades da Fibra	
V_f	0,49
E_f	220 GPa
G_f	110 GPa
ν_f	0,01
Propriedades da Matriz	
V_m	0,51
E_m	0,90 GPa
G_m	0,40 GPa
ν_m	0,34
Constantes de Engenharia da Lamina	
E_1	120 GPa
$E_2=E_3$	2,0 GPa
$G_{12}=G_{31}$	0,81 GPa
$\nu_{12}=\nu_{13}$	0,17
ν_{23}	0,51
G_{23}	0,61 GPa

3.2.4 Caracterização da interface pré-impregnados de fibra contínua de matriz termoplástica com o termoplástico de sobre-injecção seleccionados a diferentes condições de processamento (sobre-injecção)

Uma vez que a nova solução do braço de suspensão envolve mais do que um material e processo, factores como a interface entre os mesmos são determinantes para o sucesso do componente em utilização. Assim, foi proposta a realização de um plano de ensaios baseado no método de Taguchi, com vista à identificação das variáveis de processamento (sobre-injecção) com maior impacto nas características da interface.

Sem recurso ao método de Taguchi, seria necessário realizar ensaios para satisfazer o número total de combinações possíveis entre os diversos parâmetros de processamento (pressão, temperatura, tempo de arrefecimento, entre outros), considerando também os vários níveis (0, 1, 2, ...) que esses podem apresentar. Por exemplo, quatro parâmetros com três níveis requeriam 81 experiências, para o número total de combinações possíveis. O que a metodologia Taguchi faz é a avaliação de todos esses parâmetros e níveis e, através da análise da variância (ANOVA), indica quais são as combinações mais importantes a ter em consideração e quais as experiências que devem ser realizadas, o que reduz consideravelmente o número de experiências necessárias a realizar.

O desenho de experiências utilizado para a produção dos provetes a serem testados ao corte para avaliação da interface é apresentado na Tabela 14 (5 variáveis a 2 níveis). Para a produção destes provetes, utilizou-se o pré-impregnado TenCate Cetex® TC910 Nylon 6 (Anexo A) com a sobre-injecção da Promyde PA6 + 60%GF da Nurel (Anexo E). Estes provetes foram aquecidos no forno de infravermelhos de acordo com o planeamento e colocados no molde para posterior sobre-injecção, Figura 40.

Tabela 14 – Plano de experiências Taguchi para avaliação da interface

Experiência	Temperatura de aquecimento do laminado (°C)	Tempo de Arrefecimento (s)	Velocidade de Injecção (mm/s)	2ª Pressão (bar)	Temperatura do molde (°C)
1	180	10	60	50	40
2	180	10	200	250	80
3	180	30	60	250	80
4	180	30	200	50	40
5	220	10	60	50	80
6	220	10	200	250	40
7	220	30	60	250	40
8	220	30	200	50	80

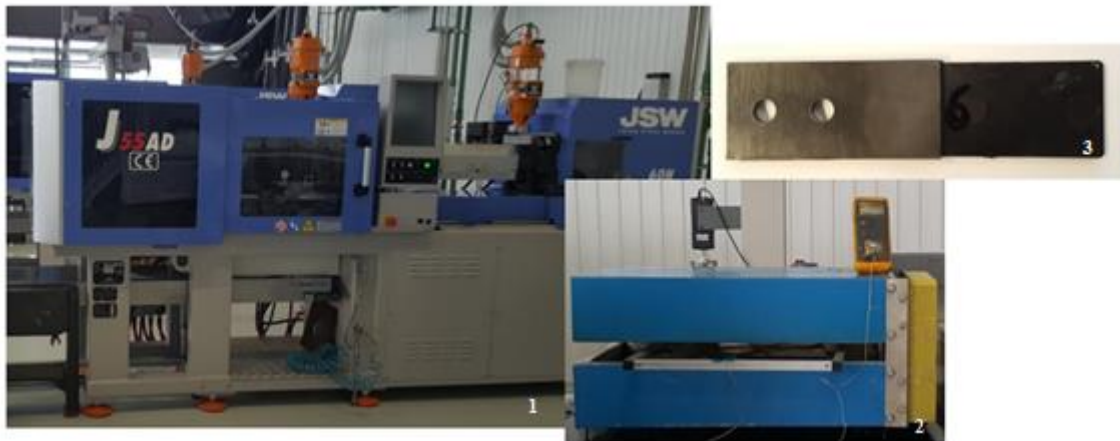


Figura 40 – 1- Máquina de injeção; 2 - Forno de aquecimento do laminado compósito; 3 - Provete resultante

Uma vez obtidos os provetes de cada uma das diferentes combinações de processamento da sobre-injeção, realizaram-se ensaios de corte (zona de interface, 15 x 25 mm) a cada ligação, de modo a identificar qual a combinação mais resistente.

Os provetes, apresentados na Figura 41, foram ensaiados numa máquina de ensaios INSTRON 42080, com uma célula de carga de 100 kN, a uma velocidade de 1 mm/min (Figura 42).

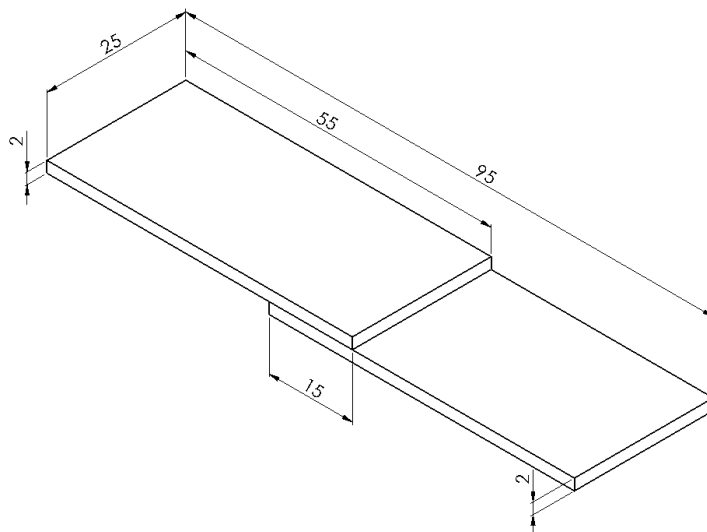


Figura 41 - Dimensões da junta adesiva de cada provete (dimensões em mm)

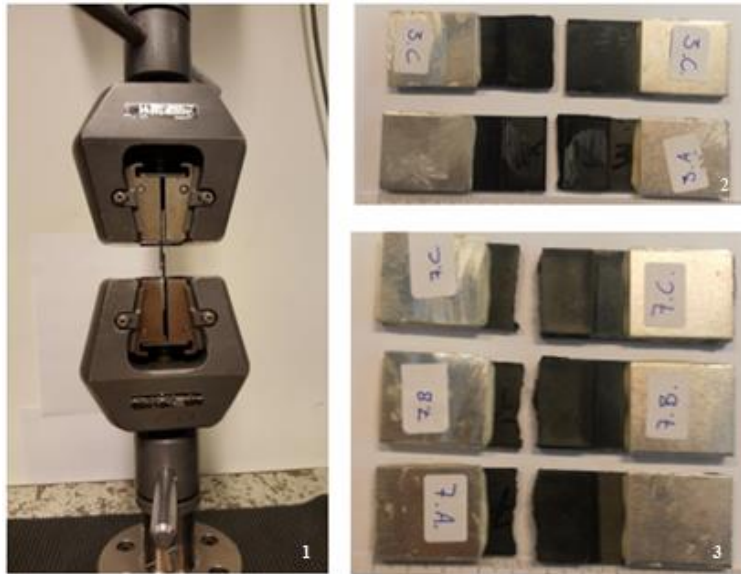


Figura 42 – 1 – Setup dos ensaios de corte; 2 – Resultados da ruptura dos provetes nas juntas (experiência 3); 3 – Resultados da ruptura dos provetes nos substractos (experiência 7)

A Figura 43 e a Tabela 15 mostram os valores das tensões médias de rotura ao corte obtidas para cada combinação de parâmetros de processamento. É de notar que foram realizados cinco ensaios para cada combinação de parâmetros e que os valores abaixo indicados resultam da média dos resultados obtidos.

Equação da tensão de corte:

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (22)$$

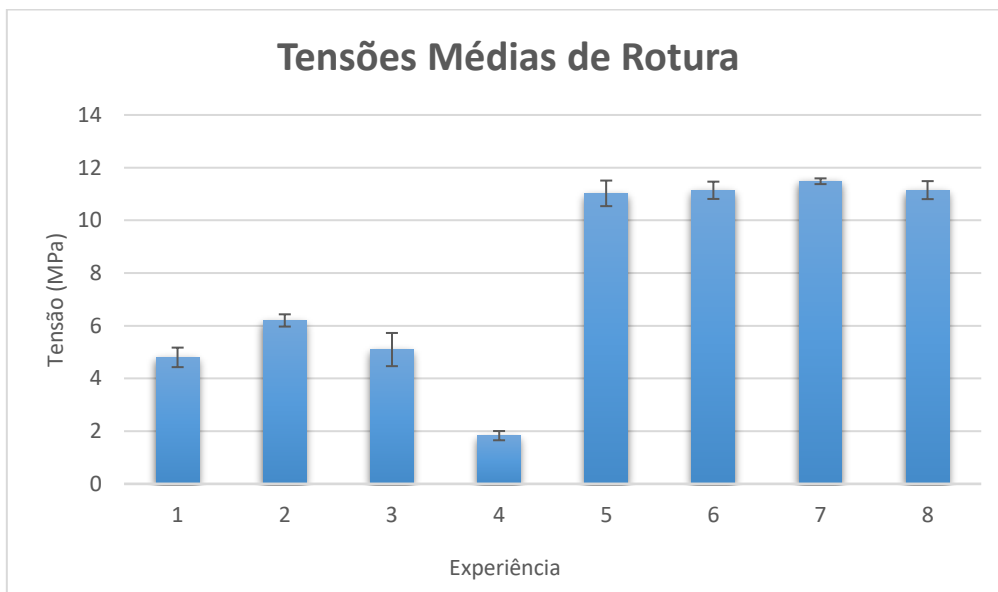


Figura 43 - Tensões máximas de corte de cada combinação de parâmetros de processamento

Tabela 15 - Tensões máximas de corte de cada combinação de parâmetros de processamento

Experiência	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_{\text{máx.}}$ (MPa)	4,800	6,202	5,097	1,830	11,025	11,141	11,485	11,147
Desvio Padrão	0,370	0,232	0,630	0,175	0,485	0,328	0,109	0,342

Com base nestes resultados, é possível afirmar que:

- Os provetes das experiências 1, 2, 3 e 4 (temperatura de compósito de 180°C), cederam pela interface;
- Os provetes das experiências 5, 6, 7 e 8 (temperatura de compósito de 220°C), cederam pelo substrato;
- O parâmetro temperatura do compósito é seguramente o factor predominante: maior temperatura do compósito, proporciona maior resistência da interface;
- Os resultados das experiências 1, 2, 3 e 4 indicam que os parâmetros de 2ª pressão e temperatura do molde têm influência nos resultados, ou seja, uma maior 2ª pressão e temperatura de molde (experiência 2 e 3) providenciam uma resistência ao corte da interface superior;
- O desvio padrão das experiências é relativamente baixo, inferior a 10% do valor médio, o que representa umas tensões máximas de corte muito próximas da média de cada combinação de parâmetros.

3.3 Desenvolvimento do braço de suspensão em materiais compósitos de matriz termoplástica

3.3.1 Levantamento de forma e composição química do braço de suspensão em aço

Como ponto de partida para o desenvolvimento do braço de suspensão em compósito, tornou-se imperativo fazer o levantamento da forma do componente de referência, bem como efectuar uma análise química do seu material (aço). A Figura 44 e a Tabela 16 apresentam os resultados obtidos.



Figura 44 – Levantamento de forma do braço de suspensão de referência (Nissan Leaf) (Aço)

Tabela 16 - Composição química do braço de suspensão de referência

Refª da Amostra	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	V
	0,09	0,13	1,40	0,02	<0,01	0,02	<0,01	0,02	0,03	0,01	0,002	0,002
Braço Suspensão	W	Pb	Sn	As	Ca	B	Fe					
	<0,002	<0,01	0,001	<0,01	<0,005	0,001	98,2					

Com base na análise química e após realizada uma pesquisa aprofundada define-se que se trata de um aço que possui uma tensão de cedência compreendida no intervalo dos 650 aos 750 MPa. Acrescenta-se que o peso total do componente em aço é de 2 kg e que a sua ligação ao sistema de suspensão é assegurada por dois sinoblocos e uma rótula, como atesta a Figura 45.



Figura 45 – 1- Braço de suspensão MacPherson com as cotas de atravancamento (mm); 2 - Sinoblocos

Assim, para o desenvolvimento do novo braço de suspensão em material compósito, serão mantidas as cotas de atravancamento identificadas, bem como os pontos de ligação ao restante sistema (sinoblocos e rótula).

3.3.2 Modelação numérica e determinação do coeficiente de segurança

Para a simulação estrutural do componente, com recurso ao *software* Abaqus®, foram propostas quatro condições de carga, listadas anteriormente no ponto 3.1. Para além das cargas estáticas definidas, foi necessário identificar e definir as condições fronteira do sistema.

As condições fronteiras estabelecidas pelo consórcio são:

- Encastramento no topo da mola, que se encontra em contacto com o braço de suspensão através da rótula;
- Ligação entre a rótula e a carroçaria do automóvel, através de um *Link*;
- Atribuído o estado de corpo rígido à rótula, sendo esta assim impossibilitada de se deformar e efectuar movimentos em qualquer um dos sentidos;
- Definido o topo da rótula como o ponto de aplicação das forças calculadas;
- Encastramento no topo e na base de cada sinobloco, devido ao contacto com a carroçaria do automóvel.

Estas condições são ilustradas na Figura 46.

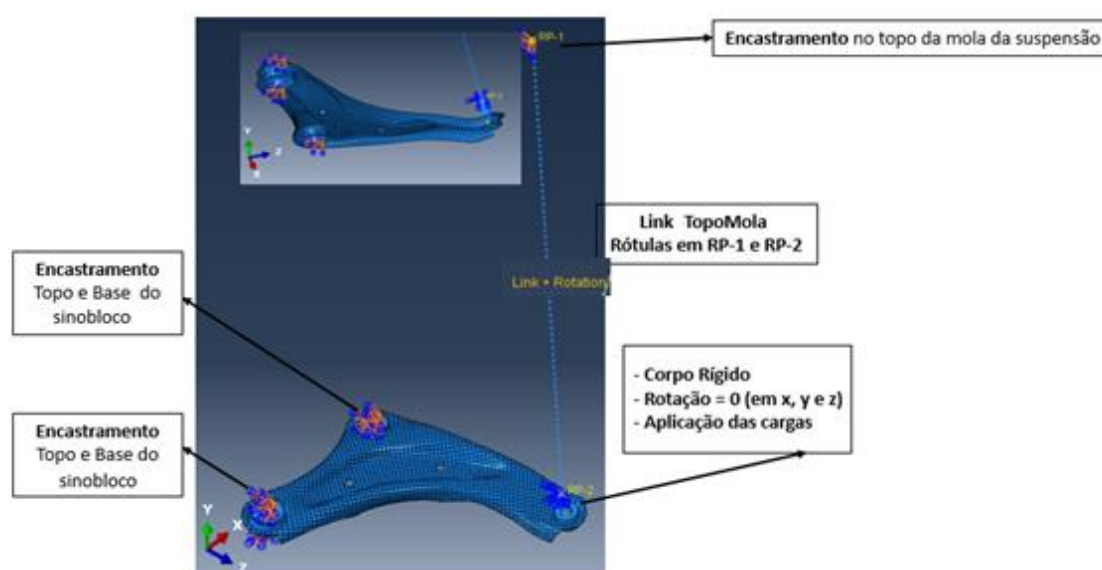


Figura 46 - Condições de fronteira para a simulação do braço de suspensão

Considerando-se que o aço utilizado no braço de referência apresenta uma tensão de cedência de 650 MPa, realizou-se uma validação do cálculo das forças para cada situação, efectuados anteriormente, o que permitiu aferir sobre os valores de coeficientes de segurança aplicados (Tabela 17). As figuras seguintes ilustram os diferentes casos de solicitação (travagem, aceleração, curva tracção e curva compressão) e os resultados obtidos.

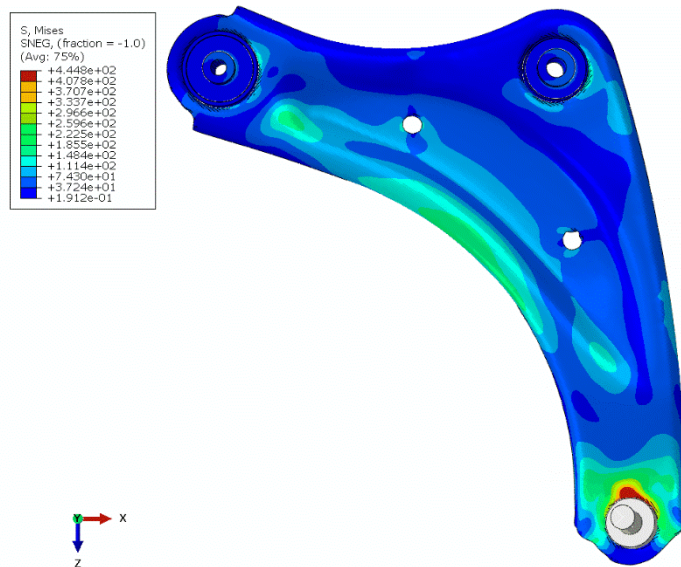


Figura 47 – Diagrama de tensões equivalentes de von Mises (Pa) do braço de suspensão (aço) em situação de travagem

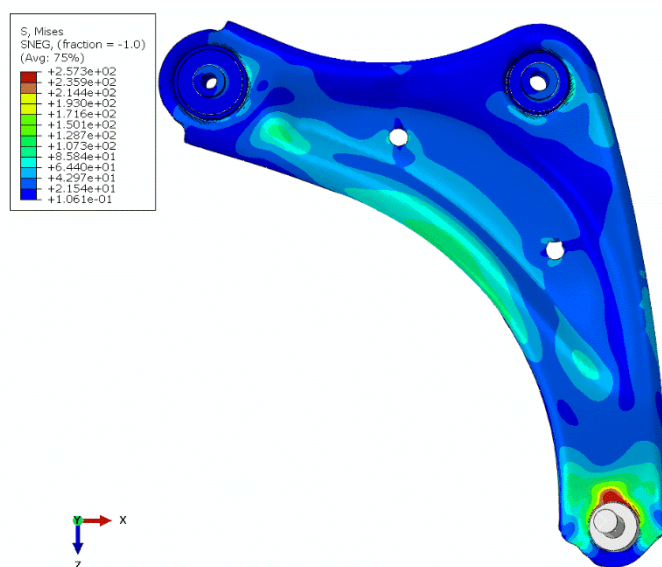


Figura 48 – Diagrama de tensões equivalentes de von Mises (Pa) do braço de suspensão (aço) em situação de aceleração

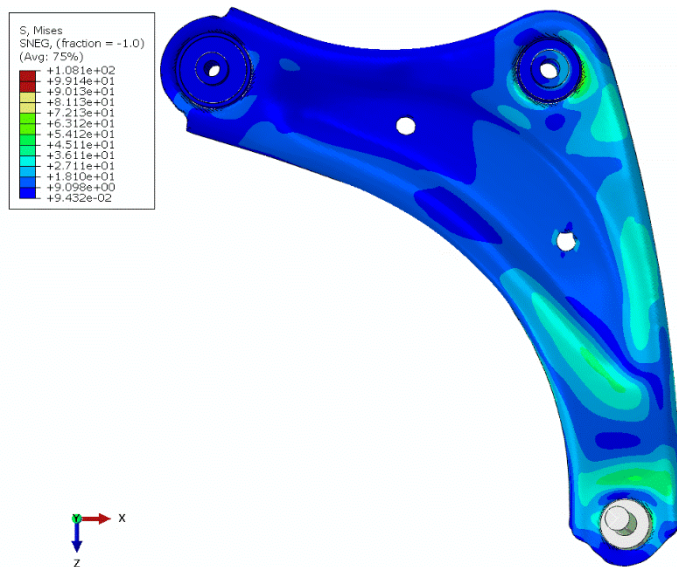


Figura 49 – Diagrama de tensões equivalentes de von Mises (Pa) do braço de suspensão (aço) em situação de curva (Tracção)

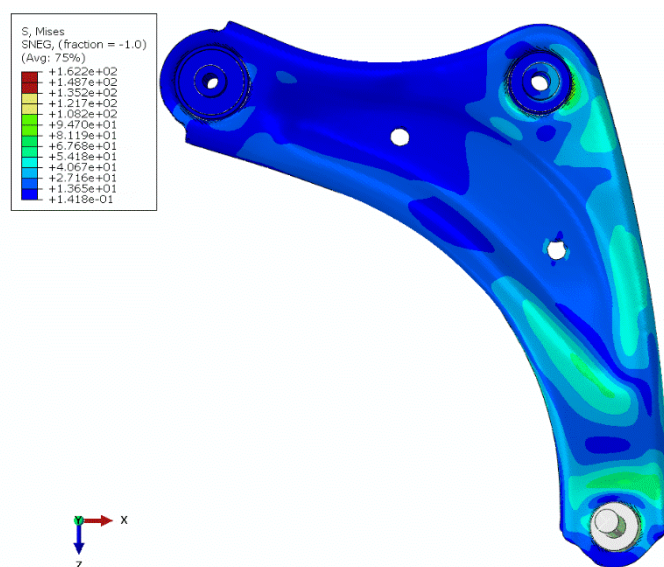






Figura 50 – Diagrama de tensões equivalentes de von Mises (Pa) do braço de suspensão (aço) em situação de curva (Compressão)

A Tabela 17 sumariza os resultados obtidos em cada uma das situações a que o braço de suspensão possa vir a ser solicitado, inclusive os respectivos coeficientes de segurança.

