



## Projeto e modelação numérica de equipamento para ensaios mixed-mode bending (MMB) de adesivos estruturais

**ALICE RAQUEL FERREIRA SOARES**

novembro de 2021

# **PROJETO E MODELAÇÃO NUMÉRICA DE EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS MIXED-MODE BENDING (MMB) DE ADESIVOS ESTRUTURAIS**

Alice Raquel Ferreira Soares  
1120204

**2021**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica





# **PROJETO E MODELAÇÃO NUMÉRICA DE EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS MIXED-MODE BENDING (MMB) DE ADESIVOS ESTRUTURAIS**

Alice Raquel Ferreira Soares  
1120204

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 do Doutor Filipe José Palhares Chaves, do Mestre José Manuel Fernandes da Silva Fecheira e do Doutor Francisco José Gomes da Silva.

**2021**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Luís Miguel Pereira Durão  
Professor Coordenador, ISEP

## **Orientador**

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho  
Professor Adjunto, ISEP

## **Coorientadores**

Doutor Filipe José Palhares Chaves  
Professor Adjunto, IPCA

Mestre José Manuel Fernandes da Silva Fecheira  
Assistente Convidado, ISEP

Doutor Francisco José Gomes da Silva  
Professor Coordenador, ISEP

## **Arguente**

Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce  
Investigador, INEGI



## AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento é dirigido aos meus pais, por todo o esforço que sempre fizeram para me proporcionarem a melhor educação e formação possível. Agradeço aos meus irmãos: Andreia, que vira o mundo do avesso só para me fazer sorrir e Miguel, que me faz manter os pés assentes na terra. A ambos, agradeço por toda a paciência que têm para suportar o mau feitio da irmã do meio. Agradeço aos meus amigos e família, pelo apoio incondicional ao longo do meu percurso pessoal, académico e profissional.

Expresso o meu sincero agradecimento aos meus colegas de curso, pela partilha de tempo de estudo e diversão e, pelo espírito de interajuda que se manteve ao longo de todo este trajeto académico. Agradeço à empresa WRK, Lda e aos colegas de trabalho que estiveram ao meu lado em todas as fases do desenvolvimento desta dissertação, pela preciosa ajuda e compreensão demonstradas e, constante boa disposição. Em particular, uma sentida gratidão para com Ana, Jorge, Ju, Licínio, Quim e Carlos Lopes.

Agradeço humildemente ao Doutor Raul Campilho pela orientação irrepreensível e por toda a dedicação e disponibilidade demonstradas e ao Doutor Filipe Chaves por todo o apoio no desenvolvimento do projeto e na realização dos ensaios para a validação do equipamento estudado nesta dissertação. Agradeço ainda ao Doutor Francisco Silva e ao Mestre José Fecheira pela coorientação.

Expresso um especial e emotivo agradecimento por tudo:

- ♠ aos amigos Pedro Carvalho e Ana Margarida, que caminham ao meu lado na engenharia e em todos os momentos da minha vida;
- ♠ às amigas Andrea, Cárin, Diana, Elsa, Isabel, Laura, Mariana e Sofia.

*Uma vida resume uma história quando alguém nela se inspira.  
E uma história, enquanto alguém contá-la, continua viva  
Para me fazer sentir que a missão valeu a pena.  
Obrigada a todos.*



## PALAVRAS-CHAVE

*Mixed-Mode Bending*, juntas adesivas, adesivos estruturais, mecânica da fratura, envelope de fratura, tenacidade à fratura.

## RESUMO

Ao longo dos últimos anos a utilização das juntas adesivas tem vindo a verificar um aumento acentuado em aplicações estruturais em detrimento dos métodos tradicionais de união. Em aplicações reais, as juntas adesivas são submetidas a solicitações de modo misto I+II, o que aumenta significativamente a complexidade da previsão de resistência das juntas adesivas. De facto, os ensaios desenvolvidos para o estudo de juntas adesivas, sob carregamento em modo misto, são bastante complexos e considerados realmente relevantes para a caracterização à fratura. Existem vários ensaios de modo misto, dos quais se destaca o ensaio *Mixed-Mode Bending* (MMB) pela sua capacidade de permitir a variação do rácio de modo misto praticamente sem limitações e, desta forma, permitir analisar a influência do rácio de modo misto na resistência à fratura da junta. Contudo, apesar de existirem várias propostas de configuração MMB, o ensaio ainda é considerado complexo, sendo que algumas das soluções existentes não permitem o ensaio em materiais mais rígidos, pelo que este foi um dos principais aspetos considerados no desenvolvimento da dissertação.