Tabela 17 - Resultados das simulações do braço de suspensão em aço

Situação de Carga	σ_{ced} (MPa)	Força no Braço (N)	Tensão Máxima (MPa)	Coefficiente Segurança	Força total (CS 1,2) (N)
<p>Travagem</p> 	>650	7 700	444,8	1,47	9 240
<p>Aceleração</p> 	>650	4 480	257,3	2,52	5 376
<p>Curva (Tração)</p> 	>650	4 070	108,1	5,70	4 884
<p>Curva (Compressão)</p> 	>650	6 095	162,2	3,80	7 314

Após a leitura dos dados obtidos pelas simulações do braço de referência, conclui-se que a condição mais crítica se trata da travagem, apresentando uma força de 9240 N e um coeficiente de segurança de 1,47, no entanto, o consórcio decidiu optar por um coeficiente de segurança de 1,2 para o dimensionamento da peça, em todas as condições de carga, para um desenvolvimento do produto mais preventivo.

3.3.3 Modelação CAD

A modelação das várias geometrias do braço de suspensão realizou-se através do *software* SolidWorks® da Dassault Systemès.

Como referido anteriormente, as cotas de atravancamento, os pontos de ligação e o sistema de ligação (sinoblocos + rótula da roda) foram mantidas relativamente ao braço de suspensão em aço. No entanto, foi necessário adaptar a geometria exterior dos sinoblocos e da rótula ao processo de injeção, uma vez que estes, na fase de produção do braço de suspensão, serão introduzidos no molde de injeção e posteriormente sobre-injectados. Esta estratégia evita operações adicionais de inserção destes componentes, como acontece na produção de braços de suspensão em aço.

A Figura 51 ilustra os conceitos dos sinoblocos e da rótula da roda desenvolvidos e utilizados nas análises estruturais (CAE) do braço de suspensão.

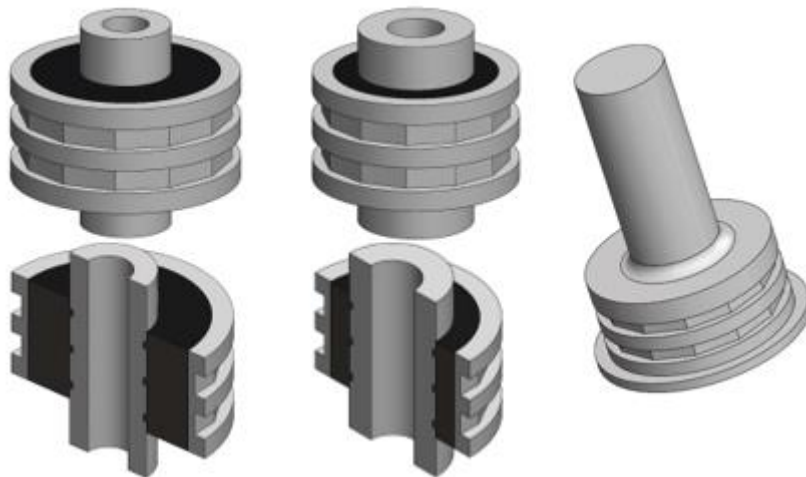


Figura 51 - Sinoblocos e rótula da roda

A modelação CAD do braço de suspensão iniciou-se com base num conceito em que a geometria do braço apresentava uma estrutura base (alma do corpo) em forma de “U” e limitada pelas cotas de atravancamento do componente original, a qual foi posteriormente substituída por uma estrutura em forma de “I”, ambas referenciadas mais à frente.

A Figura 52 e a Figura 53 ilustram a versão final do componente que inclui a integração de todos os elementos metálicos via processo de injeção e uma estrutura do corpo do braço de suspensão em forma de “I”. Em termos de materiais, esta solução inclui uma base em compósito unidireccional estampado e uma série de reforços estruturais sob a forma de *ribs* em termoplástico injectado.

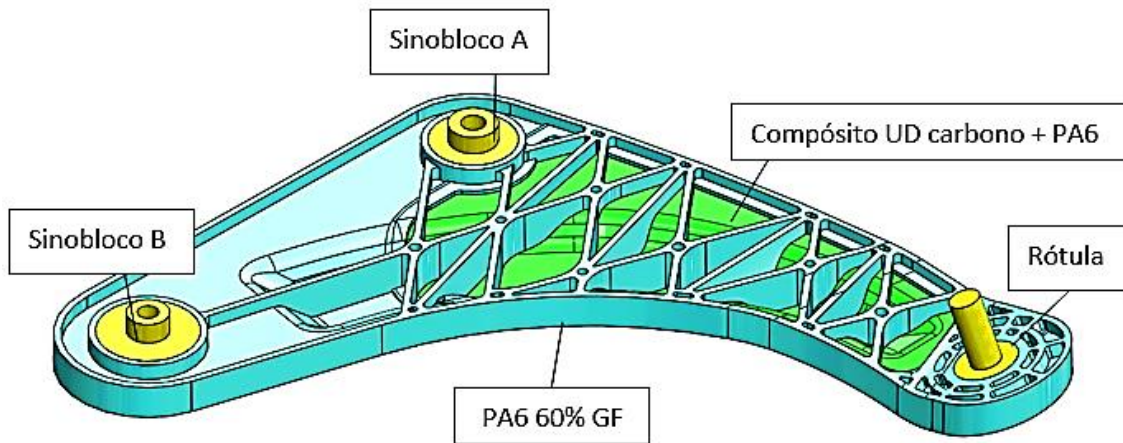


Figura 52 - Solução construtiva e representação esquemática da versão final do braço de suspensão em compósito

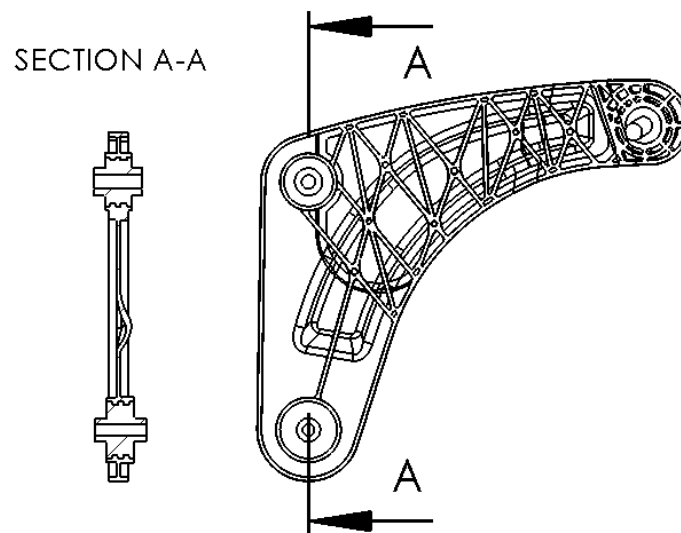


Figura 53 – Ilustração do conceito do braço de suspensão com os sinoblocos e a rótula da roda

No tópico seguinte será detalhado o processo iterativo das mais relevantes alterações efectuadas na geometria do compósito estampado e das *ribs*.

3.3.4 Análise CAE para as condições de carga estabelecidas (processo iterativo)

Com base nos resultados correspondentes ao braço de suspensão de referência em aço, e tendo como ponto de partida o conceito seleccionado e as cotas de atravancamento, foi possível dar corpo a dois modelos CAD de base, seguindo-se as simulações estruturais. A Figura 54 sintetiza as diversas alterações e simulações realizadas ao longo do desenvolvimento do braço de suspensão.

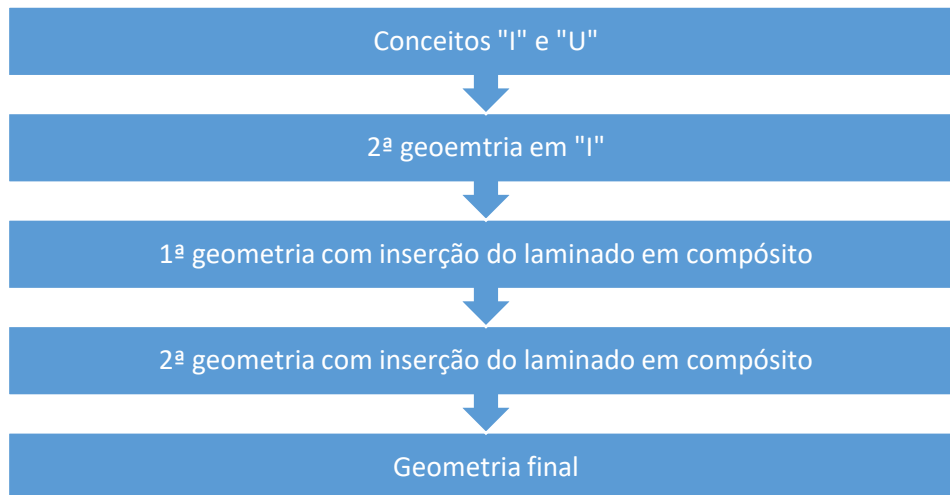


Figura 54 – Fluxograma das simulações estruturais

3.3.4.1 Simulação dos conceitos originais (forma "I" e forma "U")

Nestas primeiras simulações considerou-se uma espessura de peça de 4 mm em PA6 reforçada com fibra de vidro curta, uma com 35% e outra com 60%, fornecidas pela BASF, com uma tensão de cedência de 112 MPa e 170 MPa respectivamente (Tabela 18), para as diferentes geometrias em "I" e em "U", representadas na Figura 55.

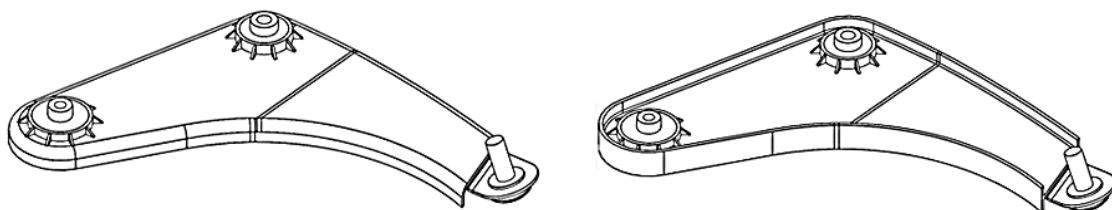


Figura 55 - Geometria em "U" (esquerda) e geometria em "I" (direita)

Tabela 18 - Propriedades mecânicas da PA6 com 35% ou 60% de fibra de vidro

PA6 + 35% GF (BASF)	PA6 + 60% GF (BASF)
$\sigma_{ced} = 112 \text{ MPa}$	$\sigma_{ced} = 170 \text{ MPa}$
$E = 6\,170 \text{ MPa}$	$E = 14\,200 \text{ MPa}$
$\nu = 0,35$	$\nu = 0,35$

Esta abordagem resulta da necessidade de optimização do peso e custo da peça. Com efeito, os resultados aqui obtidos serão indicadores de onde a fibra de carbono contínua é necessária, em que direcções e, iterativamente, em que quantidades. O objectivo é minimizar a quantidade de pré-impregnado a utilizar, o que permite maximizar o potencial do termoplástico reforçado com fibras curtas, e, portanto, a injeção.

É possível observar na Tabela 19 os resultados das simulações para cada condição de carga (travagem, aceleração, curva tracção e curva compressão), tanto para cada material, como para cada geometria da peça, tendo sempre como referência os valores obtidos nas simulações do braço de suspensão em aço. Os resultados com mais destaque são os que permitem comparar os conceitos com diferentes geometrias, mas com o mesmo tipo de material.

De acordo com a Tabela 19, é possível aferir que:

- Uma geometria do corpo do braço de suspensão em “I” melhora a sua resposta às diversas cargas aplicadas, tanto para valores de tensão máximas como para valores de deslocamentos;
- A utilização de uma poliamida reforçada com 60% de fibra de vidro, em detrimento da poliamida reforçada com 35% de fibra de vidro, para a mesma geometria (em “U”) reduz o deslocamento máximo, no entanto, incrementa ligeiramente a tensão máxima obtida;
- Em nenhuma das combinações geometria/material os resultados são satisfatórios para todas as condições de carga;
- A condição de carga mais crítica é a da travagem;
- A zona de tensão crítica encontra-se, em todos os casos, na ligação do corpo com o inserto da rótula.

Tabela 19 - Resultados das simulações das diferentes condições de carga (com CS de 1,2), para as diferentes geometrias e materiais

Condição	Carga (N)	CS	Material e geometria	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Deslocamento máximo (mm)
Travagem	9 240	1,2	Aço	531,1	1,097
			PA6+35%GF em U	480,8	4,75
			PA6+60%GF em U	483,7	2,09
			PA6+35%GF em I	371,9	3,74
Aceleração	5 376	1,2	Aço	309,2	0,64
			PA6+35%GF em U	279,8	2,76
			PA6+60%GF em U	281,5	1,21
			PA6+35%GF em I	216,4	2,17

			Aço	136,5	0,17
Tração	4 884	1,2	PA6+35%GF em U	99,7	0,93
			PA6+60%GF em U	100,4	0,41
			PA6+35%GF em I	98,6	0,69
			Aço	204,4	0,25
Compressão	7 314	1,2	PA6+35%GF em U	149,7	1,397
			PA6+60%GF em U	150,3	0,62
			PA6+35%GF em I	147,8	1,03

3.3.4.2 Simulação da 2ª geometria em “I”

Os resultados anteriores deram origem a uma nova versão geométrica do componente, em que a rótula do braço de suspensão, à semelhança dos sinoblocos, é agora integrada via processo de sobre-injecção, uma vez que a zona crítica se situa na mesma.

A geometria em “I” é mantida, sendo nesta fase dada preferência ao material PA6 35%GF, sendo esta mais fácil de processar, e apresentar menor custo da matéria-prima. As figuras seguintes, Figura 56, Figura 57, Figura 58 e Figura 59, juntamente com a Tabela 20, apresentam os resultados obtidos para esta nova geometria.

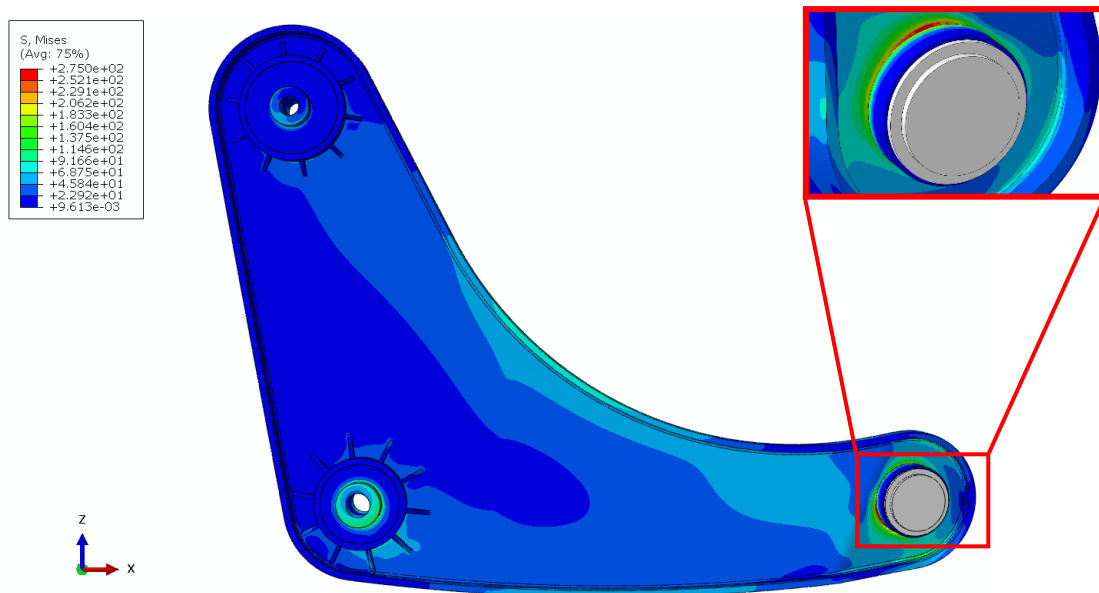


Figura 56 - Diagrama de tensões equivalentes de von Mises (Pa) do braço de suspensão em PA6 + 35%GF, para a condição de travagem (vista inferior)

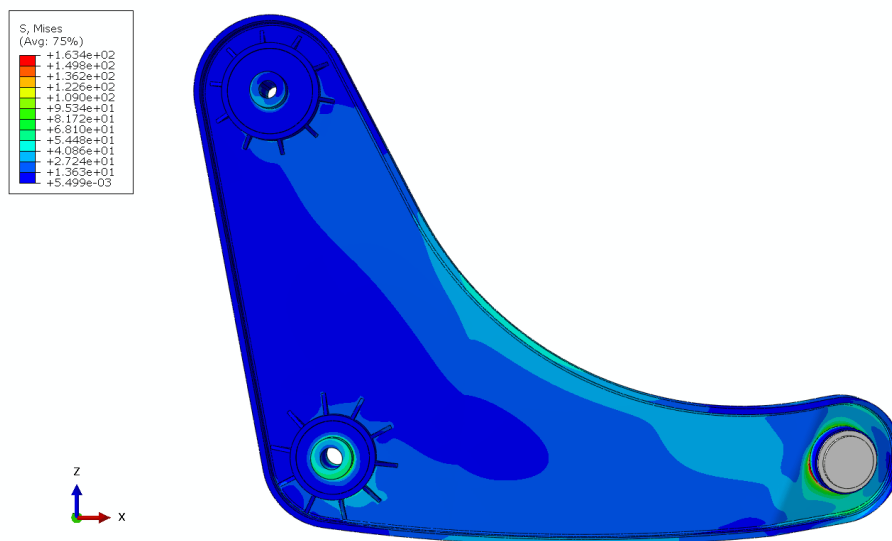


Figura 57 - Diagrama de tensões equivalentes de von Mises (Pa) do braço de suspensão em PA6 + 35%GF, para a condição de aceleração (vista inferior)

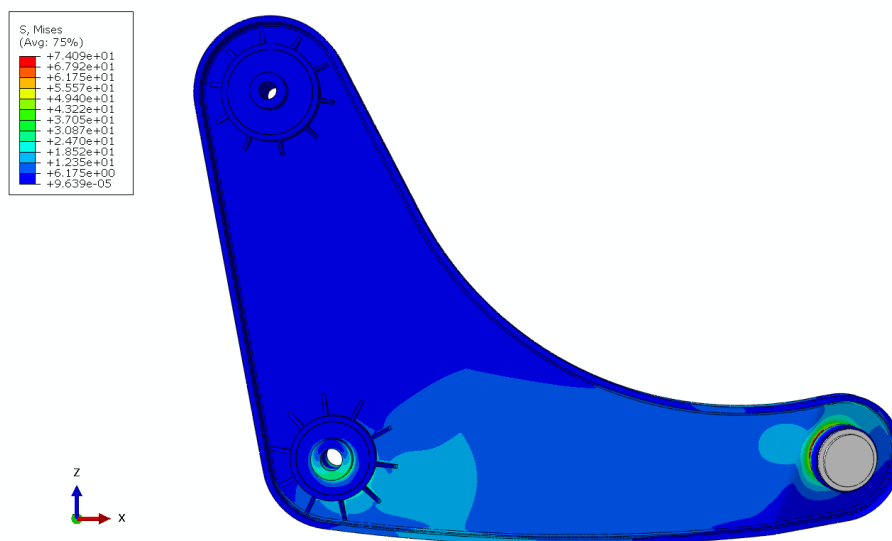


Figura 58 - Diagrama de tensões equivalentes de von Mises (Pa) do braço de suspensão em PA6 + 35%GF, para a condição de tração (vista inferior)

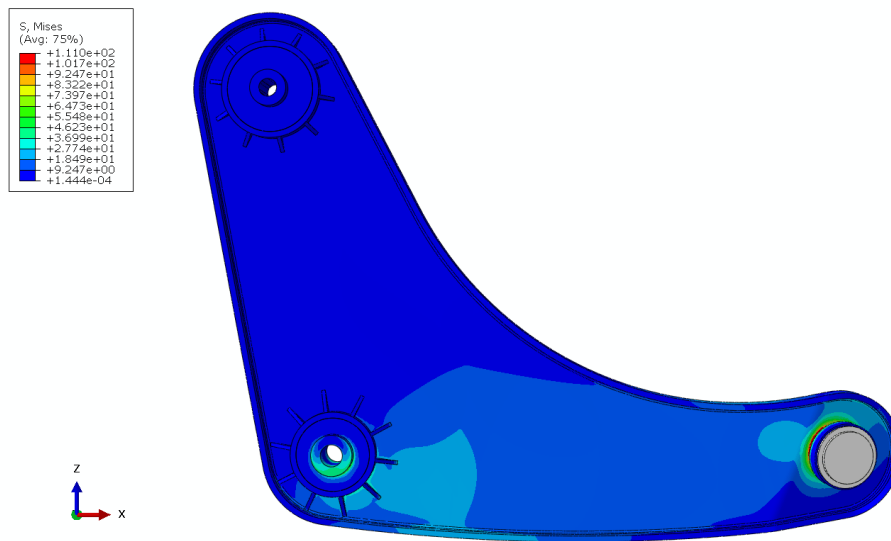


Figura 59 - Diagrama de tensões equivalentes de von Mises (Pa) do braço de suspensão em PA6 + 35%GF, para a condição de compressão (vista inferior)

Tabela 20 - Resultados obtidos para o braço de suspensão em PA6 + 35%GF, geometria em "I" com sinoblocos e rótula sobre-injectados

Material	σ_{ced} (MPa)	Condição de carga	Carga (N)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Deslocamento máximo (mm)
PA6 + 35%GF	112	Travagem	9 240	275,00	9,34
PA6 + 35%GF		Aceleração	5 376	163,40	5,43
PA6 + 35%GF		Curva Tracção	4 884	74,09	1,24
PA6 + 35%GF		Curva Compressão	7 314	110,00	1,86

Como é possível observar, os valores obtidos, na condição mais crítica, ultrapassam claramente os valores de tensão de cedência do material e, uma vez mais, junto à zona da rótula, apresentando também deslocamentos superiores aos desejados, o que resulta na necessidade de nova iteração.

É também possível observar que a travagem se trata realmente da condição mais crítica, onde a tensão equivalente de von Mises e o deslocamento máximo são significativamente superiores aos dos restantes casos.

3.3.4.3 Simulação da 2ª geometria em “I” com novo material de sobre-injecção

Antes de se iniciar o processo de desenvolvimento iterativo relativamente à geometria do corpo e dos reforços, *ribs*, nas áreas críticas, considerou-se alterar o material de injecção, devido aos motivos referenciados anteriormente. Desta forma, o consórcio tomou a decisão da substituição da PA6 + 35%GF da BASF pela PA6 + 60%GF da Nurel nas condições *dry*.

É possível observar as diferentes propriedades entre os dois materiais na Tabela 21.

Tabela 21 - Propriedades da PA6 reforçada da BASF e da Nurel

Fornecedor	Material	Condição	σ_{rot} (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
BASF	PA6 + 35%GF	<i>Conditioned*</i>	112	6 170	0,35
(Ultramid)	PA6 + 35%GF	<i>Dry**</i>	170	10 000	
Nurel	PA6 + 60%GF	<i>Conditioned</i>	190	17 000	
(Promyde)	PA6 + 60%GF	<i>Dry</i>	240	21 000	

**Conditioned* = de acordo com a norma ISO 1110

**O tratamento do material segundo as condições *drying* são as seguintes:

- Temperatura de desumidificação: 80 °C;
- Tempo de desumidificação: 4-6 horas.

Utilizando o material fornecido pela Nurel, os resultados obtidos nas simulações podem ser observados na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados obtidos para o braço de suspensão em PA6 + 60%GF na geometria em I

Material	σ_{ced} (MPa)	Condição de carga	Carga (N)	$\sigma_{máx}$ (MPa)	Deslocamento máximo (mm)
PA6 + 60%GF	240	Travagem	9 240	274,93	2,85
PA6 + 60%GF		Aceleração	5 376	163,44	1,64
PA6 + 60%GF		Curva Tracção	4 884	74,01	0,38
PA6 + 60%GF		Curva Compressão	7 314	110,96	0,56

Como se pode observar, os valores de tensão máxima para a condição de carga mais crítica, a travagem, continuam a ultrapassar o valor da tensão de cedência do material. Para além disso, obteve-se também uma diminuição no valor de deslocamento do componente, quando comparado com o material anterior, embora ainda superiores aos valores desejados, o que indica a necessidade de reforços estruturais.

As versões seguintes demonstram o desenvolvimento do conceito, passando pela inclusão do pré-impregnado de carbono (fibra contínua) e de reforços estruturais nas zonas identificadas como críticas, e/ou em outras alterações geométricas consideradas relevantes. De notar que as simulações destas novas versões só consideram a condição de carga mais crítica, aplicando o critério de *worst case scenario*, ou seja, a travagem.

3.3.4.4 Simulação da 1ª geometria com inserção do laminado em compósito de matriz termoplástica

Com base nos resultados anteriores, surge uma nova solução que inclui as seguintes alterações (Figura 60):

- Alteração da geometria dos sinoblocos com vista à diminuição de alguma concentração de tensões junto dos mesmos;
- Reforços estruturais, *ribs*, na zona da rótula, que se apresenta como a zona mais crítica;
- Inclusão de um laminado em compósito com fibra de carbono unidireccional estampado, com 3 mm de espessura, e uma “bossa” com vista ao aumento da inércia da peça e, conseqüentemente, a diminuição do deslocamento máximo.

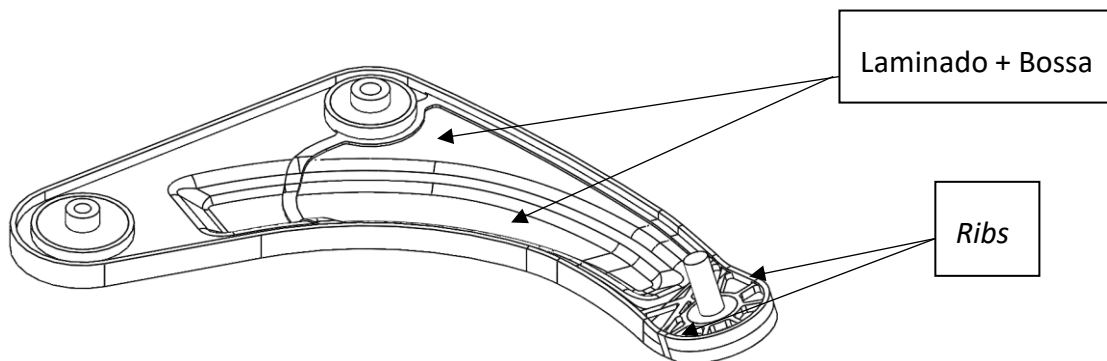


Figura 60 - 1ª geometria com laminado em compósito

Relativamente à inserção do laminado em compósito na nova geometria, a orientação final das camadas e respectivas espessuras encontram-se representadas na Tabela 23 e ilustrada na Figura 61.

Tabela 23 - Caracterização do laminado (CF)

Orientação das camadas	Espessura por camada (mm)	Nº camadas	Espessura total (mm)
(0°/45°/-45°/0°/45°/-45°/0°/45°/-45°/45°/-45°)s	0,136	22	3

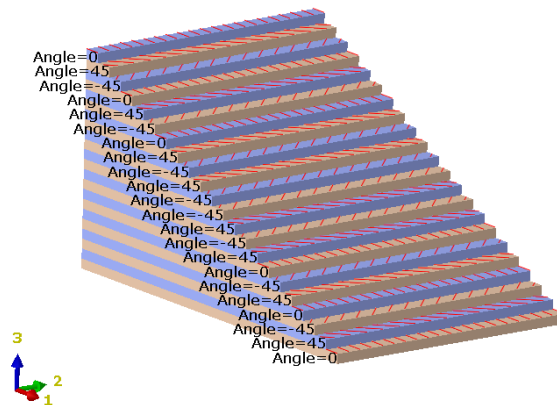


Figura 61 - Orientação de cada camada do laminado em compósito

As figuras seguintes e a Tabela 24 resumam os resultados obtidos com as últimas alterações efectuadas ao componente. De notar que agora não basta o conceito cumprir a componente das tensões, uma vez que, com a inserção do laminado, é necessário que este passe também o critério de falha de Hashin.

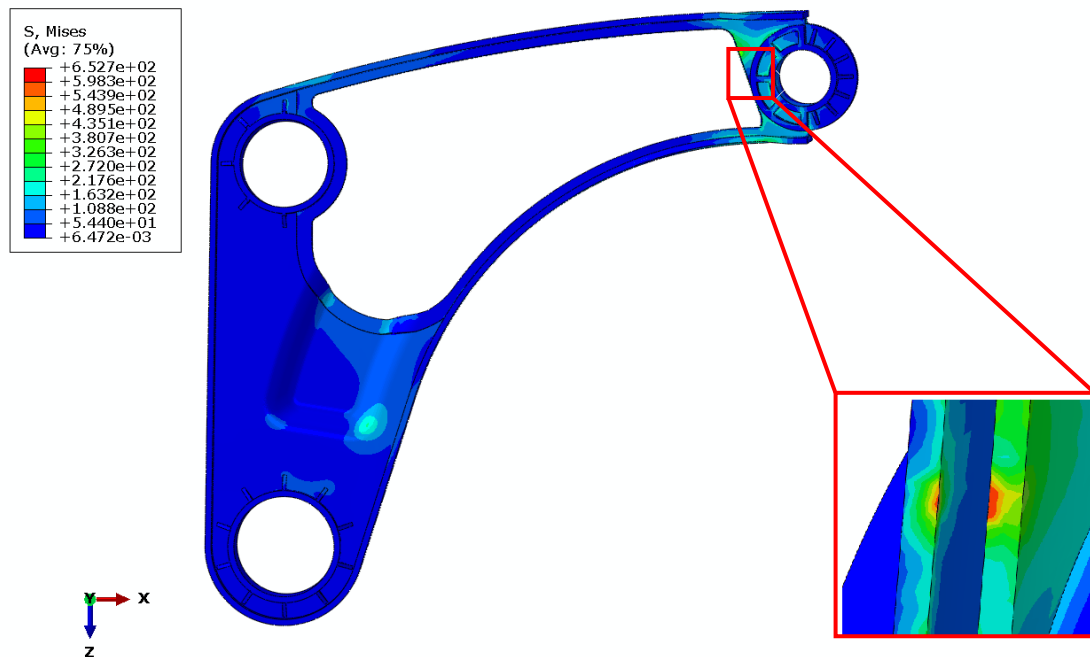


Figura 62 - Diagrama de tensões equivalentes de von Mises (Pa) do braço de suspensão em PA6 + 60%GF, para a condição de travagem

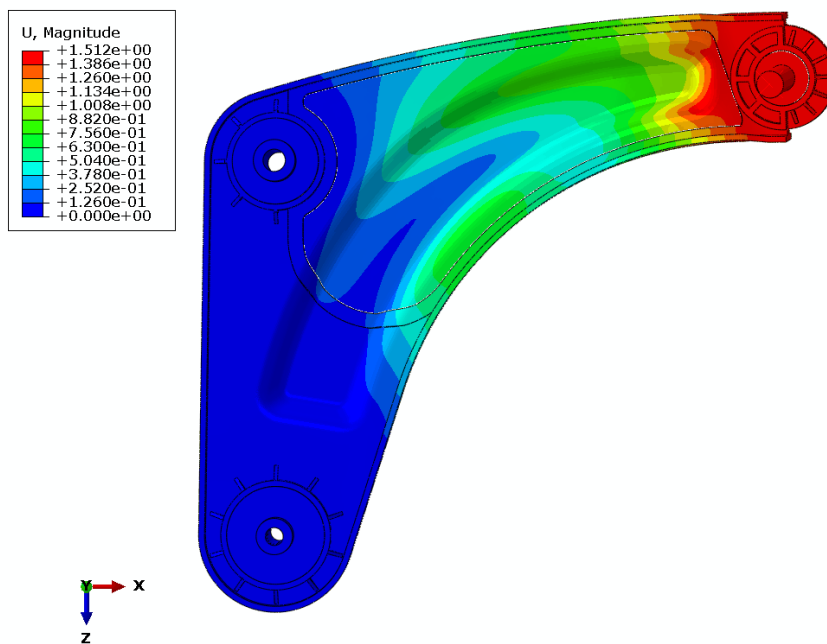


Figura 63 - Diagrama de deslocamentos resultantes (mm) do braço de suspensão em PA6 + 60%GF, para a condição de travagem

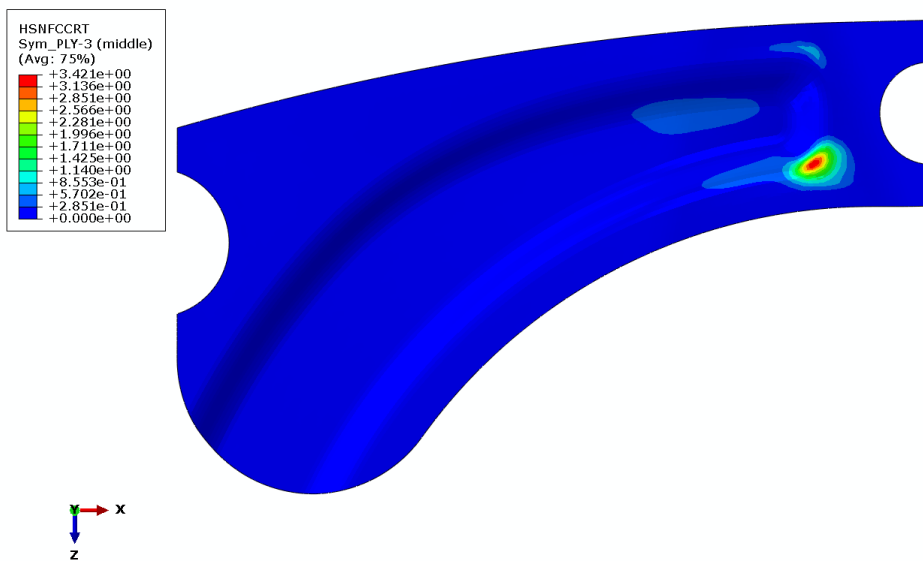


Figura 64 - Critério de Hashin do braço de suspensão em PA6 + 60%GF, para a condição de travagem

Tabela 24 - Resultados da 1ª geometria com inserção do laminado em compósito

σ_{ced} (MPa)	Condição de carga	Carga (N)	$\sigma_{máx}$ (MPa)	Critério de Hashin	Deslocamento máximo (mm)	Peso (kg)
240	Travagem	9 240	652,7	3,14	1,51	0,685

Observando os dados da Tabela 24 é possível afirmar que a inserção do laminado e a presença da bossa, trazem melhorias para a estrutura do braço, através da diminuição do deslocamento máximo. Por outro lado, é possível também observar que as tensões equivalentes de von Mises aumentam consideravelmente, devido ao aumento da rigidez do componente. Acrescenta-se ainda a falha do compósito, em pelo menos uma das suas camadas, já que este apresenta um valor máximo de Hashin muito superior a 1.

Estes resultados demonstram a clara necessidade de uma iteração, baseada em reforços estruturais ao longo do corpo do componente.

3.3.4.5 Simulação da 2ª geometria com inserção do laminado em compósito de matriz termoplástica

A Figura 65 ilustra a 2ª geometria com os respectivos reforços, para a diminuição das tensões causadas pela condição de carga mais crítica, a travagem.

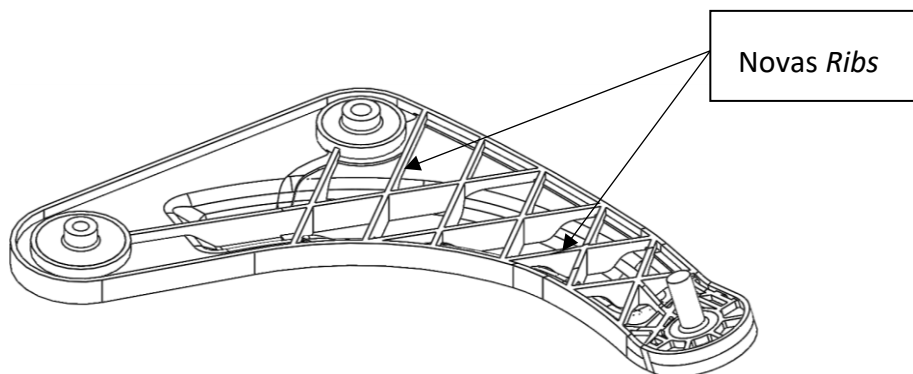


Figura 65 - 2ª geometria com laminado em compósito

Durante este processo de desenvolvimento de CAD/CAE, nesta 2ª geometria, foram realizadas inúmeras iterações intermédias que apresentam variações ao nível de camadas, e orientação das mesmas, do laminado em compósito, da geometria dos reforços na zona da rótula e dos ribs do corpo central e do material utilizado (PA6 + 30%GF vs. PA6 + 60%GF). A Figura 66 sumariza quais as principais variáveis que foram levadas em consideração no desenvolvimento deste novo conceito.



Figura 66 - Principais variáveis consideradas no desenvolvimento do conceito

Os resultados das iterações realizadas nesta 2ª geometria encontram-se sumarizados na Tabela 25. De notar que os resultados a vermelho se tratam das simulações em que a peça não é validada.

Tabela 25 - Resultados das simulações da 2ª geometria com inserção do laminado em compósito

Espessura (mm)	Carga (N)	Modelo	σ_{ced} do material (MPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Deslocamento máximo (mm)	Critério de Hashin
2 (14 camadas)	7 700	Laminado + 30%GF	160 (<i>Dry</i>)	147	2,90	<1
		Laminado + 60%GF	260 (<i>Dry</i>)	170	1,74	<1
	9 240	Laminado + 30%GF	160 (<i>Dry</i>)	176	3,47	<1
		Laminado + 60%GF	260 (<i>Dry</i>)	204	2,09	<1
3 (22 camadas)	7 700	Laminado + 30%GF	160 (<i>Dry</i>)	137	2,62	<1
		Laminado + 60%GF	260 (<i>Dry</i>)	160	1,94	<1
	9 240	Laminado + 30%GF	160 (<i>Dry</i>)	167	3,15	<1
		Laminado + 60%GF	260 (<i>Dry</i>)	193	1,62	<1
4 (30 camadas)	9 240	Laminado + 30%GF	160 (<i>Dry</i>)	163	2,73	<1
		Laminado + 60%GF	260 (<i>Dry</i>)	181	1,71	<1

Dos resultados obtidos, verifica-se que, independentemente do número de camadas de compósito do laminado, nenhuma solução baseada em PA6 + 30%GF é validada para a carga que contempla o coeficiente de segurança (1,2). Por outro lado, todas as soluções que incluem a utilização da PA6 + 60%GF são aprovadas. Conclui-se também que a

optimização da geometria da estrutura sobre-injectada (as *ribs*) é um parâmetro decisivo para a redistribuição e alívio das tensões exercidas, o que se reflecte nos valores de tensão obtidos com esta nova geometria.

Realizou-se também uma simulação para o caso de todo o componente ser constituído por PA6 + 30%GF, com uma espessura de 3 mm. É possível observar os resultados dessa simulação na Tabela 26, onde se pode concluir que esta não passa no critério da tensão instalada, em relação à tensão de cedência do material.

Tabela 26 - Resultados da simulação do braço de suspensão todo em PA6 + 30%GF

Espessura (mm)	Carga (N)	Modelo	σ_{ced} do material (MPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Deslocamento máximo (mm)
3	9 240	Total PA6 + 30%GF	160 (Dry)	193	4,16

3.3.4.6 Simulação da geometria final com laminado em compósito de matriz termoplástica

Com base nos dados da Tabela 25, decidiu-se escolher a geometria que considera um laminado com 2 mm de espessura de compósito (14 camadas), visto que a presença do compósito se reflecte essencialmente na diminuição do deslocamento do braço de suspensão, e também para viabilidade económica da peça.

Sobre esta versão, foram ainda realizadas algumas alterações exclusivamente relacionadas com o desenvolvimento focado no processo de injeção, nomeadamente ao nível da inclusão de ângulos de saída, da definição do plano de partição e da definição dos movimentos necessários.

A Figura 67 ilustra a geometria final que o braço de suspensão irá apresentar, ao sair dos moldes de injeção.

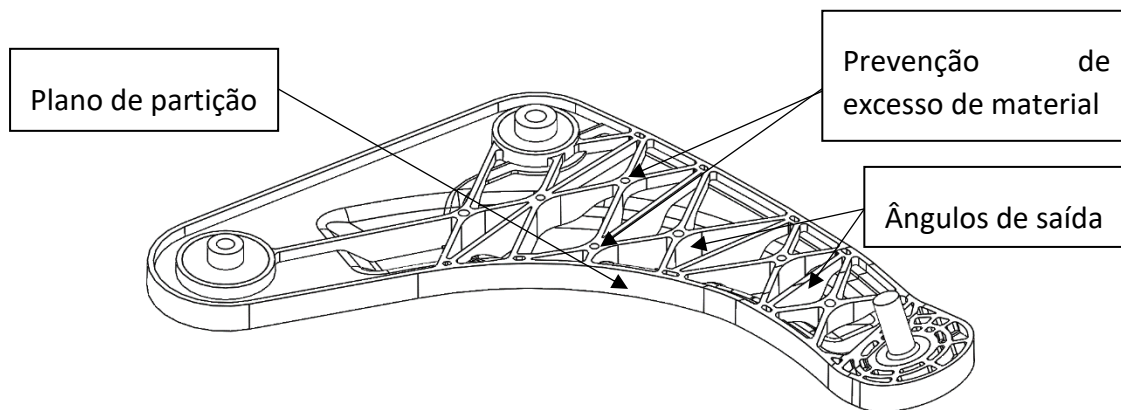


Figura 67 - Geometria final do braço de suspensão em material compósito de matriz termoplástica

Uma vez obtida a geometria final que o braço de suspensão irá possuir, foram realizadas simulações para cada uma das condições de carga. Na Tabela 27 é possível observar as características das malhas criadas para cada componente do braço de suspensão.

As figuras seguintes ilustram as simulações realizadas, e a Tabela 28 sumariza os resultados obtidos.