Neste sentido, o desafio proposto para esta dissertação consistiu em projetar, modelar numericamente e validar experimentalmente um equipamento de ensaio MMB, para a realização de ensaios de adesivos estruturais. No trabalho experimental, foi desenvolvido um equipamento com uma configuração mais simples e versátil, que permite medir a tenacidade de juntas adesivas em vários rácios de modo misto, baseado unicamente na curva carga-deslocamento ( $P-\delta$ ) e sem a necessidade de medição do comprimento de fenda ( $a$ ). Este equipamento foi projetado e fabricado para realização de ensaios e tratamento de dados conducente à validação do funcionamento do equipamento para ensaio de adesivos, que consistiu na obtenção dos envelopes de fratura de adesivos e comparação com resultados da literatura. No trabalho numérico, a geometria do equipamento foi criada em *software* e foram realizadas as respetivas simulações, de modo a otimizar a geometria do equipamento projetado. Nomeadamente, foi efetuada uma comparação entre o equipamento de base de estudo, desenvolvido por Chaves [1], e as soluções apresentadas durante a evolução do projeto.

O equipamento desenvolvido apresenta um fácil manuseamento durante a realização de ensaios e características melhoradas ao nível da sua geometria, apesar de robusta. Este equipamento é adequado para provetes de ensaio de elevada rigidez, pelo que permite uma carga máxima de 20 kN.



## KEYWORDS

Mixed-Mode Bending, adhesive joints, structural adhesives, fracture mechanics, fracture envelope, fracture toughness.

## ABSTRACT

Over the past few years, the use of adhesive joints has seen a marked increase in structural applications at the expense of traditional joining methods. In real applications, adhesive joints are subjected to mixed mode I+II loading, which significantly increases the strength prediction complexity of adhesive joints. Actually, tests developed for the study of adhesive joints under mixed-mode loading are quite complex and considered really relevant for fracture characterization. There are several mixed-mode tests, of which the Mixed-Mode Bending (MMB) test stands out for its capacity to allow the variation of the mixed-mode ratio practically without limitations and, thus, to allow the analysis of the influence of the mixed-mode ratio on the fracture toughness of the joint. However, although there are several proposals for the MMB configuration, this test is still considered complex, and some of the current solutions do not allow performing the test on stiffer materials, so this was one of the main aspects considered in the development of the dissertation.

In this sense, the challenge proposed for this dissertation was to design, numerically model and experimentally validate a MMB test equipment for structural adhesives' testing. In the experimental work, an equipment with a simpler and more versatile configuration was developed, which allows measuring the toughness of adhesive joints in several mixed-mode ratios, based solely on the load-displacement ( $P-\delta$ ) curve and without the need of measuring the crack length ( $a$ ). This equipment was designed and manufactured to perform tests and data processing leading to the validation of the operation of the equipment for adhesive testing, which consisted in obtaining the fracture envelopes of adhesives and comparison with literature results. In the numerical work, the geometry of the equipment was created in software and the respective simulations were performed in order to optimize the geometry of the designed equipment. In particular, a comparison was made between the basic study equipment, developed by Chaves [1], and the solutions presented during the evolution of the project.