Tabela 27 - Características das malhas de cada componente

Componente	Tipo de elemento	Forma do elemento	Técnica	Nº elementos
Laminado	S4R	QUAD DOMINATED	Free	11 873
Sinoblocos	C3D10	TET	Free	128 544
PA6 injectado	C3D10	TET	Free	722 316

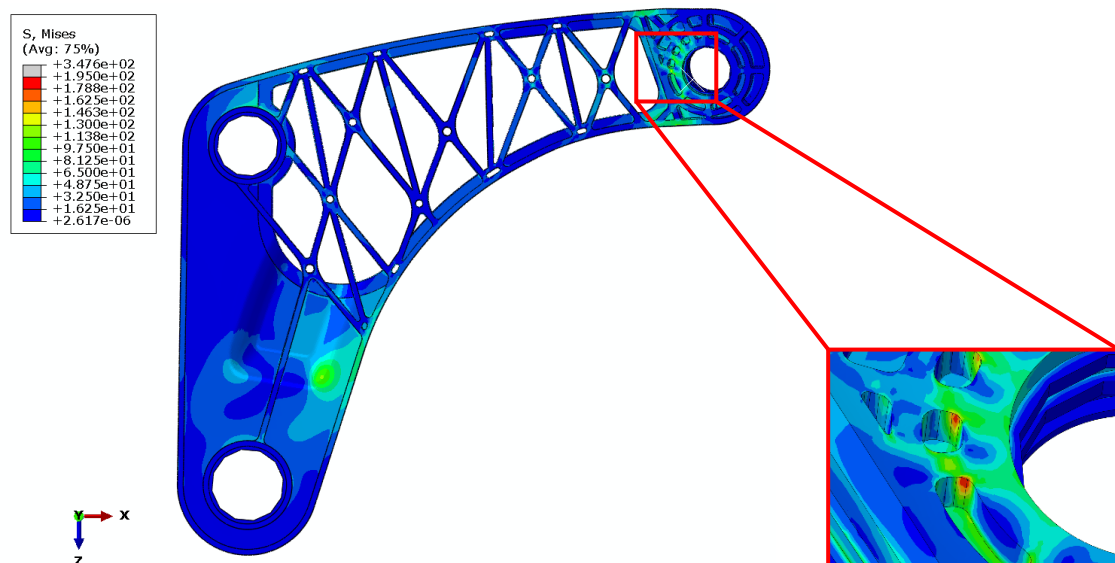


Figura 68 - Diagrama de tensões equivalentes de von Mises (Pa) do braço de suspensão com a geometria final em PA6 + 60%GF na condição de travagem

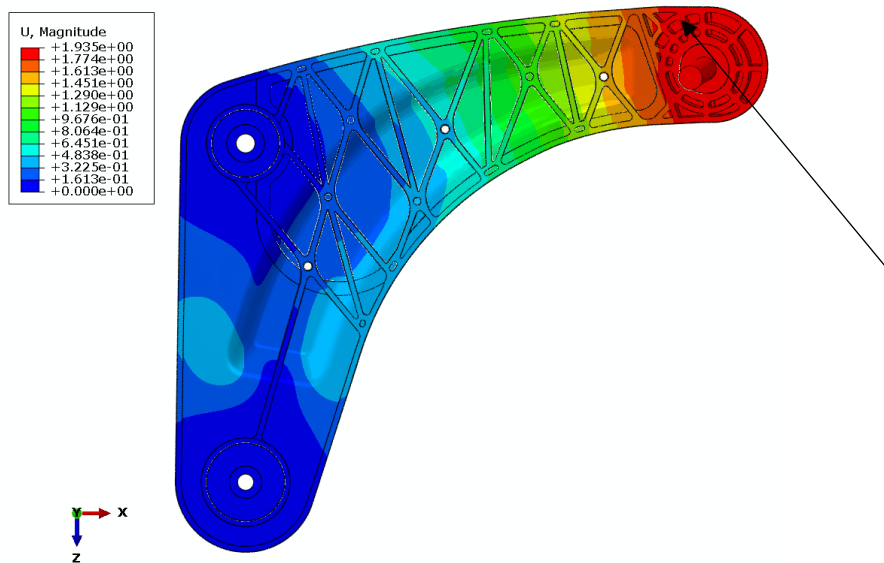


Figura 69 - Diagrama de deslocamentos resultantes (mm) do braço de suspensão com a geometria final em PA6 + 60%GF, na condição de travagem

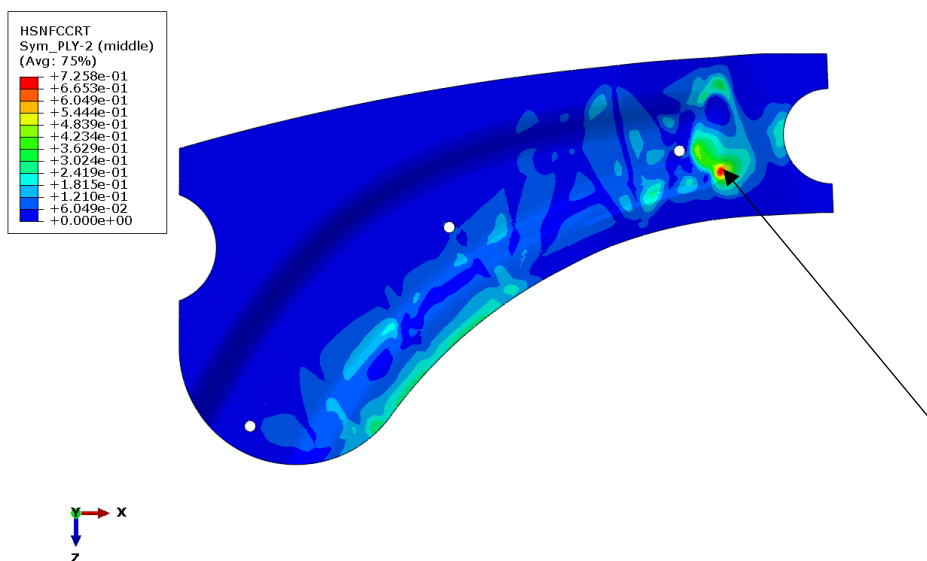


Figura 70 - Critério de Hashin no laminado em compósito da geometria final em PA6 + 60%GF, na condição de travagem

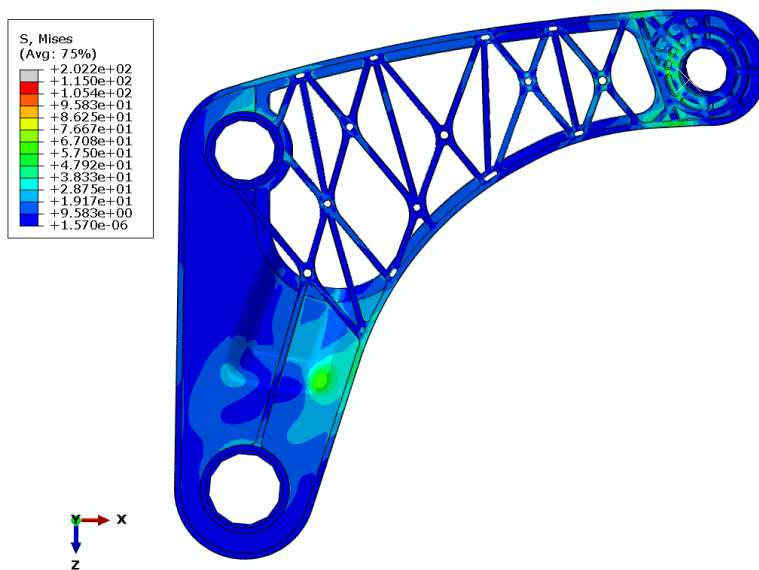


Figura 71 - Diagrama de tensões equivalentes de von Mises (Pa) do braço de suspensão com a geometria final em PA6 + 60%GF, na condição de aceleração

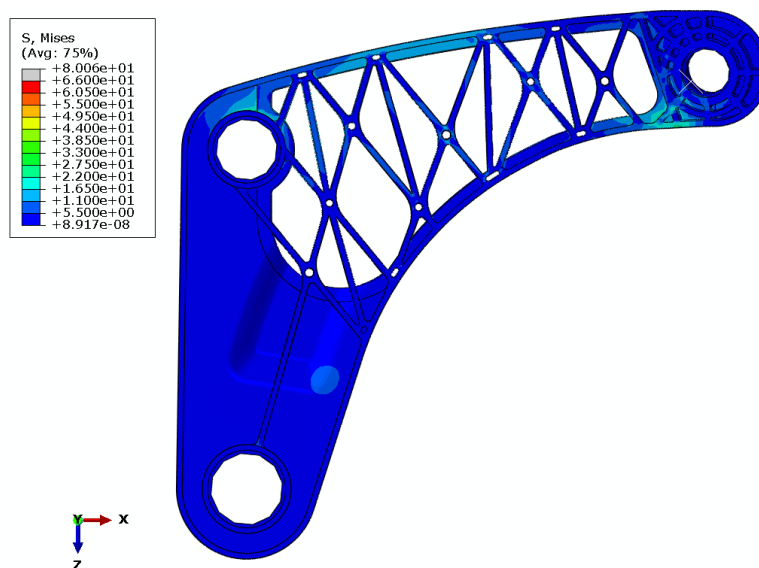


Figura 72 - Diagrama de tensões equivalentes de von Mises (Pa) do braço de suspensão com a geometria final em PA6 + 60%GF, na condição de tracção

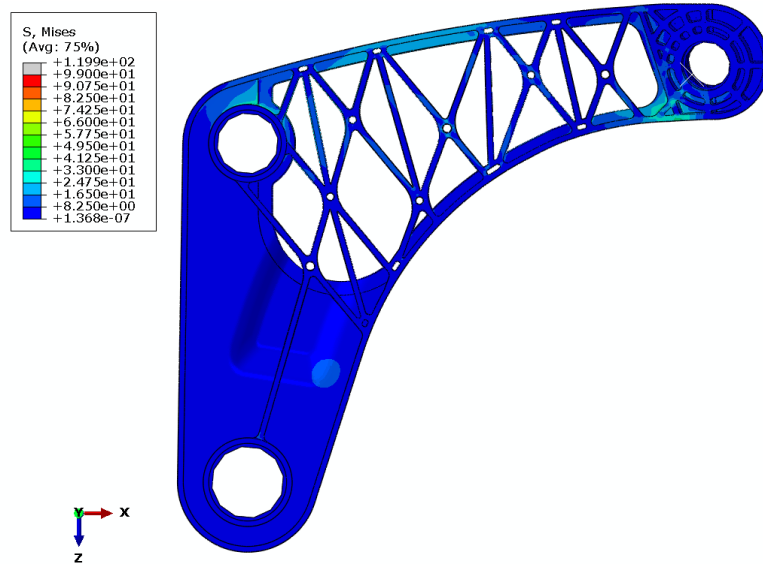


Figura 73 - Diagrama de tensões equivalentes de von Mises (Pa) do braço de suspensão com a geometria final em PA6 + 60%GF, na condição de compressão

Tabela 28 - Resultados da simulação da geometria final do braço de suspensão em compósito

Material	σ_{ced} (MPa)	Condição de carga	Carga (N)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Deslocamento máximo (mm)	Peso (kg)
PA6 + 60%GF	240	Travagem	9 240	195	1,9	1,115
		Aceleração	5 376	115	1,1	
		Curva Tracção	4 884	66	0,3	
		Curva Compressão	7 314	99	0,4	

Como é possível observar na Tabela 28, o modelo otimizado para o processo de injeção valida todos os critérios: tensão máxima instalada, deslocamento máximo do componente e critério de falha em compósitos de Hashin.

Seguem-se as fases da simulação dos processos (estampagem a quente do compósito de matriz termoplástica e sobre-injecção). No âmbito desta dissertação será apenas reportado o trabalho ao nível da simulação de estampagem, já que o da injeção foi realizado por um parceiro do consórcio do projecto (Cadflow). Para o efeito, foi adquirido e utilizado o *software* AniForm.

3.4 Processo de fabrico

3.4.1 Simulação do processo de fabrico (estampagem a quente de materiais de matriz termoplástica)

A simulação dos processos de fabrico é uma fase muito relevante no desenvolvimento do produto. Para o desenvolvimento do braço de suspensão em compósito, foram considerados dois processos, a estampagem a quente de compósito de matriz termoplástica e a sobre-injecção. No âmbito desta dissertação, serão apresentados apenas os resultados referentes à simulação do processo de estampagem a quente de compósitos de matriz termoplástica já que a simulação do processo de injecção ficou a cargo da Cadflow® (empresa do consórcio). Com efeito, o *software* utilizado para a simulação da estampagem a quente de compósitos de matriz termoplástica foi o AniForm®. A simulação dos processos permite prever possíveis problemas de fabrico, antecipar de defeitos nos componentes e retirar alguma informação relevante, auxiliar à construção das ferramentas produtivas.

O AniForm® é um *software* de interface amigável, para o qual é possível importar o desenho CAD da ferramenta de fabrico, seleccionar o tipo de posicionamento do laminado no molde (livre, com sistema de molas ou com cerra-chapa) e adicionar cortes ao laminado para a prevenção de rugas, dobras e/ou outras imperfeições, após a estampagem.

No final de cada simulação, os principais *outputs* que o *software* AniForm® permite obter são:

- Distribuição de tensões;
- Orientação final das fibras;
- Perfil de espessura do componente final;
- Índice de penetração nas ferramentas de molde.

O AniForm® é um *software* relativamente recente, cujo desenvolvimento foi impulsionado pelo sector aeroespacial. Desta forma, ele apresenta uma base de dados bastante reduzida, composta por pré-impregnados de carbono de matrizes de alto desempenho, como é o caso da polieteretercetona (PEEK), da polieterimida (PEI) e do polifenileno (PPS). Assim, o pré-impregnado de carbono com matriz de poliamida 6 seleccionado para o desenvolvimento do braço de suspensão, não consta na lista dos materiais do AniForm®.

Assim, para uma análise de variabilidade do processo em função da matriz do pré-impregnado, foram seleccionados três pré-impregnados unidireccionais de fibra de carbono (mesmo volume de fibra), que diferem apenas na sua matriz.

TenCate Cetex® TC 1000 – trata-se de um compósito de engenharia que apresenta uma matriz de polieterimida (PEI), um termoplástico de engenharia amorfo com boa rigidez e resistência termomecânica.

TenCate Cetex® TC 1100 – trata-se de um compósito de engenharia que apresenta uma matriz de sulfeto de polifenileno (PPS), um termoplástico de engenharia semi-cristalino, com boa resistência química e a altas temperaturas.

TenCate Cetex® TC 1220 – trata-se de um compósito de engenharia que apresenta uma matriz de polieteretercetona (PEEK), um termoplástico de alto desempenho semi-cristalino, com excelente resistência a altas temperaturas e propriedades mecânicas.

A Figura 74 apresenta esquematicamente os diversos passos da simulação do processo de estampagem a quente de compósitos de matriz termoplástica, que consiste em:

1. Posição inicial;
2. Aproximação da ferramenta do molde superior ao laminado em compósito;
3. Aproximação da ferramenta do molde inferior ao laminado em compósito;
4. Início do processo de estampagem;
5. Fim do processo de estampagem.

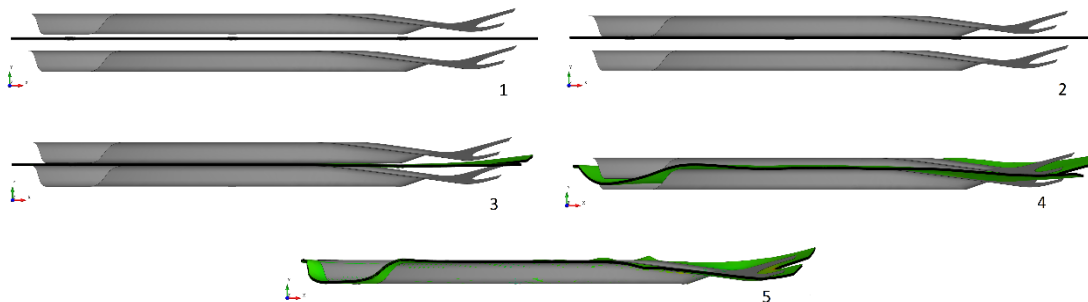


Figura 74 - Simulação do processo de estampagem no *software* AniForm®

Para se dar início às simulações, para além do desenho da ferramenta, é necessário definir-se a dimensão do laminado de base sobre o qual, em função dos resultados, é realizada uma optimização, com vista à eliminação/redução de desperdícios e, consequentemente, dos custos da matéria.

As figuras seguintes ilustram as diversas simulações, nas mesmas condições (incluindo a dimensão do laminado base, com 14 camadas de compósito, 2 mm de espessura), para os três materiais seleccionados, que diferem entre si na matriz. Com estes resultados, é possível verificar a variabilidade da dimensão do laminado no estado final, dependendo do tipo de matriz utilizada. Nestas figuras, a escala de cores representa a tensão equivalente σ_e de von Mises, que será, no entanto, referida posteriormente.

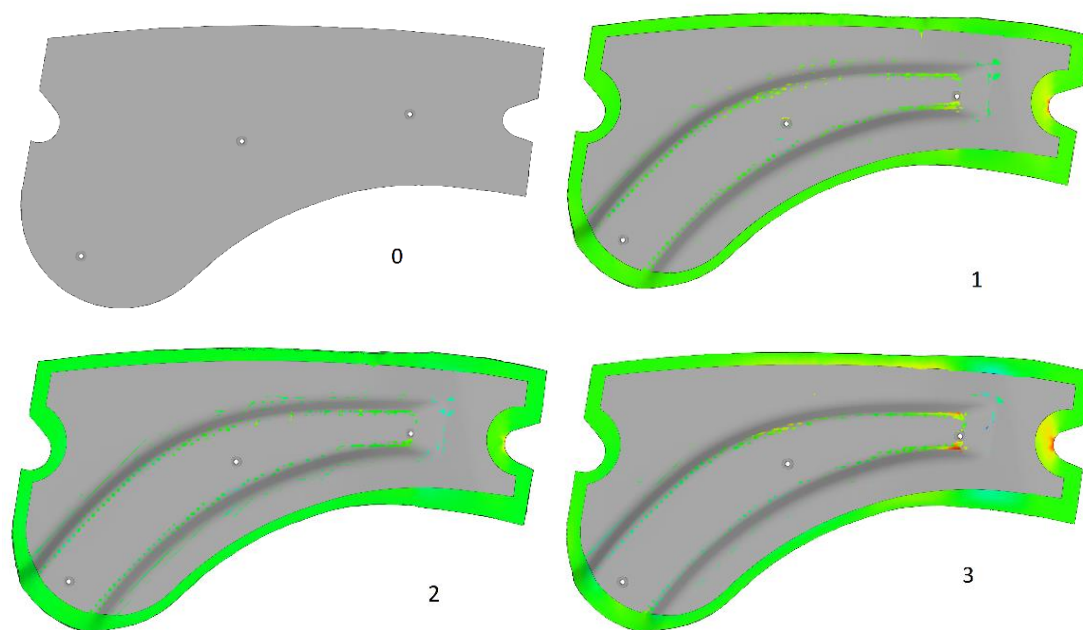


Figura 75 – 0 - Geometria Inicial; 1 - Geometria após estampagem utilizando TenCate Cetex® TC 1000; 2 – Geometria após estampagem utilizando TenCate Cetex® TC 1100; 3 – Geometria após estampagem utilizando TenCate Cetex® TC 1220

Uma vez que o material seleccionado para a produção do braço de suspensão não faz parte da base de dados do AniForm®, a optimização da geometria do laminado será realizada com base no resultado do material seleccionado que apresenta piores resultados (*worst case scenario*), o TenCate Cetex® TC 1000. Após a simulação, este laminado fica dentro do contorno da peça, sendo por isso necessário alterar as dimensões do laminado de base, de forma a que, após a simulação, o laminado ultrapasse o contorno da peça.

A sequência apresentada na Figura 76 representa já uma primeira versão actualizada/optimizada para a dimensão de base do laminado a ser produzido. De notar que o laminado, no final, apresenta alguns enrugamentos numa zona da peça. Neste contexto, novas simulações serão realizadas com cortes localizados no laminado de base. No entanto, estes resultados já não serão apresentados nesta dissertação.

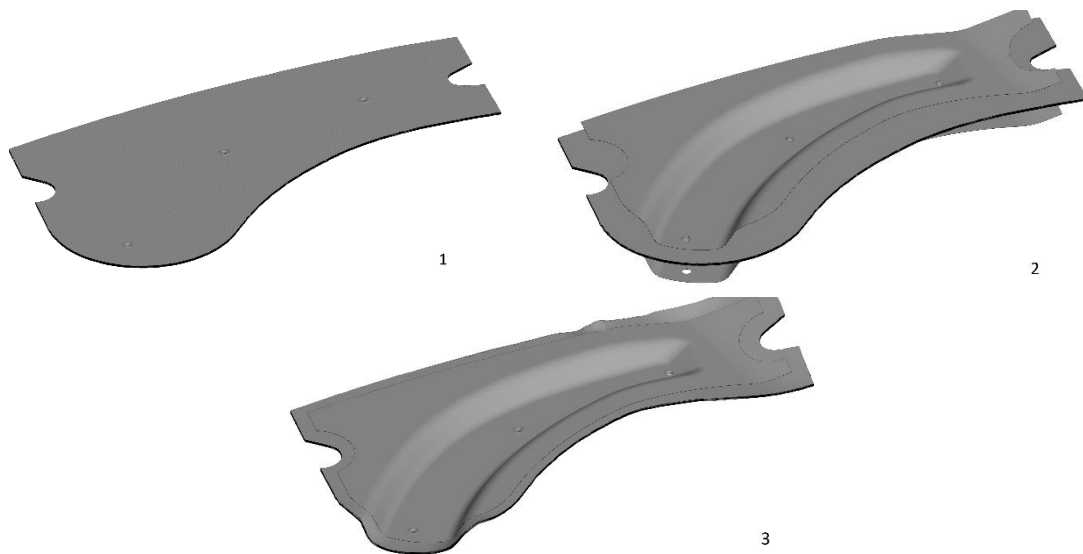


Figura 76 – 1 - Geometria base do laminado em compósito; 2 – Geometria base com os moldes de estampagem; 3 – Geometria base com os moldes de estampagem após estampagem

Outros *outputs* relevantes dizem respeito à distribuição de tensões no laminado e ao perfil de espessuras do laminado após a estampagem.

A Figura 77, Figura 78 e Figura 79 representam as distribuições de tensões no laminado para os materiais TenCate Cetex® TC 1000, TenCate Cetex® TC 1100 e TenCate Cetex® TC 1220, respectivamente. Estas simulações são todas realizadas com a geometria apresentada na Figura 76.

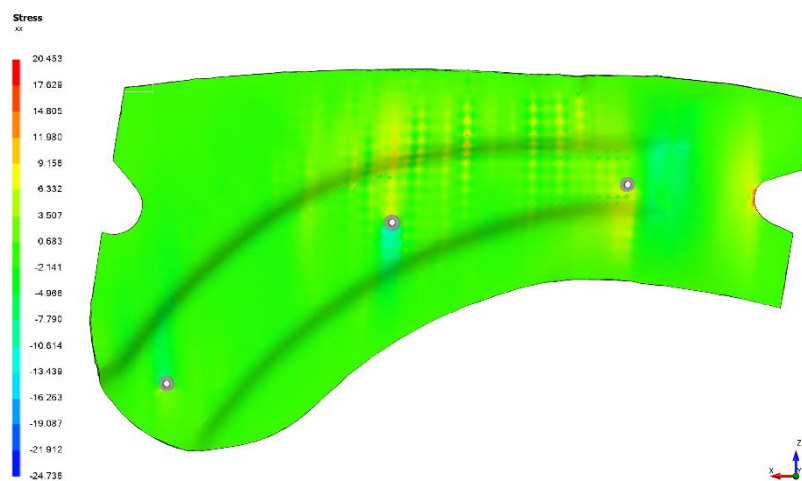


Figura 77 - Tensões equivalentes de von Mises (Pa) no laminado em compósito TenCate Cetex® TC 1000

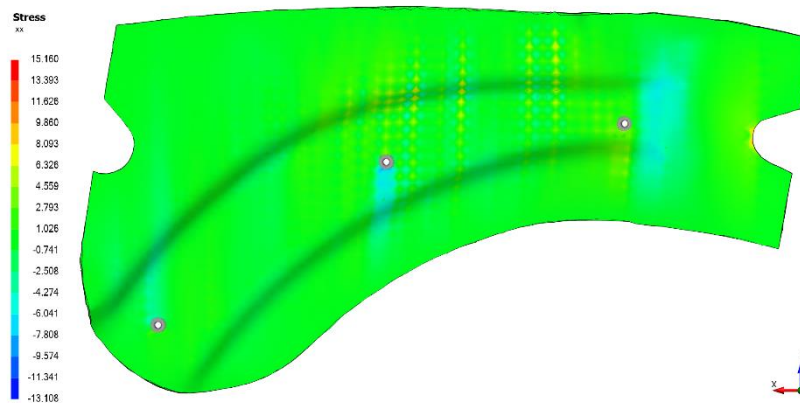


Figura 78 - Tensões equivalentes de von Mises (Pa) no laminado em compósito TenCate Cetex® TC 1100

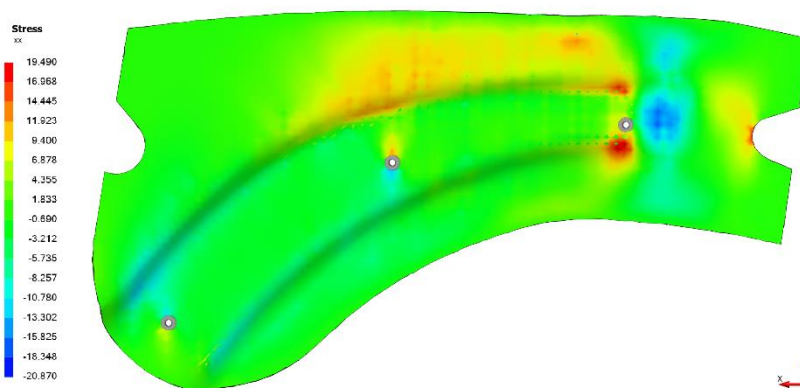


Figura 79 - Tensões equivalentes de von Mises (Pa) no laminado em compósito TenCate Cetex® TC 1220

Com a observação das figuras anteriores, é possível afirmar que o tipo de matriz do compósito influencia os valores de tensões obtidas. O material TenCate Cetex® TC 1000 é o que apresenta valores mais elevados, 20,45 MPa. No entanto, o material TenCate Cetex® TC 1220 apresenta uma extensão de tensões máximas mais abrangente no laminado, apresentando um valor de 19,49 MPa.

Quando comparadas, as três matrizes (Tabela 5), verifica-se que o PEEK se apresenta como um material mais rígido (maior módulo), mas com uma tensão de cedência inferior comparada com as do PEI e PPS, o que possivelmente explica a maior extensão de tensões máximas demonstrada na Figura 79.

A Figura 80 mostra a distribuição de espessura de camada do laminado utilizando TenCate Cetex® TC 1100, onde se pode observar uma distribuição de espessura uniforme com exceção de algumas enrugosidades na parte superior do laminado estampado.

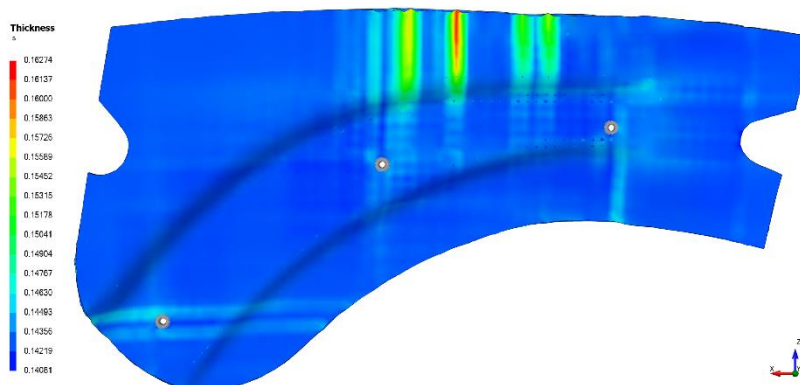


Figura 80 - Distribuição de espessura (mm) de camada do laminado em compósito TenCate Cetex® TC 1100

3.5 Análise técnico-económica da solução final

Neste capítulo, é realizado o estudo da viabilidade técnico-económica da produção do braço de suspensão em compósitos a nível industrial, por comparação com o braço de suspensão original em aço.

Neste contexto, foi realizada uma análise económica do componente metálico estampado, usando a metodologia em vigor na MCG (simplificada), que considera factores relevantes como a amortização de ferramentas, a optimização de consumo de chapa, a necessidade de revestimentos anti-corrosão, etc. As tabelas seguintes, Tabela 29 e a Tabela 30, apresentam os resultados obtidos, considerando-se um volume de produção de 100.000 peças/ano.

Tabela 29 - Análise de custo do componente alvo (braço de suspensão) em aço

	Materiais	Valor acrescentado	<i>Outsourcing</i>	Amortização da ferramenta	Total
Custo	2,3371 €	1,7764 €	1,0090€	1,0676€	6,1901 €
Percentagem	37,8%	28,7%	16,3%	17,2%	100%

Inclui: chapa de aço, pintura, revestimento anti-corrosão, mão-de-obra e amortização de ferramentas

Exclui: rótulas e mancais de borracha.

Tabela 30 - Modelo de custo da MCG (parceiro do consórcio) para o componente em aço

MCG automotive v2.1.9 Date: /6/2016 Client: MCG Interno Sales Ref: Braço Drawing No: Braço_3prt Description: Braço_Suspensão_NISSAN RFQ No.: 6262_V2 Project Years: 5,0 SOP Date: 2017 Av. Annual Vol: 100.000		1,50 (VHM Multiplier) No. LTAs: 0 LTA: 0% <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Cost [€/part]</th> <th>Scrap [%]</th> <th>Profit [%]</th> <th>Price year n: [€/peça]</th> <th>LTAs Affected?</th> <th>Price year 0 [€/part]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Materials & C.:</td> <td>2,3371</td> <td></td> <td></td> <td>2,3371</td> <td>no</td> <td>2,3371</td> </tr> <tr> <td>Value Added:</td> <td>1,7764</td> <td></td> <td></td> <td>1,7764</td> <td>no</td> <td>1,7764</td> </tr> <tr> <td>Outsourcing:</td> <td>1,0090</td> <td></td> <td></td> <td>1,0090</td> <td>no</td> <td>1,0090</td> </tr> <tr> <td>Amortization:</td> <td>1,0676</td> <td></td> <td></td> <td>1,0676</td> <td>no</td> <td>1,0676</td> </tr> <tr> <td>Total:</td> <td>6,1901</td> <td></td> <td></td> <td>6,1901</td> <td></td> <td>6,1901</td> </tr> </tbody> </table>							Cost [€/part]	Scrap [%]	Profit [%]	Price year n: [€/peça]	LTAs Affected?	Price year 0 [€/part]	Materials & C.:	2,3371			2,3371	no	2,3371	Value Added:	1,7764			1,7764	no	1,7764	Outsourcing:	1,0090			1,0090	no	1,0090	Amortization:	1,0676			1,0676	no	1,0676	Total:	6,1901			6,1901		6,1901
	Cost [€/part]	Scrap [%]	Profit [%]	Price year n: [€/peça]	LTAs Affected?	Price year 0 [€/part]																																											
Materials & C.:	2,3371			2,3371	no	2,3371																																											
Value Added:	1,7764			1,7764	no	1,7764																																											
Outsourcing:	1,0090			1,0090	no	1,0090																																											
Amortization:	1,0676			1,0676	no	1,0676																																											
Total:	6,1901			6,1901		6,1901																																											

Materials & Components				Gross Qty [kg]	Scrap [%]	Net Qty [kg]	Dir. Mat. Cost [€/un]	Mat. Refund [€/un]	Material Cost [€/assy]
MC 01	steel	1	HR660Y760T-CP-UC-U / HDI780C	3,2039	2%	2,1900	0,7500 €	0,1500 €	2,2893 €
TS 01	paint	1	Surface Treatment Material	4,7862	0%	N/A	0,0100 €	N/A	0,0479 €
									2,3371 €

Value Added				Investment (Tool + Gages) [€]	Cycle time [parts/h]	Operator Numb [op]	Mach Cost [€/h*op]	Sub Total Prod. Cost [€/s.ref]
SP 01	stamping	1	Braço Suspensão LH + RH	360.000	819	3	12,50	0,4192 €
TS 01	surface treat.	1	Braço	11.400	300	4	12,50	1,0167 €
AS 01	assembly	1	other assemblies Braço Suspensão	20.000	197	2	12,50	0,3405 €
								1,7764 €

Outsourcing			Quantity [parts/lot]	Dir. Cost [€/lot]	Cost [€/part]
O1	surface treat.	Tratamento ZnNi ELECTROFER	1	0,8780 €	0,8780 €
O2	transport	Transporte semanal para ELECTROFER	2100	275,00 €	0,1310 €
O3					
O4					
O5					
O6					
O7					
O8					
O9					
O10	transport	0 transport to customer in		- €	
					1,0090 €

Amortization			Quant. [un]	Un. Cost [€/un]	Amort. [years]	Total Cost [€]	Cost [€/part]
P1	tool	Amortização das ferramentas	1,00	391.400,00	4,25	391.400,00 €	0,9209 €
P2						- €	
P3						- €	
P4						- €	
P5						- €	
P6						- €	
P7						- €	
P8						- €	
P9						- €	
Annual Interest: 3% Interest on Investment			0,16	391.400,00	4,25	62.339,87 €	0,1467 €
							1,0676 €

As tabelas seguintes apresentam alguns valores de referência em termos dos materiais pré-impregnados e termoplásticos reforçados para a injeção (Tabela 31) e os respectivos custos associados à solução final proposta (Tabela 32).

Tabela 31 - Custos de referência para materiais pré-impregnados e PA6 reforçada para injeção

	Bandas Unidireccionais			Pellets	
	TC910 PA6 GF	TC910 PA6 CF	PA6 30%GF	PA6 30%CF	PA6 60%GF
Custo unitário	9,74 €/kg	44,62 €/kg	2,62 €/kg	9,10 €/kg	2,78 €/kg
Peso rolo	20 kg	20 kg	NA	NA	NA
Comprimento do rolo	280 m	500 m	NA	NA	NA
€/m	0,70 €	1,78 €	NA	NA	NA
€/m ²	4,17€	10,71 €	NA	NA	NA

Tabela 32 - Custos associados ao material da solução final proposta

	PA6 CF TenCate TC910 Nylon 6	PA6 Promyde 60%GF
Custo unitário	10,71 €/m ²	2,78 €/kg
Área de material	0,0429 m ²	-
Massa de material	0,125 kg	0,990 kg
Número de camadas	14	-
Custo Final	6,4412 €	2,7546 €

Com os valores de massa da Tabela 32 é possível observar na Tabela 33 a comparação entre massas da solução final proposta, com a versão de referência em aço.

Tabela 33 - Comparação de massas entre a solução final proposta e a versão de referência em aço

	Solução Final	Versão em aço
Massa Total	1,115 kg	2,0 kg
Ganho Final	45%	

Com base nos dados das tabelas anteriores e no produto alvo já desenvolvido, considerando-se a sobre-injecção com uma PA6 60%GF (de acordo com as simulações estruturais), estima-se um custo total de matéria prima de 9,20 € (6,45 € compósito de carbono UD + 2.75 € de PA6 60%GF) com ganhos estimados em massa na ordem dos 45%, cumprindo assim um dos objectivos deste projecto. O custo das matérias primas é muito superior ao aço, no entanto são esperados ganhos relativamente ao componente em aço por eliminação de custos de tratamentos superficiais, de pintura e montagem. O custo de uma ferramenta que integra os processos de estampagem e injecção de quatro cavidades (4 componentes por ciclo), tem um custo estimado de 350.000,00 €.

Assim sendo, com recurso à Tabela 34 é possível realizar uma comparação entre o material de referência do braço de suspensão, aço, com o material da solução final proposta, compósito + plástico.

Tabela 34 - Comparação de custos totais entre o material de referência (aço) e o material da solução híbrida (compósito + plástico)

	Material	
	Aço	Compósito
Matéria-prima	2,3371 €	9,1957 €
Processo de fabrico, tratamentos superficiais e montagem	1,7764 €	0 €
<i>Outsourcing</i>	1,0090 €	0 €
Amortização da ferramenta	1,0676 €	0,9553 €
Custo Total	6,1901 €	10,1510 €

Como é possível observar, embora o custo da matéria-prima do compósito seja significativamente maior quando comparado com o aço, é possível recuperar parte do diferencial com os custos associados ao processo de fabrico, tratamentos superficiais (por exemplo, a pintura) e a inserção dos sinoblocos no braço de suspensão. Assim, o custo total da solução final proposta é de 10,15 €, representando um custo de 1,65 vezes, comparativamente com o do aço, cumprindo assim todos os objectivos estipulados deste projecto.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica realizada no âmbito desta dissertação permitiu identificar as principais necessidades, tendências e oportunidades tecnológicas de um dos sectores de maior relevância, o sector automóvel. Os materiais compósitos e seus processos associados constituem hoje como uma alternativa efectiva aos aços, materiais aplicados tipicamente em componentes estruturais, uma vez que o factor peso tem uma enorme importância para o sector em questão. Existe, no entanto, uma série de obstáculos a serem ultrapassados, nomeadamente no que diz respeito à optimização dos custos de produção das matérias-primas, à cadeia de fornecimento, à adaptação dos processos produtivos e à maturação das ferramentas auxiliares na fase de projecto. Estes materiais iniciaram a sua aplicação em sectores de menor volume, como é o caso da aeronáutica. É clara a necessidade urgente da redução de custos para a expansão destes materiais a outros mercados de maior consumo.

O componente objecto de estudo seleccionado no âmbito do projecto LaTCh II foi um braço de suspensão de um veículo eléctrico, devido à sua natureza estrutural e por ser actualmente produzido em aço. Os materiais pré-impregnados unidireccionais de fibra de carbono apresentam, tipicamente, matrizes de polímeros de elevado desempenho, como o PEEK, o PEI ou o PPS (materiais utilizados no sector aeronáutico). O surgimento de pré-impregnados de fibra de carbono baseados em matrizes de engenharia (de custo mais reduzido) como a PA6 possibilita a sua utilização no sector automóvel.

Com efeito, o pré-impregnado seleccionado para o desenvolvimento do braço de suspensão é um pré-impregnado unidireccional de fibra de carbono de matriz de poliamida 6, uma vez que este apresenta uma interessante relação entre as propriedades mecânicas e o custo.

Uma vez seleccionados o conceito, o material base e o processo produtivo de estampagem a quente e sobre-injecção (*one-shot process*), tornou-se imperativa a necessidade de avaliação da interface entre o laminado compósito e o material sobre-injectado. Assim sendo, concluiu-se que a temperatura a que o laminado é aquecido antes da sobre-injecção é o factor de maior relevância para a garantia de uma boa adesão entre os dois materiais. Quanto maior for a temperatura do laminado compósito (limitada pela temperatura de degradação), maior será a resistência da interface. É, também, possível aferir que a segunda pressão e a temperatura do molde têm também alguma influência na resistência da interface, uma vez que uma maior segunda pressão e temperatura do molde resultam numa maior resistência.

A evolução do conceito deu origem à configuração do produto final. As simulações estruturais realizadas ao braço de suspensão foram iniciadas com base em dois conceitos (“I” e “U”), sendo que o conceito em “I” se mostrou desde o início como o mais promissor. Das quatro situações de carga consideradas, a mais crítica é a da travagem, e a zona mais crítica da peça (maiores tensões) é junto à rótula do braço de suspensão.

A evolução do conceito deu origem a um componente híbrido, constituído por um laminado de pré-impregnado de carbono de matriz poliamida 6, para o controlo do deslocamento máximo do componente em carga, e por uma estrutura “ribada” sobre-injectada em PA6, reforçada com 60% de fibra de vidro curta, para colmatar torções e as tensões instaladas junto à rótula.

Com a determinação da geometria inicial que todas as alterações geométricas iriam ter como base, procedeu-se à inserção do laminado em compósito na modelação em 3D. Numa primeira instância conclui-se que a presença do laminado na peça contribui para a diminuição do deslocamento que esta sofre em cada condição de carga solicitada, mas por sua vez levando a um aumento considerável na tensão máxima exercida na peça e à ruptura do próprio laminado, pelo que revela assim crucial a necessidade de reforços estruturais, *ribs*, na peça.

Realizadas várias e diferentes alterações na geometria da peça, concluiu-se que a optimização da geometria da estrutura sobre-injectada é um parâmetro decisivo para a redistribuição e alívio das tensões exercidas. Relativamente ao laminado, com base nas simulações intermédias realizadas, é possível também afirmar que a ordem e orientação do empilhamento das camadas afectam significativamente a resistência do laminado, permitindo assim redistribuir de forma mais favorável as cargas solicitadas ao longo da espessura do mesmo. Concluiu-se também que o elemento mais susceptível a falhar trata-se da estrutura sobre-injectada, o que conduz assim a uma estrutura final completamente “ribada”.

Com os dados da Tabela 25 verifica-se que o impacto do incremento do número de camadas do laminado reflecte-se essencialmente na diminuição do deslocamento. No entanto, um maior número de camadas implica um aumento significativo em termos de custo, pelo que se optou pelo laminado com o menor número de camadas, 14 camadas, para viabilização económica da solução final.

Com esta solução final proposta, observou-se que a peça é válida em todos os critérios a que esta é submetida, apresentando uma tensão máxima de 195 MPa, um deslocamento máximo de 1,9 mm e um critério de Hashin sempre inferior a 1 ao longo de todo o laminado, o que leva a concluir que esta cumpria todas as condições de carga.

Assim sendo, é possível concluir que a solução final adoptada permite uma redução de peso de 45% em relação ao componente em aço com um aumento no custo de produção

de apenas 65%, tornando assim esta uma solução viável e competitiva com outros tipos de braços de suspensão existentes no mercado, o que permite cumprir o objectivo inicial desta dissertação.

Trabalhos futuros a desenvolver

Actualmente na indústria existe ainda a dificuldade na produção e processamento de materiais compósitos, o que abre oportunidades de estudo para optimizações de tais actividades.

Existe também uma certa falha de comunicação entre *softwares* de processo de fabrico de materiais compósitos, importar/exportar ficheiros de um *software* para o outro, o que prejudica a curto e longo tempo a dinâmica de um projecto. E, mesmo nestes *softwares*, a caracterização de materiais existentes é muito escassa, o que muitas vezes impossibilita simulações com o tipo de material desejado.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. ICCT, *Reducing CO2 and fuel consumption from new cars: Assessing the near-term technology potencial in the EU*. 2013.
2. CO-PROMOÇÃO, P.I.D.E.E., *RELATÓRIO TÉCNICO INTERCALAR*. 2016.
3. *Inteligentes e Poucados*, in *Super Interessante*. 2013.
4. InTech, *New Trends and Developments in Automotive Industry*. New Trends and Developments in Automotive Industry, ed. M. Chiaberge. 2011: InTech.
5. Jacob, G.C., *Energy Absorption in Polymer Composites for Automotive Crashworthiness*. 2002.
6. Witteman, W., *Improved vehicle crashworthiness design by control of the energy absorption for different collision situations*. 1998: Eindhoven University.
7. Magnusson, C. and R. Andersson, *Stainless Steel as a Lightweight Automotive Material* 2001, R&D- Forming & Materials, Swedish Tool & Die Technology: Lulea, Sweden.
8. DeCicco, J.M., *Steel and iron technologies for automotive lightweighting.*, E. Defense, Editor. 2005.
9. *Ultralight Steel Auto Body - Final Report*. 1998, American Iron and Steel Institute.
10. World, A. *The shape of steel to come: why ductility matters*. 2016.
11. Kuroda, A., S. Ishizuka, and H. Tsuda, *Weight Reduction and Improvement of Safety Level in Impacts with High Strength Steels Tailored Blanks Technology*. 2003, SAE International.
12. Cole, G.S. and A.M. Sherman, *Light weight materials for automotive applications*. Materials Characterization, 1995. **35**(1): p. 3-9.
13. Dieffenbach, J.R., P.D. Palmer, and A.E. Mascarin, *Making the PNGV Super Car a Reality with Carbon Fiber: Pragmatic Goal or Pipe Dream?* 1996, SAE International.
14. Alliance, A.C., *Model Year Passenger Car and Truck Thermoset Composite Components*. 2000, Rochester, Michigan. Available: <http://www.autocomposites.org/>(May 2, 2002). Accessed.
15. Tkachenko, V.G., et al., *Creep Resistance and Long-Term Strength of Structural Magnesium Alloys*, in *High Temperature Materials and Processes*. 2006. p. 97.
16. Davies, G., *5 - Component manufacture*, in *Materials for Automobile Bodies*. 2003, Butterworth-Heinemann: Oxford. p. 130-169.
17. Kulekci, M.K., *Magnesium and its alloys applications in automotive industry*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008. **39**(9): p. 851-865.