The developed equipment presents easy handling during testing and improved characteristics in terms of its geometry, although robust. This equipment is suitable for test specimens with high stiffness, allowing a maximum load of 20 kN.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões ou bidimensional
3D	Três dimensões ou tridimensional
4ENF	<i>Four-Point End-Notched Flexure</i>
AC	Acabamento superficial
ADCB	<i>Asymmetric Double-Cantilever Beam</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATDCB	<i>Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam</i>
CBBM	<i>Compliance-Based Beam Method</i>
CFRP	Polímero reforçado com fibra de carbono
COFERAC	Comércio Ferramentas Acessórios para Indústria, Lda
DB	Desbaste
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
ELS	<i>End-Loaded Split</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
FRMM	<i>Fixed-Ratio Mixed-Mode</i>
GFM	Manta de fibra de vidro
GFRP	Vidro reforçado com fibra de carbono
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MAQMAIS	Máquinas, Ferramentas e Acessórios Industriais, Lda
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos eXtendido
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MMB	<i>Mixed-Mode Bending</i>
MTS	Máquina de ensaio de tração
SLB	<i>Single-Leg Bending</i>
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>
TFFV	Técnica do fecho da fenda virtual
ZPF	Zona de Processo de Fratura

### Lista de Unidades

°	Graus
°C	Graus Celsius
g	Gramas
HB	BRINELL <i>hardness</i>
HV	VICKERS <i>hardness</i>
kg	Quilograma
kN	Quilonewton
m	Metro
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
min	Minuto
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton
Pa	Pascal

### Lista de Símbolos

€	Euro
$\Delta$	Delta
$2L$	Comprimento total do provete de ensaio
$a$	Comprimento de fenda
$a_0$	Comprimento de fenda inicial
$a_e$	Comprimento de fenda equivalente
$a_{eI}$	Comprimento de fenda equivalente em modo I
$a_{eII}$	Comprimento de fenda equivalente em modo II
$B$	Largura do provete de ensaio
$b, c$	Distâncias
$c$	Metade da espessura do provete
$c$	Posição do ponto de carregamento
$C_0$	Flexibilidade inicial medida
$C_{0corr}$	Flexibilidade inicial medida corrigida
$C_I$	Flexibilidade em modo I
$C_{II}$	Flexibilidade em modo II
Curva $G_{II}-\delta_s$	Curva taxa de libertação de energia de deformação do modo II-deslocamento em corte
Curva $G_I-\delta_n$	Curva taxa de libertação de energia de deformação do modo I-deslocamento em tração
Curva $P-\delta$	Curva carga-deslocamento
Curva- $R$	Curva de resistência
$D$	Rigidez de flexão da região não fragmentada do provete de ensaio
$D_1$	Rigidez de flexão da região fragmentada do provete de ensaio

$ds$	Incremento de comprimento ao longo do contorno
$dy$	Ponta da fenda
$E$	Módulo de elasticidade longitudinal
$E_1$	Módulo de Young
$E_{11}$	Módulo axial da viga
$E_f$	Módulo de flexão corrigido
$E_{fI}$	Módulo de flexão corrigido em modo I
$E_{fII}$	Módulo de flexão corrigido em modo II
$F$	Força aplicada ao provete de ensaio
$F_1$	Força aplicada ao aderente superior
$F_2$	Força aplicada ao aderente inferior
$G$	Taxa de libertação de energia de deformação
$G_{13}$	Módulo de corte
$G_c$	Taxa crítica de libertação de energia de deformação
$\bar{G}_c$	Tenacidade à fratura
$G_I$	Taxa de libertação de energia de deformação do modo I
$G_I/G_{II}$	Rácio de modo misto
$G_{Ic}$	Taxa crítica de libertação de energia de deformação do modo I
$\bar{G}_{Ic}$	Tenacidade à tração
$\bar{G}_{II}$	Taxa de libertação de energia de deformação do modo II
$\bar{G}_{IIc}$	Taxa crítica de libertação de energia de deformação do modo II
$\bar{G}_{IIc}$	Tenacidade ao corte
$h$	Espessura do aderente
$I$	Segundo momento da área de cada aderente
$J$	Taxa de libertação de energia de deformação não linear
$J_I$	Taxa de libertação de energia de deformação não linear para o modo I
$J_{II}$	Taxa de libertação de energia de deformação não linear para o modo II
$L$	Comprimento entre os dois pontos de contacto do braço de solitação com o provete de ensaio
$L_0$	Comprimento de sobreposição
$L_1$	Distância relativa
$m$	Fator de geometria
$m$	Massa
$M_1$ e $M_2$	Momentos fletores
$M_f$	Momento fletor
$M_I$ e $M_{II}$	Momentos
$\varnothing$	Diâmetro
$P$	Carga
$P_A, P_B, P_C$ e $P_D$	Cargas