18. Das, S., *The cost of automotive polymer composites: a review and assessment of DOE's lightweight materials composites research*. 2001: Oak Ridge National Laboratory Oak Ridge, Tennessee, USA.
19. CO-PROMOÇÃO, P.I.D.E.E., *Entregável 2.1*. 2016.
20. *Thermoplastics*. 19/04/2017]; Available from: <http://polymers.com.au/thermoplastics/>.
21. Silva, J.F.M.G.d., *Pré-impregnados de matriz termoplástica: Fabrico e transformação por compressão a quente e enrolamento filamentar*. 2014.
22. *FLEXCRAFT E1.4 T1.4 | ESTUDO APROFUNDADO DE MATERIAIS, PROCESSOS DE PRODUÇÃO E ESTRUTURAS PRIMÁRIAS PARA O CONCEITO DE PRODUTO UTILITY*.
23. Malnati, P. *Reinforced Thermoplastics: LFRT vs. GMT*. 2007 [cited 2017 04/04/02107]; Available from: <http://www.compositesworld.com/articles/reinforced-thermoplastics-lfirt-vs-gmt>.
24. *GMT*. 11/04/2017]; Available from: <http://www.quadrantplastics.com/eu-en/products/composite-material/gmt.html>.
25. *Glass Mat Reinforced Thermoplastic (GMT/TRE)*. 11/04/2017]; Available from: http://composites.owenscorning.com/processes/Glass_Mat_Reinforced_Thermoplastic_GMT_TRE.aspx.
26. Cunha, A., *Moldação por Injecção e Materiais Plásticos*. Manual do Projectista - Para Moldes de Injecção de Plástico.
27. *Rapid Injection Moulding*. 11/04/2017]; Available from: <https://www.slideshare.net/anilmangalan/rapid-injection-moulding>.
28. Nunes, M.J.L., *Metodologias de Desenvolvimento de Novos Produtos Industriais*. 2004, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
29. Taveira, S.A. *ETAPAS DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO*. 2012 [cited 2017 11/04/2017]; Available from: <http://dexteradesign.blogspot.pt/2012/10/etapas-do-processo-de-desenvolvimento.html>.
30. *SOLIDWORKS(R) Demo Request*. 25/05/2017]; Available from: <http://www.solidworks.com/sw/purchase/product-demonstration.htm>.
31. *Autodesk Inventor*. 25/05/2017]; Available from: <https://www.techopedia.com/definition/24055/autodesk-inventor>.
32. *Inventor*. 20/04/2017]; Available from: <http://www.3dmodeling.fr/la-formation/inventor/>.
33. *3DS Academy - CATIA V5 FOR THE CLASSROOM*. 20/04/2017]; Available from: <https://academy.3ds.com/en/software/catia-v5-for-classroom>.
34. *ABAQUS UNIFIED FEA - ABAQUS/CAE*. 20/04/2017]; Available from: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/abaquscae/>.
35. *MSC Software Automotive*. 25/05/2017]; Available from: <http://www.mscsoftware.com/industry/automotive>.
36. *What is ANSYS*. 25/05/2017]; Available from: <http://www.figes.com.tr/english/ansys/ansys.php>.

37. Group, E. *PAM-FORM*. 20/04/2017]; Available from: <https://www.esi-group.com/pt/solucoes-de-software/fabricacao-virtual/compostos/pam-composites/pam-form>.
38. *Fibre paths affect mechanical performance*. 21/04/2017]; Available from: <https://www.aniform.com/fibre-paths>.
39. Hassiotis, M.-K., *Mold Flow Analysis Can Save Your Plastic Injection Mold Design*. 2016.
40. *Simulation Moldflow Adviser Ultimate 2014 Overview*. 25/05/2017]; Available from: <http://getintopc.com/software/simulators/autodesk-simulation-moldflow-adviser-ultimate-2014-free-download/>.
41. Cidade, R., *Estudo numérico do comportamento mecânico em ensaio de anel de dutos compósitos produzidos por enrolamento filamentar*. Departamento de Engenharia de Materiais 2010, Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro.
42. *Strength and Mechanical behavior of FRC lamina*. 11/04/2017]; Available from: https://www.slideshare.net/Kartik_95/strength-and-mechanical-behavior-of-frc-lamina.
43. *Como funcionam a suspensão dos carros?* 12/04/2017]; Available from: <http://tudosobreautomoveis.blogs.sapo.pt/2388.html>.
44. CO-PROMOÇÃO, P.I.D.E.E., *Entregável 1.1*.
45. Isaac-Lowry, J. *Technical Articles Suspension Design: Types of Suspensions*. August 22, 2004.
46. Costa, G. *Autopédia: Os vários tipos de suspensões*. 18/12/2011.
47. Sharp, B. *Quais as diferenças entre os tipos de suspensão independentes?* 20 Jan 2016.
48. *Suspension*. 12/04/2017]; Available from: <http://www.connorsautomotive.com/Services.aspx>.

ANEXOS

6 ANEXOS

PRODUCT DATA SHEET



TENCATE ADVANCED COMPOSITES

TenCate Cetex® TC910 Nylon 6 Thermoplastic Composite

PRODUCT TYPE

Nylon 6 based thermoplastic resin system

TYPICAL APPLICATIONS

- Automotive Structure
- Under Hood Applications
- Replacement for Highly Loaded Injection Molded Parts

FEATURES

- Excellent impact & solvent resistance
- Good elevated temperature resistance

HEAT DISTORTION TEMPERATURE

Approximately 392°F/200°C

SHELF LIFE

Indefinite at 77°F (25°C)

Revised 09/2016

Cetex® and CFRT™ are registered trademarks of Royal TenCate. All data given is based on representative samples of the materials in question. Since the method and circumstances under which these materials are processed and tested are key to their performance, and TenCate Advanced Composites has no assurance of how its customers will use the material, the corporation cannot guarantee these properties.

Page 1 of 1

CETEX-TC910_DS_092116

PRODUCTS DESCRIPTION

TenCate Cetex® TC910 Nylon 6 is a family of nylon 6 thermoplastic composites. It features high strength, good heat distortion temperatures and excellent solvent resistance. As a result of these attributes, TenCate Cetex® TC910 is ideal for automotive, transportation and industrial applications where both strength and chemical resistance is valued.

TENCATE CETEX TC910 NYLON 6 PRODUCT BENEFITS/FEATURES

- Good resistance to solvents
- Excellent balance of strength and impact resistance
- Moldable and formable
- Excellent temperature resistance and strength makes it ideal for housings and under the hood applications



TENCATE CETEX TC910 NYLON 6 FIBERGLASS UNIDIRECTIONAL TAPE

Resin content by weight at 40%. Composite Density 1.73 g/cm³.
Tape Width 166 mm (6.5 inches). Tape Thickness 0.25 mm (0.010 Inches).

Property	Condition	Method	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D3039	131 ksi	900 MPa
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D3039	4.4 Msi	30 GPa
Flexural Strength 0°	RTD	ASTM D790	152 ksi	1050 MPa
Flexural Modulus 0°	RTD	ASTM D790	4.2 Msi	29 GPa
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D6641	50 ksi	345 MPa
Short Beam Shear Strength	RTD	ASTM D2344	6.1 ksi	42 MPa

Recommended Process Temperature = 480-520°F (249-271°C)

TENCATE CETEX TC910 NYLON 6 CARBON FIBER UNIDIRECTIONAL TAPE

Resin content by weight at 40%. Composite Density 1.45 g/cm³.
Tape Width 166 mm (6.5 inches). Tape Thickness 0.16 mm (0.007 Inches).

Property	Condition	Method	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D3039	276 ksi	1900 MPa
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D3039	14.5 Msi	100 GPa
Flexural Strength 0°	RTD	ASTM D790	138 ksi	950 MPa
Flexural Modulus 0°	RTD	ASTM D790	14.1 Msi	97 GPa
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D3410	54 ksi	375 MPa
Short Beam Shear Strength	RTD	ASTM D2344	6.2 ksi	43 MPa

Recommended Process Temperature = 480-520°F (249-271°C)

TENCATE PERFORMANCE COMPOSITES

1150 Calle Suerte
Camarillo, CA 93012 USA
Tel: +1 805 482 1722

5035 N. Service Rd, Bldg. A-1*
Burlington, Ontario L7L 5V2 CANADA
Tel: 905 332 0991

18410 Butterfield Blvd.
Morgan Hill, CA 95037 USA
Tel: +1 408 776 0700

www.tencateperformancecomposites.com
www.tencateadvancedcomposites.com
E-mail: tcpcsales@tencate.com

*manufacturing location

Ultramid® B3ZG7 OSI BK23273

Polyamide 6



Product Description

Ultramid B3ZG7 OSI BK23273 is a 35% glass reinforced, pigmented black, heat stabilized, impact modified PA6 injection molding grade. It was developed to meet demanding mechanical and chemical requirements for the automotive oil pan application.

Applications

Typical application is automotive oil pan.

PHYSICAL	ISO Test Method	Property Value	
Density, g/cm ³	1183	1.37	
Mold Shrinkage, parallel, %	294-4	0.2	
Mold Shrinkage, normal, %	294-4	0.6	
MECHANICAL	ISO Test Method	Dry	Conditioned
Tensile Modulus, MPa	527		
23C		10,000	6,170
Tensile stress at break, MPa	527		
23C		163	112
Tensile strain at break, %	527		
23C		4.1	11
Flexural Modulus, MPa	178		
23C		8,920	5,650
IMPACT	ISO Test Method	Dry	Conditioned
Izod Notched Impact, kJ/m ²	180		
-40C		17	-
23C		24	34
Charpy Notched, kJ/m ²	179		
-30C		18	-
23C		23	34
Charpy Unnotched, kJ/m ²	179		
-30C		113	-
23C		100	106
THERMAL	ISO Test Method	Dry	Conditioned
Melting Point, C	3146	220	-
HDT A, C	75	203	-
HDT B, C	75	220	-

Processing Guidelines

Material Handling

Max. Water content: 0.08%

Product is supplied in sealed containers and drying prior to molding is not required. If drying becomes necessary, a dehumidifying or desiccant dryer operating at 80C (176F) is recommended. Drying time is dependent on moisture level however 2-4 hours is generally sufficient. Further information concerning safe handling procedures can be obtained from the Safety Data Sheet. Alternatively, please contact your BASF representative.

Typical Profile

Melt Temperature 270-295C (518-563F)
Mold Temperature 80-95C (176-203F)
Injection and Packing Pressure 35-125 bar (500-1800psi)
Rear Zone 245-275C (473-527F)
Center Zone 260-285C (500-545C)
Front Zone 270-295C (518-563F)
Nozzle 270-295C (518-563F)

Mold Temperatures

This product can be processed over a wide range of mold temperatures; however, for applications where aesthetics are critical, a mold surface temperature of 80-95C (176-203F) is required.

Pressures

Injection pressure controls the filling of the part and should be applied for 90% of ram travel. Packing pressure affects the final part and can be used effectively in controlling sink marks and shrinkage. It should be applied and maintained until the gate area is completely frozen off.

Back pressure can be utilized to provide uniform melt consistency and reduce trapped air and gas. Minimal back pressure should be utilized to prevent glass breakage.

Fill Rate

Fast fill rates are recommended to ensure uniform melt delivery to the cavity and prevent premature freezing. Surface appearance is directly affected by injection rate.

Note

Although all statements and information in this publication are believed to be accurate and reliable, they are presented gratis and for guidance only, and risks and liability for results obtained by use of the products or application of the suggestions described are assumed by the user. NO WARRANTIES OF ANY KIND, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE MADE REGARDING PRODUCTS DESCRIBED OR DESIGNS, DATA OR INFORMATION SET FORTH. Statements or suggestions concerning possible use of the products are made without representation or warranty that any such use is free of patent infringement and are not recommendations to infringe any patent. The user should not assume that toxicity data and safety measures are indicated or that other measures may not be required.

Ultramid® Structure B3WG12

LFX BK23215

Polyamide 6



Product Description

Ultramid Structure B3WG12 LFX BK23215 is a 60% long glass-fiber fiber reinforced and heat aging resistant injection molding grade designed for applications requiring excellent strength and stiffness.

PHYSICAL	ISO Test Method	Property Value	
Density, g/cm ³	1183	1.71	
Mold Shrinkage, parallel, %	294-4	0.24	
Mold Shrinkage, normal, %	294-4	0.54	
MECHANICAL	ISO Test Method	Dry	Conditioned
Tensile Modulus, MPa	527		
23C		20,800	14,200
Tensile stress at break, MPa	527		
23C		260	170
Tensile strain at break, %	527		
23C		2.0	2.35
Flexural Strength, MPa	178		
23C		410	280
Flexural Modulus, MPa	178		
23C		19,500	14,700
IMPACT	ISO Test Method	Dry	Conditioned
Charpy Notched, kJ/m ²	179		
-30C		42	41
23C		41	36
Charpy Unnotched, kJ/m ²	179		
-30C		91	83
23C		92	88
THERMAL	ISO Test Method	Dry	Conditioned
Melting Point, C	3146	220	-
HDT A, C	75	215	-

Processing Guidelines

Material Handling

Max. Water content: 0.12%

Ultramid is supplied in sealed containers and drying prior to molding in a dehumidifying or desiccant dryer is recommended. Drying parameters are dependent upon the actual percentage of moisture in the pellets and typical pre-drying conditions are 2-4 hours at 83C (180F). Recommended moisture levels for achieving optimum surface qualities and mechanical properties is 0.03% - 0.08%. Further information concerning safe handling procedures can be obtained from the Material Safety Data Sheet (MSDS), or by contacting your BASF representative.

Typical Profile

Melt Temperature 280-310C (536-590F)

Mold Temperature 80-100C (176-212F)

Injection and Packing Pressure 35-125 bar (500-1500 psi)

Mold Temperatures

A mold temperature of 80-100C (176-212F) is recommended.

Pressures

Injection pressure controls the filling of the part and should be applied for 90% of ram travel. Packing pressure affects the final part and can be used effectively in controlling sink marks and shrinkage. It should be applied and maintained until the gate area is completely frozen off.

Back pressure can be utilized to provide uniform melt consistency and reduce trapped air and gas. Minimal back pressure should be utilized to prevent glass breakage.

Fill Rate

Fast fill rates are recommended to ensure uniform melt delivery to the cavity and prevent premature freezing. Surface appearance is directly affected by injection rate.

Note

Although all statements and information in this publication are believed to be accurate and reliable, they are presented gratis and for guidance only, and risks and liability for results obtained by use of the products or application of the suggestions described are assumed by the user. NO WARRANTIES OF ANY KIND, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE MADE REGARDING PRODUCTS DESCRIBED OR DESIGNS, DATA OR INFORMATION SET FORTH. Statements or suggestions concerning possible use of the products are made without representation or warranty that any such use is free of patent infringement and are not recommendations to infringe any patent. The user should not assume that toxicity data and safety measures are indicated or that other measures may not be required.

ISSUED: 22/08/2012

ISO 9001 CERTIFIED

Promyde B30 P2 G30 U0. Injection Moulding Polyamide 6 with 30% glass fibre, and flame retardant using a **halogen and red phosphorous free** flame retardant system.

PROPERTIES	CONDITIONS	TEST METHOD	UNITS	VALUES
PHYSICAL PROPERTIES				
Density	23 °C	ISO 1183	g/cm ³	1,40
Viscosity number	(0,005 g/ml H ₂ SO ₄)	ISO 960D	ml/g	125
Moisture absorption	23 °C	ISO 62	%	2,1
Water absorption	23 °C	ISO 62	%	6,5
FLAMMABILITY				
Flammability	0,8 mm	UL-94	Class	V-0
	1,5 mm			V-0
	3 mm			V-0
Glow wire flammability index	1,5 mm	IEC 60695-2-12,13	°C	960
Glow wire ignitability temperature	1,5 mm	IEC 60695-2-12,13	°C	775
PROCESSING CONDITIONS				
Melt temperature, injection moulding			°C	250-270
Mould temperature			°C	40-80
Moulding Shrinkage	longitudinal		%	0,2-0,5
	transversal		%	0,7-0,9
MECHANICAL PROPERTIES (dry/cond.)*				
Tensile modulus	23 °C, 1 mm/min	ISO 527-1/-2	MPa	9.900 / 6.500
Tensile strength	23 °C, 50 mm/min	ISO 527-1/-2	MPa	160 / 110
Elongation at yield	23 °C, 50 mm/min	ISO 527-1/-2	%	- / -
Elongation at break	23 °C, 50 mm/min	ISO 527-1/-2	%	3,3 / 6
Flexural modulus	23°C, 2 mm/min	ISO 178	MPa	9.300 / 5.800
Flexural strength	23°C, 2 mm/min	ISO 178	MPa	140 / 80
Charpy unnotched impact strength	23°C	ISO 179/1eU	kJ/m ²	70 / 95
	-30°C			-
Charpy notched impact strength	23°C	ISO 179/1eA	kJ/m ²	6,5 / 20
	-30°C			- / -
THERMAL PROPERTIES				
Melting temperature (DSC)	10°C/min	ISO 3146	°C	220
Heat Deflection Temperature (HDT)	1,8 MPa	ISO 75-2	°C	211
Thermal coefficient of linear expansion	23-80°C long.	ISO 11359-1/-2	10 ⁻⁴ /K	0,2
	23-80°C transv.			0,6
ELECTRICAL PROPERTIES (dry/cond.)*				
Dielectric constant	1MHz	IEC 60250	-	3,7 / 6,8
Dissipation factor	1 MHz	IEC 60250	10 ⁻⁴	230 / 2.200
Volume resistivity		IEC 60093	Ω.m	10 e ¹³ / 10 e ¹⁰
Surface resistivity		IEC 60093	Ω	10 e ¹³ / 10 e ¹⁰
Comparative tracking index		IEC 60112		600

* dry = dry as moulded / cond.= conditioned according to ISO 1110

CHARACTERISTICS

Promyde B30 P2 G30 U0 is a polyamide 6 with 30% glass fibre with high mechanical strength, heat stabilized and lubricated for **injection moulding**. Its **halogens and red-phosphorous free flame retardant system** enhances its flame behavior to V0- UL rated category.

APPLICATIONS

Promyde B30 P2 G30 U0 allows a fast and **efficient mould filling, and an easy mould release**, that combined with its **excellent mechanical properties**, and its flame retardant properties make it suitable for components specially used in electrical and electronics industries.

FORMAT AND STORAGE

Promyde B30 P2 G30 U0 is supplied in moisture-proof packaging. Typical formats are Big Bag, octabin, and 25kg bags. All containers are perfectly sealed. The product should be stored in a dry place and opened just before processing.

PROCESSING GUIDELINES

Drying

Material is supplied ready to process with a low moisture content. When moisture absorption is prevented drying is not required. When drying is necessary, conditions are:

Drying temperature ≤ 80 °C

Drying time: 4-6 hours

Injection moulding

The recommended processing parameters for injection moulding are:

Melt temperature: 250-270°C

Mould temperature: 40-80 °C

Injection speed: medium to high

Back pressure: moderate

Shrinkage

The shrinkage of a moulded part is influenced by wall thickness, mould gating, and moulding conditions.

Moisture

A particular characteristic of unreinforced polyamide 6 is its combination of moderate tensile and flexural strength with rigidity, good impact strength, and friction resistance. However, when a moulded part absorbs moisture, tensile and flexural strength decrease and toughness increases.

NOTE

All recommendations are based on knowledge and experience; The values have been established on standardized tests. The figures should be regarded as guide values and not as binding minimum values. As many factors may affect processing or applications, we recommend that customers make their own tests to determine the suitability of a product for its particular use.

ISSUED: MARCH 2017

ISO 9001

Promyde **B300 P2 G60 S** is a high flow Polyamide 6 injection moulding grade with 60% Glass fibre and heat stabilized. Special for those applications that need special surface finish.

PROPERTIES	CONDITIONS	TEST METHOD	UNITS	VALUES
PHYSICAL PROPERTIES				
Density	23 °C	ISO 1183	g/cm ³	1,69
Moisture absorption	23 °C / 50% r.h.	ISO 62	%	1,2
Water absorption	23 °C / saturation in water	ISO 62	%	4,5
Flammability	1,5 mm	UL-94		HB
PROCESSING CONDITIONS				
Melt Volume rate	275°C/5 kg	ISO 1133	cm ³ /10 min	35
Spiral length vs. standard PA			%	> 80
Melt temperature, injection moulding			°C	235-270
Mould temperature			°C	40-80
Mould Shrinkage	Parallel Normal	ISO 294-4	%	0,2-0,25 0,3-0,35
MECHANICAL PROPERTIES (dry/cond.)*				
Tensile modulus	23 °C, 1 mm/min	ISO 527-1-2	MPa	21.000 / 17.000
Tensile strength	23 °C, 50 mm/min	ISO 527-1-2	MPa	240/ 190
Elongation at yield	23 °C, 50 mm/min	ISO 527-1-2	%	- / -
Elongation at break	23 °C, 50 mm/min	ISO 527-1-2	%	2,5/ 2,1
Flexural modulus	23 °C, 2 mm/min	ISO 178	MPa	19.700 / 14.400
Flexural strength	23 °C, 2 mm/min	ISO 178	MPa	406 / 300
Charpy unnotched impact strength	23°C -30°C	ISO 179/1eU	kJ/m ²	85 / 110 - / -
Charpy notched impact strength	23°C -30°C	ISO 179/1eA	kJ/m ²	18 / 25 - / -
THERMAL PROPERTIES				
Melting temperature (DSC)	10°C/min	ISO 3146	°C	222
Heat Deflection Temperature (HDT)	1,8 MPa	ISO 75-1-2	°C	220
	0,45 MPa			220
Thermal coefficient of linear expansion	23-85°C long.	ISO 11359-1/-2	10 ⁻⁴ /K	0,13
	23-85°C transv.			0,50
ELECTRICAL PROPERTIES (dry/cond.)*				
Volume resistivity		IEC 60093	Ω.m	10 ¹³ / 10 ¹¹
Surface resistivity		IEC 60093	Ω	10 ¹² / 10 ¹⁰
Comparative tracking index		IEC 60112		500

* dry = dry as moulded / cond.= conditioned according to ISO 1110

CHARACTERISTICS

The outstanding flow properties of **Promyde B300 P2 G60 S** allow a reduction in molding temperature. This has two advantages: the cycle time is shorter and less energy is needed in injection molding. Because **Promyde B300 P2 G60 S** has better flow, lower injection pressure is needed which reduces the clamping force, longer flow paths are possible and the mold is easier to design. It is also specially formulated to obtain a smoother surface finish, when compared to regular glass fiber reinforced grades.

APPLICATIONS

The flow properties of **Promyde B300 P2 G60 S** combined with its excellent mechanical and thermal properties make it suitable for a **wide range of industrial, automotive and electrical applications, especially in long flow path and thin wall parts.**

Glass-fibre reinforced grades are suitable for housings, supports, industrial articles and electrical insulating parts.

FORMAT AND STORAGE

Promyde B300 P2 G60 S is supplied in moisture-proof packaging. Typical formats are Big Bag, octabin, and 25kg bags. All containers are perfectly sealed. The product should be stored in a dry place and opened just before processing.

PROCESSING GUIDELINES

Drying

Material is supplied ready to process with low moisture content. When moisture absorption is prevented drying is not required. When drying is necessary, conditions are:

Drying temperature ≤ 80 °C

Drying time: 4-6 hours

Injection moulding

The recommended processing parameters for injection moulding are:

Melt temperature: 235-270°C

Mould temperature: 40-80 °C

Injection speed: medium to high

Back pressure: moderate

Shrinkage

The shrinkage of a moulded part is influenced by wall thickness, mould gating, and moulding conditions.

Moisture

A particular characteristic of reinforced polyamide 6 is its combination of moderate tensile and flexural strength with rigidity, good impact strength, and friction resistance. However, when a moulded part absorbs moisture, tensile and flexural strength decrease and toughness increases.

NOTE

All recommendations are based on knowledge and experience; The values have been established on standardized tests. The figures should be regarded as guide values and not as binding minimum values. As many factors may affect processing or applications, we recommend that customers make their own tests to determine the suitability of a product for its particular use.

TenCate Cetex® TC1000 Premium

PRODUCT TYPE

Polyetherimide (PEI) thermoplastic resin system

SERVICE TEMPERATURE

149°C (300°F) continuous

TYPICAL APPLICATIONS

- Aircraft interiors
- Secondary aircraft structures

CUSTOMER QUALIFICATIONS

- BMS 8-353 (Type 1)
- ABS 5036
- AIMS 003-01
- ASNA 5054

PRODUCT DESCRIPTION

TenCate Cetex® TC1000 Premium is an engineered thermoplastic composite, utilizing polyetherimide resin for outstanding toughness and excellent fire performance. TenCate Cetex® Premium has gained qualification at Airbus, Boeing and many other airframe OEMs and Tier 1 suppliers for use in aircraft interior and secondary structures.

TenCate Cetex® is typically supplied in 3.66m x 1.22m (12ft x 4ft) pre-consolidated laminates (RTL) of varying ply thicknesses, specifically adhering to customer designated fiber selection, orientation and ply count.

The use of Cetex® as a reinforced thermoplastic laminate (RTL) composite significantly reduces the production cycle-time by eliminating the handling and assembly of traditional wet-lay materials, along with the potential for error. In addition, the thermoplastic forming time is calculated in minutes and seconds, not hours. Heating, forming and cooling can take less than 5 minutes for complex 3D geometry, and sandwich panels can now be realized in 15 minutes without the inconvenience of core read-through. Further optimization can be gained in secondary processing, due to the thermoplastic resin. These operations can include welding, folding, painting and printing.

TENCATE CETEX® TC1000 PREMIUM PRODUCT BENEFITS / FEATURES

- Excellent FST performance (OSU <15/15)
- No freezer storage required
- Rapid processing with cycle times <3 min
- Very low moisture absorption
- Good solvent resistance
- Low CTE and CME
- Qualified and certified to OEM specifications
- Optional colour grades available

PRODUCT DATASHEET



TENCATE ADVANCED COMPOSITES

TenCate Cetex® TC1000 Premium

NEAT RESIN PROPERTIES - TENCATE CETEX® TC1000 PREMIUM

Property	Test Methods	
Specific gravity	ISO 1183	1.27 g/cm ³
Glass transition temperature	-	217°C (423°F)
Dielectric constant	ISO D150	3.15 at 1 MHz
Loss tangent	-	0.0013 at 1 MHz
Moisture absorption	ISO 62	1.25%
Flammability	UL94	V-0
Tensile strength	ISO R527	105 MPa (15.2 ksi)
Tensile modulus	ISO R527	3,276 MPa (0.475 Msi)
Elongation at yield	ISO R527	7%
Poisson's ratio	-	0.36
Compression strength	ASTM D695	152 MPa (22.0 ksi)
Compression modulus	ASTM D695	3,310 MPa (0.48 Msi)
Izod notched	ASTM D256	53.4 J/m (1.0 ft-lb/in)
CTE	-	5.58/°C ⁻¹ (3.1/°F ⁻¹)
Thermal conductivity	-	0.22 W/m·°K

PHYSICAL / THERMAL PROPERTIES OF PREPREG - TENCATE CETEX® TC1000 PREMIUM - 7781 / PEI

Property	Value
Mass of fabric	296g/m ² (8.85oz/yd ²)
Mass of fabric + resin	450g/m ² (13.27oz/yd ²)
Resin content by volume	50%
Resin content by weight	33%
Moisture pick up	0.35%
Ply thickness	0.24mm (0.0094in)
Specific gravity	1.91g/cm ³ (119.1lb/ft ³)
T _g (DSC) (amorphous)	217°C (423°F)
T _m	310°C (590°F)

7781 = Glass fabric 296gsm FAW, 8 Harness Satin weave
PEI = Polyetherimide resin

PRODUCT DATASHEET



TENCATE ADVANCED COMPOSITES

TenCate Cetex® TC1000 Premium

MECHANICAL DATA - TENCATE CETEX® TC1000 PREMIUM

Property	Condition	Methods	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ISA 527 (type 3) EN 2747 (III)	451 MPa	65.4 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	ISA 527 (type 3) EN 2747 (III)	26.3 GPa	3.8 Msi
Compression Strength 0°	RTD	ASTM D 6641 EN 2850	560 MPa	81.2 ksi
Compression Modulus 0°	RTD	ASTM D 6641 EN 2850	29 GPa	4.2 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	ISO 178	650 MPa	94.3 ksi
Flexural Modulus 0°	RTD	ISO 178	26 GPa	3.8 Msi

7781 = Glass fabric 296gsm FAW, 8 Harness Satin weave
PEI = Polyetherimide resin

FLAMMABILITY PROPERTIES - TENCATE CETEX® TC1000 PREMIUM

Test	Spec	Criteria	2 Plies of 7781 PEI Resin	5 Plies of 7781 PEI Resin	5 Plies of 7781 White PEI Resin
Flammability	60 second vertical burn FAR 25.853 (a)	152 mm	PASS	PASS	PASS
Smoke Emission	ABD0031 (F)	150/200	PASS	PASS	PASS
Toxicity	ABD0031 (F)	Ds Max 4 min (Flaming/Non-Flaming) = 150	PASS	PASS	PASS
Heat Release	FAR 25.853 (d)	2 min Total HR (kWmin/m²) = 65	10.0	0	3.5
		Peak HR (kW/m²) = 65	12.0	13.0	14.1

7781 = Glass fabric 296gsm FAW, 8 Harness Satin weave
PEI = Polyetherimide resin

Revised 02/2016

All data given is based on representative samples of the materials in question. Since the method and circumstances under which these materials are processed and tested are key to their performance, and TenCate Advanced Composites has no assurance of how its customers will use the material, the corporation cannot guarantee these properties.

TenCate, [TenCate] Cetex® and all other related characters, logos and trade names are claims and/or registered trademarks of Koninklijke Ten Cate N.V. and/or its subsidiaries in one or more country. Use of trademarks, trade names and other IP rights of TenCate without express written approval of TenCate is strictly prohibited.

Page 3 of 3 CETEX_TC1000_Premium_V2_020416

TENCATE ADVANCED COMPOSITES

G. van der Muelenweg 2
7443 RE Nijverdal NL
Tel: +31 548 633 933
Fax: +31 548 633 299

Amber Drive, Langley Mill
Nottingham, NG16 4BE UK
Tel: +44 (0) 1773 530899
Fax: +44 (0) 1773 768687

18410 Butterfield Blvd.
Morgan Hill, CA 95037 USA
Tel: +1 408 776 0700
Fax: +1 408 776 0107

www.tencate.com/thermoplastic

www.tencate.com/advancedcomposites
E-mail: advancedcomposites.europe@tencate.com (Europe)
E-mail: info@tcac-usa.com (USA)

ISO 9001
AS 9100
Accredited

PRODUCT DATASHEET



TENCATE ADVANCED COMPOSITES

TenCate Cetex® TC1100 PPS resin system

PRODUCT TYPE

Polyphenylene Sulfide (PPS)
thermoplastic resin system

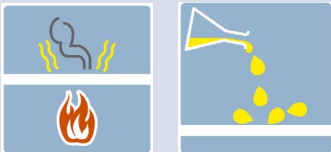
SERVICE TEMPERATURE

100°C (212°F) continuous

TYPICAL APPLICATIONS

- Primary aircraft structures
- Secondary aircraft structures
- Engine nacelles

KEY PROPERTIES



Low FST values Chemical resistant

SHELF LIFE

Indefinite at 25°C (77°F)

PRODUCT DESCRIPTION

TenCate Cetex® TC1100 is a semi-crystalline polyphenylene sulfide (PPS) thermoplastic composite offering outstanding toughness and excellent chemical and solvent resistance. The material is inherently flame resistant with low smoke emission. It exceeds 35/35 OSU and is qualified at Airbus and Boeing for multiple structural applications.

TenCate Cetex® TC1100 is typically supplied in 3.66m x 1.22m (12 ft x 4 ft) pre-consolidated reinforced laminate (RTL) utilising either woven carbon or E-glass to the customer's designated ply count and orientation. High strength and intermediate modulus carbon UD tape versions are offered in a standard 152 mm (6 inch) width or alternative 305 mm widths (12 inch). Alternative narrower slit widths for ATL processing may be available through secondary slitting.

In addition, lightning strike material can be incorporated on laminates and the laminates can be textured. By utilizing preconsolidated sheets and avoiding hand lamination, the customer can significantly reduce the cycle time required to produce a finished part. In addition, thermoplastics have the unique capability of allowing parts to be welded, folded, etc., to facilitate lower part count structures.

TYPICAL PROPERTIES OF NEAT RESIN

Specific gravity	1.35 g/cc
T _g	90°C (194°F)
Melt temperature (T _m).....	280°C (536°F)
Dielectric constant.....	3.20 at 1 MHz
Loss tangent.....	0.0013 at 1 MHz
Moisture absorption	0.02%
Flammability.....	V-0
Tensile strength.....	90.3 MPa (13.1 ksi)
Tensile modulus	3,800 MPa (0.551 Msi)
Elongation at yield	3%
Poisson's ratio	0.36
Compression strength.....	148 MPa (21.5 ksi)
Compression modulus.....	2,965 MPa (0.43 Msi)
Flexural strength	125 MPa (18.1 ksi)
Flexural modulus.....	3,725 MPa (0.54 Msi)
Izod unnotched	199 kJ/m ² (94.6 ft-lb/in ²)
Izod notched.....	15.6 kJ/m ² (7.4 ft-lb/in ²)
CTE	52.2 ppm/°C (29 ppm/°F)
Thermal conductivity.....	0.19 W/m-°K
Outgassing TML.....	0.04%
Outgassing CVCM.....	0.00%
WVR	0.00%
Fluid resistance.....	Excellent

PRODUCT DATASHEET



TENCATE ADVANCED COMPOSITES

TenCate Cetex® TC1100 PPS resin system

MECHANICAL PROPERTIES - TENCATE CETEX® TC1100 HIGH STRENGTH UD TAPE

Carbon AS4A 12K UD, 221 gsm FAW, 34% RC (59% fibre by volume)

Property	Condition	Test Method	Result	
Tensile strength (0°)	RTD	ASTM D 3039	294 ksi	2020 MPa
Tensile modulus (0°)	RTD	ASTM D 3039	19.5 Msi	134 GPa
Poisson's ratio	RTD	ASTM D 3039	0.33	
Tensile strength (90°)	RTD	ASTM D 3039	5.7 ksi	39 MPa
Tensile modulus (90°)	RTD	ASTM D 3039	1.4 Msi	10 GPa
Compressive strength (0°)	RTD	ASTM D 6641	160 ksi	1100 MPa
Compressive modulus (0°)	RTD	ASTM D 6641	17 Msi	117 GPa
In Plane Shear Strength (±45° tension)	RTD	ASTM D 3518	11.9 ksi	82 MPa
In Plane Shear Modulus (±45° tension)	RTD	ASTM D 3518	.50 Msi	3.5 GPa
Flexural strength (90°)	RTD	ASTM D 790	9.9 ksi	68 MPa
Open hole compressive strength	RTD	ASTM D 6484	38.7 ksi	267 MPa
Compression after impact after 270 in-lb impact (30.5 J)	RTD	ASTM D 7137	31.4 ksi	216 MPa

⁽¹⁾ Consolidated ply thickness average is 0.21 mm (.0082")

⁽²⁾ Density is 1.6 g/cm³ (0.058 lb/in³)

MECHANICAL PROPERTIES - TENCATE CETEX® TC1100 INTERMEDIATE MODULUS UD TAPE

Carbon IM7 12K UD, 146 gsm FAW, 34% RC, (59% fibre by volume)

Property	Condition	Test Method	Result	
Tensile strength (0°)	RTD	ASTM D 3039	400 ksi	2760 MPa
Tensile modulus (0°)	RTD	ASTM D 3039	22.1 Msi	152 GPa
Tensile strength (90°)	RTD	ASTM D 3039	5.7 ksi	39 MPa
Tensile modulus (90°)	RTD	ASTM D 3039	1.4 Msi	10 GPa
Compressive strength (0°)	RTD	ASTM D 6641	186 ksi	1280 MPa
Compressive modulus (0°)	RTD	ASTM D 6641	18 Msi	124 GPa
Flexural strength (90°)	RTD	ASTM D 790	9.5 ksi	65 MPa

Prepreg aeral weight 218gsm

PRODUCT DATASHEET



TENCATE ADVANCED COMPOSITES

TenCate Cetex® TC1100 PPS resin system

LAMINATE DATA USED E-GLASS 7781, 296GSM FAW, 37% RC (47.5% BY VOLUME)

Specific gravity 1.92 g/cc, T_g 90°C, T_m 280°C

Property	Condition/Result		Condition/Result		Condition/Result		Condition/Result		Condition/Result	
Tensile strength 0°	CTD	65.6 ksi (452 MPa)	RTD	49.3 ksi (339 MPa)	ETD	40.5 ksi (279 MPa)	ETW	41.9 ksi (289 MPa)	ETW ⁽²⁾	35.7 ksi (246 MPa)
Tensile strength 90°	CTD	64.8 ksi (447 MPa)	RTD	48.3 ksi (333 MPa)	ETD	40.7 ksi (281 MPa)	ETW	41.8 ksi (288 MPa)	ETW ⁽²⁾	39.6 ksi (273 MPa)
Tensile modulus 0°	CTD	3.2 Msi (22.1 GPa)	RTD	3.1 Msi (21.4 GPa)	ETD	2.9 Msi (20.0 GPa)	ETW	3 Msi (20.7 GPa)	ETW ⁽²⁾	2.8 Msi (19.3 GPa)
Tensile modulus 90°	CTD	3 Msi (20.7 GPa)	RTD	2.9 Msi (20.0 GPa)	ETD	2.7 Msi (18.6 GPa)	ETW	2.8 Msi (19.3 GPa)	ETW ⁽²⁾	2.6 Msi (17.9 GPa)
Compressive strength 0°	CTD	82.1 ksi (566 MPa)	RTD	61.6 ksi (425 MPa)	ETD	43 ksi (297 MPa)	ETW	33.4 ksi (230 MPa)	ETW ⁽²⁾	24.4 ksi (168 MPa)
Compressive strength 90°	CTD	55.7 ksi (384 MPa)	RTD	42.8 ksi (295 MPa)	ETD	29.4 ksi (203 MPa)	ETW	22.6 ksi (156 MPa)	ETW ⁽²⁾	16.9 ksi (117 MPa)
Compressive modulus 0°	CTD	3.8 Msi (26.2 GPa)	RTD	3.7 Msi (25.5 GPa)	ETD	3.2 Msi (22.1 GPa)	ETW	3.1 Msi (21.4 GPa)	ETW ⁽²⁾	2.9 Msi (20.0 GPa)
Compressive modulus 90°	CTD	3.6 Msi (24.8 GPa)	RTD	3.5 Msi (24.1 GPa)	ETD	2.9 Msi (20.0 GPa)	ETW	2.9 Msi (20.0 GPa)	ETW ⁽²⁾	2.5 Msi (17.2 GPa)
In-Plane Shear Strength	CTD	15.8 ksi (109 MPa)	RTD	11.6 ksi (80.0 MPa)	ETD	8.6 ksi (59.3 MPa)	ETW	9.8 ksi (67.6 MPa)	ETW ⁽²⁾	9.1 ksi (62.7 MPa)
In-Plane Shear Modulus	CTD	0.712 Msi (4.91 GPa)	RTD	0.539 Msi (3.71 GPa)	ETD	0.247 Msi (1.71 GPa)	ETW	0.208 Msi (1.44 GPa)	ETW ⁽²⁾	0.109 Msi (0.752 GPa)
Flexural strength 0°			RTD	74.2 ksi (512 MPa)						
Flexural strength 90°			RTD	56.6 ksi (390 MPa)						
Flexural modulus 0°			RTD	3.3 Msi (22.8 GPa)						
Flexural modulus 90°			RTD	2.9 Msi (20.0 GPa)						
Open hole tensile strength			RTD	23 ksi (159 MPa)			ETW	19.6 ksi (135 MPa)		
Open hole compressive strength			RTD	26.5 ksi (183 MPa)			ETW	16 ksi (110 MPa)		
Bearing strength yield			RTD	46.1 ksi (318 MPa)			ETW	26.7 ksi (184 MPa)		
Bearing strength ultimate			RTD	74.8 ksi (516 MPa)			ETW	55.6 ksi (383 MPa)		
Compression after impact			RTD	24.8 ksi (171 MPa)						

CTD = 55°C / 67°F

ETD = 23°C / 73°F at 50% RH ETD = 80°C / 176°F

ETW = 80°C / 176°F conditioned at 70°C / 158°F at 85% RH

ETW⁽²⁾ = 100°C / 212°F conditioned at 70°C / 158°F at 85% RH

Average results according to Mil-R-17; test methods vary

FLAMMABILITY PROPERTIES

	OSU		Flammability			SMOKE (4 min)		TOXICITY						
	Heat Release	Release Rate	Burn Length	After Flame	Drip Flame	Non-flaming	Flaming	HCN	CO	NOx	SO2	HF	HCl	HBr
5 plies of 7781 / PEI	14	21	1.9 mm	0sec	N/D									
4 plies of 3k PW / PPS								9.03	9		1	17	1	1

Flammability & Heat Release - FAR 25.853.
Smoke Density & Toxicity - ATS 1000.001

PRODUCT DATASHEET



TENCATE ADVANCED COMPOSITES

TenCate Cetex® TC1100 PPS Resin System

LAMINATE DATA USED CARBON T300 3K, 5HS, 280GSM FAW, 43% RC (50% BY VOLUME)

Specific gravity 1.55 g/cc, T_g 90°C, T_m 280°C

Property	Condition/Result		Condition/Result		Condition/Result		Condition/Result		Condition/Result	
Tensile strength 0°	CTD	115 ksi (790 MPa)	RTD	110 ksi (757 MPa)	ETD	106 ksi (730 MPa)	ETW	110 ksi (756 MPa)	ETW ⁽²⁾	96 ksi (665 MPa)
Tensile strength 90°	CTD	109 ksi (750 MPa)	RTD	109 ksi (754 MPa)	ETD	93.6 ksi (645 MPa)	ETW	101 ksi (698 MPa)	ETW ⁽²⁾	94 ksi (650 MPa)
Tensile modulus 0°	CTD	7.7 Msi (53.1 GPa)	RTD	8.1 Msi (55.8 GPa)	ETD	8.2 Msi (56.5 GPa)	ETW	8.2 Msi (56.5 GPa)	ETW ⁽²⁾	7.8 Msi (53.7 GPa)
Tensile modulus 90°	CTD	7.6 Msi (52.4 GPa)	RTD	7.8 Msi (53.8 GPa)	ETD	7.6 Msi (52.4 GPa)	ETW	7.6 Msi (52.4 GPa)	ETW ⁽²⁾	6.5 Msi (45.2 GPa)
Compressive strength 0°	CTD	98 ksi (676 MPa)	RTD	93.3 ksi (643 MPa)	ETD	80.9 ksi (558 MPa)	ETW	83.8 ksi (577 MPa)		
Compressive strength 90°	CTD	101 ksi (698 MPa)	RTD	92.4 ksi (637 MPa)	ETD	76.3 ksi (526 MPa)	ETW	77.5 ksi (534 MPa)		
Compressive modulus 0°	CTD	7.2 Msi (49.6 GPa)	RTD	7.5 Msi (51.7 GPa)	ETD	7.5 ksi (51.7 GPa)	ETW	7.5 Msi (51.7 GPa)		
Compressive modulus 90°	CTD	7.2 Msi (49.6 GPa)	RTD	7.5 Msi (51.7 GPa)	ETD	7.4 ksi (51.0 GPa)	ETW	7.4 Msi (51.0 GPa)		
In-Plane Shear Strength	CTD	19 ksi (131 MPa)	RTD	17.2 ksi (119 MPa)	ETD	15.7 ksi (108 MPa)	ETW	15.1 ksi (104 MPa)		
In-Plane Shear Modulus	CTD	0.642 Msi (4.43 GPa)	RTD	0.586 Msi (4.04 GPa)	ETD	0.384 Msi (2.65 GPa)	ETW	0.435 Msi (3.00 GPa)		
Flexural strength 0°	CTD	151 ksi (1043 MPa)	RTD	149 ksi (1027 MPa)	ETD	138 ksi (954 MPa)	ETW	142 ksi (977 MPa)		
Flexural strength 90°	CTD	121 ksi (834 MPa)	RTD	121 ksi (831 MPa)	ETD	115 ksi (794 MPa)	ETW	107 ksi (739 MPa)		
Flexural modulus 0°	CTD	8.6 Msi (59.3 GPa)	RTD	8.7 Msi (60.0 GPa)	ETD	8.4 Msi (57.9 GPa)	ETW	8.7 Msi (60.0 GPa)		
Flexural modulus 90°	CTD	6.3 Msi (43.4 GPa)	RTD	6.5 Msi (44.8 GPa)	ETD	6.5 Msi (44.8 GPa)	ETW	6.4 Msi (44.1 GPa)		
Open hole tensile strength	CTD	41.4 ksi (285 MPa)	RTD	40.4 ksi (279 MPa)			ETW	39.1 ksi (270 MPa)		
Open hole compressive strength	CTD	39.5 ksi (272 MPa)	RTD	37.1 ksi (256 MPa)			ETW	33.7 ksi (232 MPa)		
Bearing strength yield	CTD	71.2 ksi (491 MPa)	RTD	65.8 ksi (454 MPa)			ETW	59.9 ksi (413 MPa)		
Bearing strength ultimate	CTD	122 ksi (838 MPa)	RTD	122 ksi (844 MPa)			ETW	122 ksi (838 MPa)		
Compression after impact	CTD	32.3 ksi (223 MPa)	RTD	31.2 ksi (215 MPa)			ETW	31.6 ksi (218 MPa)		

CTD = 55°C / 67°F

ETD = 23°C / 73°F at 50% RH

ETD = 80°C / 176°F

ETW = 80°C / 176°F conditioned at 70°C / 158°F at 85% RH

ETW⁽²⁾ = 100°C / 212°F conditioned at 70°C / 158°F at 85% RH

TenCate Cetex[®] TC1100 PPS resin system

Processing guidelines for TenCate Cetex[®] TC1100 thermoplastic composite materials

TenCate Cetex[®] TC1100 thermoplastic composite materials from TenCate are processed by heating the material above the PPS melting point and moulding it and cooling it under pressure to the desired shape. Because no chemical change occurs to the PPS matrix, processing is very rapid. The quick easy processing of TenCate Cetex[®] materials is also made possible because of the rapid crystallization rate of the PPS matrix. The key thermal processing parameters are:

Melt temperature (T_m)..... 560°F (293°C)
Typical processing temperature..... 625°F (330°C)

TenCate can also produce TenCate Cetex[®] towpregs & simple profiles (round rods, ovals, rectangles, etc.). TenCate also has the capability to chop the towpregs & simple profiles into discrete length long fibre thermoplastic type materials for injection or compression moulding type processes.