$P_I$	Carregamento do provete de ensaio em modo I
$P_{II}$	Carregamento do provete de ensaio em modo II
$P_{m\acute{a}x}$	Carga máxima
$R$	Raio
$s_1, s_2, s_3, s_4$	Distâncias
$T$	Vetor de tração
$T_A, T_B, T_C$ e $T_D$	Trações nos pontos de aplicação de cargas
$t_n^0$	Tensão máxima de tração
$t_s^0$	Tensão máxima de corte
$u$	Vetor de deslocamento
$V$	Carga transversal de cada aderente
$W$	Densidade da energia de deformação
$\Gamma$	Contorno em torno da ponta da fenda
$\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5,$ $\Gamma_6,$ e $\Gamma_7$	Contornos
$\delta$	Deslocamento
$\delta_I$	Componente do modo I da deflexão
$\delta_{II}$	Componente do modo II da deflexão
$\delta_n$	Deslocamento em tração
$\delta_n^0$	Deslocamento máximo  tração
$\delta_s$	Deslocamento em corte
$\delta_s^0$	Deslocamento máximo ao corte
$\chi_I$	Fator de correção para a fratura no modo I
$\chi_{II}$	Fator de correção para a fratura no modo II
$\psi$	ângulo de fase nominal de carregamento
$\theta_A, \theta_B, \theta_C$ e $\theta_D$	ângulos de rotação nos pontos de aplicação das cargas

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de uma junta adesiva e seus componentes [4] .....	10
Figura 2 - Esforços e respetivas distribuições de tensões: (a) tração e compressão, (b) corte e (c) clivagem e arrancamento (adaptado de [6]) .....	12
Figura 3 - Exemplos de modos de rotura em ligações adesivas (adaptado de [2]) .....	13
Figura 4 - Exemplos de possíveis configurações de junta (adaptado de [5]).....	14
Figura 5 - Diferentes tipos de adesivos estruturais (adaptado de [7]) .....	15
Figura 6 - Junta adesiva de sobreposição analisada por Volkersen: (a) geometria e (b) diagrama de corpo livre [14] .....	17
Figura 7 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) [28] .....	20
Figura 8 - Representação das tensões pelo uso do MEFX numa junta de sobreposição simples: (a) iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (b) e crescimento dano do aderente de alumínio [28] .....	24
Figura 9 - Representação esquemática do modo puro I e do modo puro II [66] .....	26
Figura 10 - Representações esquemáticas de ensaios de caracterização à fratura nos modo I, II e misto (I+II) [67].....	27
Figura 11 - Representação esquemática do provete de ensaio DCB [70] .....	28
Figura 12 - Representação esquemática do provete de ensaio TDCB [67] .....	28
Figura 13 - Representação esquemática do provete de ensaio ENF [70].....	29
Figura 14 - Representação esquemática do provete de ensaio 4ENF [67] .....	30
Figura 15 - Representação esquemática do provete de ensaio ELS [67].....	31
Figura 16 - Representação esquemática do provete de ensaio ADCB [73] .....	31
Figura 17 - Representação esquemática do provete de ensaio ATCDB [76] .....	32
Figura 18 - Representação esquemática do provete de ensaio FRMM [78] .....	33
Figura 19 - Representação esquemática do provete de ensaio SLB [80] .....	33
Figura 20 - Fotografia do primeiro equipamento de ensaio MMB desenvolvido [82] .....	34
Figura 21 - Representação esquemática do provete de ensaio MMB [114] .....	35
Figura 22 - Representação esquemática do ensaio MMB: (a) provete de ensaio e carregamento e (b) diagrama esquemático do equipamento [81] .....	36
Figura 23 - Fotografia do equipamento de ensaio MMB redesenhado por Reeder e Crews [115] .....	37
Figura 24 - Representação esquemática do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por Fernlund e Spelt [117].....	38
Figura 25 - Fotografia do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por Chen et al. [118] .....	39
Figura 26 - Fotografia do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por Liu et al. [107] .....	39
Figura 27 - Fotografia do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por de Moura et al. [104] .....	40
Figura 28 - Fotografia do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por Chaves (adaptado de [1]) .....	41
Figura 29 - Representação esquemática do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por Pereira et al. [113].....	41
Figura 30 - Fotografia do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por Droubi et al. [106].....	42