Automated Processes

Below are several examples of automated processes that are utilized and available in the market today. Both processes utilize similar premises in that they eliminate the need for autoclave consolidation of thermoplastic composite parts, thereby dramatically reducing the cost of producing continuous fibre composite structures.

1. Fibre placement with in situ consolidation

This process utilizes narrow width tapes typically 6 – 25 mm (0.25 – 1 inches) as its composite material medium and lays down, heats via hot gas, laser, or other heating methods and consolidates the composite material onto the tool, in situ, without the need for further consolidation processes.

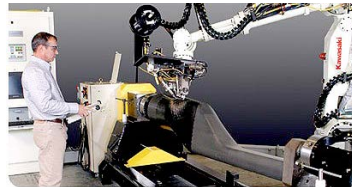


Photo courtesy of Automated Dynamics
www.automateddynamics.com



Photo courtesy of AFPT
www.afpt.de

2. Rapid lamination / forming

This process uses wider UD tapes typically 50 mm (≥ 2 inches) width to rapidly lay down and consolidate the thermoplastic composite material into an engineered laminate structure that can then be transformed into parts via a secondary compression thermoforming process.

Automated tape laying of tailored blank followed by consolidation

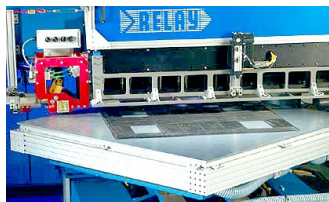


Photo courtesy of FibreForge
www.fibreforge.com

The consolidated flat laminate is then thermoformed to a 3D final shape



Photo courtesy of TenCate

TenCate Cetex® TC1100 PPS resin system

3. Continuous compression moulding

In this multi-step process, multiple plies of thermoplastic UD tape is heated in a mould and pressed into a laminate. This laminate is then pressed into a mould and thermoformed to the desired profile. A final step then moulds with heat and gentle pressure into the curved profile through a process called continuous compression moulding. Items such as clips, rails, beams and profile are manufactured in this type of process.



Photo courtesy of ACM / Xperion Aerospace
www.acm-fn.de

Press lamination: A laminate can be press moulded from any TenCate Cetex® prepreg by stacking two or more plies in the desired orientation into a picture frame mould, transferring the assembly to a heated platen press where it is brought to approximately 320°C (610°F) at contact pressure until the material reaches temperature. The pressure should then be increased to 7-21 bar (100-400 psi) and held for approximately 15-30 minutes.

Autoclave lamination: Autoclave consolidation is used for fabricating laminates from any TenCate Cetex® prepreg tape. Individual layers are stacked in the desired orientation and vacuum bagged (vacuum should be maintained throughout the entire process). A high temperature bagging material, such as Kapton polyimide should be used. The assembly should then be placed in the autoclave and brought to approximately 320°C (610°F), at which time the pressure is increased from ambient to 7-10 bar (100-150 psi) and maintained for around 20-30 minutes. The part should then be cooled to room temperature at a 5-20°C cool down rate to maintain crystallinity.

Thermoforming laminates into shapes: Thermoforming is used to convert a flat consolidated continuous fibre reinforced laminate into a complex shape with no change in starting laminate thickness. The laminate should be heated to around 320°C (610°F) in an infrared or similar oven and then quickly transferred to a matched core/cavity mould where it can be formed at 10-40 bar (150-600 psi). For optimum properties and formability, heating of the composite laminate should take no longer than 8 minutes. Overall part production cycle times are between 2-10 minutes, depending on material thickness and part geometry. Production tooling consists of machined aluminum halves, one that has a compliant layer of cast silicone, and an associated laminate tensioning system to prevent wrinkling within the part being thermoformed.

Cutting and machining: Thermoplastic composite laminates and thermoformed parts can be machined with feed rates and tip speeds similar to those used when machining brass. The following are some general guidelines:

Circular saw:	Diamond-grit-edge blade of 220 grit. Blade speed: 1830 mpm (6000 fpm) with water or soap solution as coolant. Feed rates depend on thickness.
Turning operations:	Cutting speed: 105-120 mpm (350-400 fpm) for high speed tools, 180-455 mpm (1500-2500 fpm) for Stellite or carbide tools, and 600-1200 mpm (2000-4000 fpm) for diamond tools
Milling operations:	Tip speed: 75-135 mpm (250-450 fpm) for carbide and diamond tools Plunge feed rate: 0.15-0.30 mpm (0.5-1 fpm)

TenCate Cetex[®] TC1100 PPS resin system

Drilling operations:	Feed rate: 0.2-0.4 mm/rev (0.008-0.016 in/rev) Drill speed: 45-90 mpm (150-300 fpm) Drill point angles: 60° for thin parts, 90° for thick parts Clearance angle: 15°
Tapping:	Tool rake of 0° to 5° negative
Shearing:	Thicknesses up to 3.2 mm (0.125 inch)

Joining: Thermoplastic composites can be joined via mechanical fasteners, adhesive bonding, or fusion welding.

Strong adhesive bonds are possible with epoxy adhesives when PPS surfaces are cleaned with a suitable degreasing solvent (i.e. MEK), abrasive treatment (i.e., abrasion wheels, sand paper, or grit blasted with #100 or #200 Aluminum Oxide). The surface energy may also be enhanced by flame/corona treatment, chromic acid etching, laser treatment, or plasma techniques. Epoxy films or pastes with cure temperatures up to 177°C (350°F), anaerobics, silicone sealers, and cyanoacrylates are effective adhesives depending on specific requirements.

TenCate Cetex[®] TC1100 based composites may also be bonded using conventional thermoplastic welding techniques. PPS based materials have very high melt temperatures and considerable amounts of energy must be put into the interface to achieve a good bond. Satisfactory results have also been obtained using induction or resistance welding.

Painting: TenCate Cetex[®] TC1100 composite surfaces can be painted with a variety of products. It is recommended that a paintable (non-silicone) mould release be used, if possible, during the moulding of all surfaces to be painted. If a silicone or Teflon mould release is used during moulding, laminate and part surfaces may require abrasion prior to painting. In all cases, surfaces must be wiped with a suitable solvent (e.g. MEK, DuPont 3919S) to remove oils, release agents, or other impurities.

Health & Safety: Health and safety information on handling and processing TenCate composite materials is described in a Safety Data Sheet. To obtain this or any other information about TenCate PPS thermoplastic composite materials, contact your local TenCate Advanced Composites office.

Revised 09/2016

All data given is based on representative samples of the materials in question. Since the method and circumstances under which these materials are processed and tested are key to their performance, and TenCate Advanced Composites has no assurance of how its customers will use the material, the corporation cannot guarantee these properties.

TenCate, [TenCate] Cetex[®] and all other related characters, logos and trade names are claims and/or registered trademarks of Koninklijke Ten Cate N.V. and/or its subsidiaries in one or more countries. Use of trademarks, trade names and other IP rights of TenCate without express written approval of TenCate is strictly prohibited.

Page 7 of 7 CETEX_TC1100_V4_DS_090116

PRODUCT DATA SHEET



TENCATE ADVANCED COMPOSITES

TenCate Cetex® TC1220 PEEK Thermoplastic Unidirectional Tape

PRODUCT TYPE

PEEK Thermoplastic Unidirectional Tape

FEATURES

- Outstanding compression after impact performance
- Excellent impact resistance
- Fully impregnated low void content tapes

TYPICAL APPLICATIONS

- Primary Aircraft Structure
- Secondary Aircraft Structure
- Access Panels, Rib Stiffeners, Brackets, Conduit, Flooring

T_g 290°F (143°C)

T_m 649°F (343°C)

SHELF LIFE

Indefinite at 77°F/25°C

PRODUCT DESCRIPTION

TenCate Cetex TC1220 is a high CAI strength PEEK thermoplastic unidirectional tape. It offers excellent resistance to solvents, high impact strength and structural properties. TenCate Cetex TC1220 is also flame retardant and is offered as a unitape with AS-4D and intermediate modulus, IM-7, carbon fiber.

TENCATE CETEX TC1220 PRODUCT BENEFITS/FEATURES

- **Outstanding compression after impact strength: 50 ksi/345 MPa**
- Low moisture absorption for good hot/wet strength retention
- Robust processing and low void content unitapes
- Produced in 6 or 12 inch tape widths (Also offered in slit widths via secondary slitting services)
- Excellent structural properties

TENCATE CETEX TC1220 PEEK, AS-4D

146 gsm FAW, 34% resin content, 59% Fiber by volume. prepreg areal weight of 218 gsm.

The data below represents limited lot data.

Property	Condition	Method	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D3039	348 ksi	2400 MPa
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D3039	21.1 Msi	146 GPa
Poisson's Ratio	RTD	ASTM D3039	0.33	
Tensile Strength 90°	RTD	ASTM D3039	12.5 ksi	86 MPa
Tensile Modulus 90°	RTD	ASTM D3039	1.4 Msi	10 GPa
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D6641	188 ksi	1300 MPa
Compressive Modulus 0°	RTD	ASTM D6641	18 Msi	124 GPa
In Plane Shear Strength (±45° Tension)	RTD	ASTM D3518	22 ksi	152 MPa
In Plane Shear Modulus (±45° Tension)	RTD	ASTM D3518	0.75 Msi	5.2 GPa
Flexural Strength 90°	RTD	ASTM D790	23 ksi	158 MPa
Open Hole Tensile Strength	RTD	ASTM D5766	61.6 ksi	424 MPa
Open Hole Comp. Strength	RTD	ASTM D6468	46.4 ksi	320 MPa
Interlaminar Shear Strength (SBS) 0°/ 90°	RTD	ASTM D2344	13.7 ksi	94 MPa
Compression After Impact after 270 in-lb impact (30.5J)	RTD	ASTM D7137	50 ksi	344 MPa

TENCATE CETEX TC1220 PEEK, IM-7

146 gsm FAW, 34% resin content, 59% Fiber by volume. prepreg areal weight of 218 gsm.

The data below represents limited lot data.

Property	Condition	Method	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D 3039	400 ksi	2760 MPa
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D 3039	25.0 Msi	172 GPa
Tensile Strength 90°	RTD	ASTM D 3039	12.5 ksi	86 MPa
Tensile Modulus 90°	RTD	ASTM D 3039	1.5 Msi	10 GPa
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D6641	186 ksi	1280 MPa
Compressive Modulus 0°	RTD	ASTM D6641	18.2 Msi	125 GPa
Flexural Strength 90°	RTD	ASTM D790	23.5 ksi	162 MPa
Interlaminar Shear Strength (SBS) 0°/ 90°	RTD	ASTM D2344	13.9 ksi	95.8 MPa
Compression After Impact after 270 in-lb impact (30.5 J)	RTD	ASTM D7137	53 ksi	365 MPa

PRODUCT DATA SHEET



TENCATE ADVANCED COMPOSITES

TenCate Cetex® TC1220 PEEK Thermoplastic Unidirectional Tape

Processing Guidelines for TenCate Cetex® TC1220 (Polyetheretherketone) Thermoplastic Composite Materials

TenCate Cetex® TC1220 thermoplastic composite materials from TenCate are processed by heating the material above the PEEK melting point, molding it and cooling it under pressure to the desired shape. Because no chemical change occurs to the PEEK matrix, processing is very rapid. The quick easy processing of TenCate Cetex materials is also made possible because of the rapid crystallization rate of the PEEK matrix. The key thermal processing parameters are:

Melt Temperature 649°F (343°C)
Typical Processing Temperature 700-750°F (370-400°C)

TenCate can also produce TenCate Cetex slit tape & simple profiles (round rods, ovals, rectangles, etc.). TenCate also has the capability to chop the slit tape & simple profiles into discrete length long fiber thermoplastic type materials for injection or compression molding type processes.

AUTOMATED PROCESSES

Below are several examples of automated processes that are utilized and available in the market today. The three processes utilize similar premises in that they eliminate the need for autoclave consolidation of thermoplastic composite parts, thereby dramatically reducing the cost and time of producing continuous fiber composite structures.

1. Fiber Placement with In Situ Consolidation

This process utilizes narrow width tapes typically 0.25 – 1 inches (6 – 25 mm) as its composite material medium and lays down, heats via hot gas, laser, or other heating methods and consolidates the composite material onto the tool, in situ, without the need for further consolidation processes.



Photo courtesy of Automated Dynamics
www.automateddynamics.com



Photo courtesy of AFPT
www.afpt.biz/

2. Rapid Lamination / Forming

This process uses wider UD tapes typically ≥ 2 inches (50 mm) width automated tape laying equipment to rapidly lay down and consolidate the thermoplastic composite material into an engineered laminate structure that can then be transformed into parts via a secondary compression thermoforming process.

Automated tape laying of tailored blank followed by consolidation.

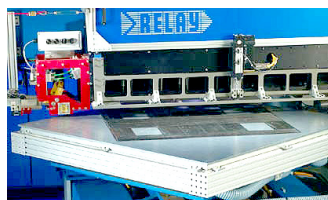


Photo Courtesy of FiberForge
www.fiberforge.com

The consolidated flat laminate is first consolidated, then thermoformed to a 3-D final shape.



Photo courtesy of TenCate

TenCate Cetex[®] TC1220 PEEK Thermoplastic Unidirectional Tape

3. Continuous Compression Molding

In this multi-step process, multiple plies of thermoplastic unitape are fed into a continuous process through a heated mold and pressed into a laminate. This laminate is then pressed into a mold and thermoformed to the desired profile. A final step then molds with heat and pressure into the curved profile through a process called continuous compression molding. Items such as clips, rails, beams and profiles are manufactured in this type of process.

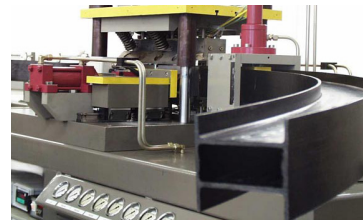


Photo Courtesy of ACM/Xperion Aerospace
www.acm-fn.de

Press Lamination: A laminate can be fabricated from any TenCate Cetex prepreg by stacking two or more plies in the desired orientation into a picture frame mold, transferring the assembly to a heated platen press where it is brought to approximately 700-750°F (370-400°C) at contact pressure until the material reaches temperature. The pressure should then be increased to 100-300 psi (7-21 bar) and held for approximately 15-30 minutes. The part should then be cooled to room temperature at a 5-20°C cool down rate to maintain the crystalline nature of PEEK for solvent resistance.

Autoclave Lamination: Autoclave consolidation maybe used for fabricating laminates from any TenCate Cetex prepreg tape. Individual layers are stacked in the desired orientation and vacuum bagged (vacuum should be maintained throughout the entire process). A high temperature bagging material, such as Kapton or polyimide should be used. The assembly should then be placed in the autoclave and brought to approximately 700-750°F (370-400°C), at which time the pressure is increased from ambient to 100-300 psi (7-21 bar) and maintained for around 5-30 minutes. The part should then be cooled to room temperature at a 5-20°C cool down rate to maintain the crystalline nature of PEEK for solvent resistance.

Thermoforming Laminates into Shapes: Thermoforming is used to convert a flat consolidated continuous fiber reinforced laminate into a complex shape with no change in starting laminate thickness. The laminate should be heated to around 700-750°F (370-400°C) in an infrared or similar oven, and then quickly transferred to a matched core/cavity mold where it can be formed at 150-600 psi (10-40 bar). For optimum properties and formability, heating of the composite laminate should take no longer than 8 minutes. Overall part production cycle times are between 2-10 minutes, depending on material thickness and part geometry. Production tooling consists of machined aluminum halves, one that has a compliant layer of cast silicone, and an associated laminate tensioning system to prevent wrinkling within the part being thermoformed.

PRODUCT DATA SHEET



TENCATE ADVANCED COMPOSITES

TenCate Cetex® TC1220 PEEK Thermoplastic Unidirectional Tape

Cutting and Machining: Thermoplastic composite laminates and thermoformed parts can be machined with feed rates and tip speeds similar to those used when machining brass.

The following are some general guidelines:

Circular Saw:	Diamond-grit-edge blade of 220 grit. Blade speed: 6000 fpm (1830 mpm) with water or soap solution as coolant. Feed rates depend on thickness.
Turning Operations:	Cutting Speed: 350-400 fpm (105-120 mpm) for high speed tools, 1500-2500 fpm (180-455 mpm) for Stellite or carbide tools, and 2000-4000 fpm (600-1200 mpm) for diamond tools
Milling Operations:	Tip speed: 250-450 fpm (75-135 mpm) for carbide and diamond tools Plunge feed rate: 0.5-1 fpm (0.15-0.30 mpm)
Drilling Operations:	Feed Rate: 0.008-0.016 in/rev (0.2-0.4 mm/rev) Drill speed: 150-300 fpm (45-90 mpm) Drill point angles: 60° for thin parts, 90° for thick parts Clearance angle: 15°
Tapping:	Tool rake of 0° to 5° negative
Shearing:	Thicknesses up to 0.125 inch (3.2 mm)

Joining: Thermoplastic composites can be joined via mechanical fasteners, adhesive bonding, or fusion welding. Fusion welding via resistance or inductive welding is common preferred method of joining thermoplastics.

Strong adhesive bonds are possible with epoxy adhesives when PEEK surfaces are cleaned with a suitable degreasing solvent (i.e. MEK), abrasive treatment (i.e., abrasion wheels, sand paper, or grit blasted with #100 or #200 Aluminum Oxide). The surface energy may also be enhanced by flame/corona treatment, chromic acid etching, laser treatment, or plasma techniques. Epoxy films or pastes with cure temperatures up to 350°F (177°C), anaerobics, silicone sealers, and cyanoacrylates are effective adhesives depending on specific requirements.

TenCate Cetex® TC1220 based composites may also be bonded using conventional thermoplastic welding techniques. PEEK based materials have very high melt temperatures and considerable amounts of energy must be put into the interface to achieve a good bond. Satisfactory results have also been obtained using induction or resistance welding.

Painting: TenCate Cetex® TC1220 composite surfaces can be painted with a variety of products. It is recommended that a paintable (non-silicone) mold release be used, if possible, during the molding of all surfaces to be painted. If a silicone or Teflon mold release is used during molding, laminate and part surfaces may require abrasion prior to painting. In all cases, surfaces must be wiped with a suitable solvent to remove oils, release agents, or other impurities.

Health & Safety: Health and safety information on handling and processing TenCate composite materials is described in a Material Safety Data Sheet available from TenCate Advanced Composites USA, Inc. To obtain this or any other information about TenCate PEEK thermoplastic composite materials, contact: TenCate Advanced Composites USA, Inc. at the addresses and telephone numbers below, or our website at www.tencateadvancedcomposites.com.

Revised 07/2015

TenCate Cetex® is a registered trademark of Royal TenCate. All data given is based on representative samples of the materials in question. Since the method and circumstances under which these materials are processed and tested are key to their performance, and TenCate Advanced Composites has no assurance of how its customers will use the material, the corporation cannot guarantee these properties.

Page 4 of 4

CETEX-TC1220_DS_071515

TENCATE ADVANCED COMPOSITES

18410 Butterfield Blvd.
Morgan Hill, CA 95037 USA
Tel: +1 408 776 0700
Fax: +1 408 776 0107

2450 Cordelia Road
Fairfield, CA 94534 USA
Tel: +1 707 359 3400
Fax: +1 707 359 3495

Amber Drive, Langley Mill
Nottingham, NG16 4BE UK
Tel: +44 (0)1773 530899
Fax: +44 (0)1773 768687

G. van der Muelenweg 2
7443 PV Nijverdal NL
Tel: +31 548 633 933
Fax: +31 548 633 299

www.tencate.com
www.tencateadvancedcomposites.com
www.tencateindustrialcomposites.com
info@tcac-usa.com (USA)
advancedcomposites.europe@tencate.com (Europe)