Figura 31 - Representação esquemática da análise de sobreposição de carregamento no provete de ensaio MMB: (a) carregamento do provete de ensaio, (b) carregamento em modo I e (c) carregamento em modo II [81] .....	43
Figura 32 - Representação esquemática para a determinação da flexibilidade do provete de ensaio MMB [120] .....	47
Figura 33 - Representação esquemática de ZPF e conceito de $a_e$ [43] .....	48
Figura 34 - Desenvolvimento do contorno de integral-J na configuração do provete de ensaio MMB: (a) seleção do caminho de integração na configuração não deformada e (b) ângulos de rotação na configuração deformada [136] .....	51
Figura 35 - Parametrização da simulação - equipamento desenvolvido por Chaves [1]: (a) força aplicada e condições fronteira e (b) malha gerada .....	62
Figura 36 - Tensões equivalentes de von Mises do equipamento desenvolvido por Chaves [1] .....	63
Figura 37 - Deslocamentos resultantes do equipamento desenvolvido por Chaves [1] .....	63
Figura 38 - Coeficiente de segurança do equipamento desenvolvido por Chaves [1] .....	63
Figura 39 - Ideias de melhoria propostas por Chaves [1] .....	64
Figura 40 - Representação esquemática do esboço inicial do equipamento .....	67
Figura 41 - Representação final do equipamento MMB desenvolvido: (a) vista colapsada e (b) vista explodida .....	67
Figura 42 - Representação esquemática dos mecanismos constituintes do equipamento MMB desenvolvido e respetiva lista de componentes .....	68
Figura 43 - Fotografia da máquina de ensaio de tração AGX™-100 .....	69
Figura 44 - Representação esquemática das variáveis geométricas do equipamento MMB desenvolvido .....	71
Figura 45 - Representação esquemática da análise de sobreposição de cargas no provete de ensaio MMB [1] .....	71
Figura 46 - Parametrização da simulação - solução inicial: (a) força aplicada e condições fronteira e (b) malha gerada .....	75
Figura 47 - Tensões equivalentes de von Mises da solução inicial .....	76
Figura 48 - Deslocamentos resultantes da solução inicial .....	76
Figura 49 - Coeficiente de segurança da solução inicial .....	77
Figura 50 - Parametrização da simulação - solução final: (a) força aplicada e condições fronteira e (b) malha gerada .....	78
Figura 51 - Tensões equivalentes de von Mises da solução final .....	79
Figura 52 - Deslocamentos resultantes da solução final .....	79
Figura 53 - Coeficiente de segurança da solução final .....	79
Figura 54 - Representação esquemática do facejamento do topo dos pinos $\varnothing 6 \times 100$ mm .....	84
Figura 55 - Vista explodida do equipamento MMB desenvolvido .....	86
Figura 56 - Fotografia do componente EEMMB-009 com pormenor de acabamento superficial .....	86
Figura 57 - Fotografia da máquina CNC VF-2 .....	87
Figura 58 - Representação do desenho de fabrico do componente EEMMB-006 .....	88
Figura 59 - Diagrama representativo da sequência do processo de fabrico do componente EEMMB-006 .....	93
Figura 60 - Fotografia das aparas: (a) e (b) aparas de raios diferentes e (c) apara de saída .....	94

Figura 61 - Registo fotográfico do facejamento do topo dos pinos $\varnothing 6 \times 100$ mm .....	96
Figura 62 - Fotografia do equipamento MMB desenvolvido.....	97
Figura 63 - Representação esquemática do provete de ensaio DCB (adaptado de [68]).....	99
Figura 64 - Representação do desenho de fabrico dos substratos do componente PROVETE-DCB .....	99
Figura 65 - Diagrama representativo da sequência do processo de fabrico dos substratos do componente PROVETE-DCB .....	103
Figura 66 - Diagrama representativo da sequência do processo de fabrico do componente PROVETE-DCB .....	107
Figura 67 - Fotografia representativa do posicionamento da máquina fotográfica durante os ensaios .	108
Figura 68 - Fotografia representativa do processo de nivelamento do provete .....	110
Figura 69 - Fotografia representativa de um ensaio finalizado .....	111
Figura 70 - Fotografia representativa do modo de rotura ocorrido nos ensaios .....	111



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos componentes de uma junta adesiva (adaptado de [2, 4]) .....	10
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens das ligações adesivas [4, 5] .....	11
Tabela 3 - Descrição dos tipos de esforços em ligações adesivas (adaptado de [5]) .....	12
Tabela 4 - Descrição dos modos de rotura em ligações adesivas (adaptado de [3, 7]) .....	13
Tabela 5 - Caracterização das configurações de juntas adesivas (adaptado de [5]) .....	14
Tabela 6 - Caracterização de tipos de adesivos estruturais (adaptado de [5, 7]) .....	15
Tabela 7 - Descrição de trabalhos de MMB experimentais e numéricos .....	52
Tabela 8 - Análise SWOT dos equipamentos de ensaio MMB desenvolvidos .....	59
Tabela 9 - Parâmetros da malha utilizada na simulação do equipamento desenvolvido por Chaves [1] ..	62
Tabela 10 - Análise da viabilidade das ideias de melhoria propostas por Chaves [1] .....	65
Tabela 11 - Ideias para os pinos .....	66
Tabela 12 - Decisão do equipamento a projetar .....	66
Tabela 13 - Ligação à máquina de ensaio de tração (Figura 42 e Figura 43) .....	70
Tabela 14 - Parâmetros para simulação por MEF .....	74
Tabela 15 - Propriedades e características do Aço PM300 .....	74
Tabela 16 - Componentes alterados para a solução final .....	75
Tabela 17 - Parâmetros da malha utilizada na simulação da solução inicial .....	76
Tabela 18 - Alterações da solução inicial para a solução final .....	77
Tabela 19 - Parâmetros da malha utilizada na simulação da solução final .....	78
Tabela 20 - Análise dos resultados obtidos nas simulações .....	80
Tabela 21 - Lista dos componentes projetados a fabricar (numeração apresentada na Figura 42) .....	81
Tabela 22 - Lista de componentes normalizados a adquirir (numeração apresentada na Figura 42) .....	82
Tabela 23 - Lista de fornecedores selecionados .....	85
Tabela 24 - Parâmetros dos desenhos de fabrico [142] .....	85
Tabela 25 - Características do componente EEMMB-006 .....	87
Tabela 26 - Lista de ferramentas para o fabrico do componente EEMMB-006 .....	88
Tabela 27 - Lista total dos componentes projetados fabricados .....	94
Tabela 28 - Características dos substratos do componente PROVETE-DCB .....	98
Tabela 29 - Propriedades e características do adesivo Araldite® AV 138/HV 998 .....	98
Tabela 30 - Lista de ferramentas para o fabrico dos substratos do componente PROVETE-DCB .....	100
Tabela 31 - Proporção da mistura do adesivo Araldite® AV 138/HV 998 .....	104
Tabela 32 - Diferentes configurações usadas para os ensaios .....	108
Tabela 33 - Curvas $P-\delta$ para cada configuração .....	112
Tabela 34 - Análise ao cumprimento dos objetivos e requisitos propostos .....	118



# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	3
1.1	Contextualização .....	3
1.2	Objetivos .....	4
1.3	Metodologia .....	4
1.4	Estrutura.....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Ligação de componentes por juntas adesivas.....	9
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas .....	9
2.1.1.1	Conceito .....	10
2.1.1.2	Vantagens e desvantagens .....	10
2.1.2	Aplicações das juntas adesivas.....	11
2.1.3	Esforços e modos de rotura .....	12
2.1.4	Configurações possíveis de junta .....	14
2.1.5	Adesivos estruturais .....	15
2.2	Previsão de resistência.....	16
2.2.1	Métodos analíticos .....	17
2.2.2	Métodos numéricos .....	18
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	18
2.2.2.2	Mecânica da fratura.....	19
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo .....	20
2.2.2.3.1	Tipos de leis coesivas .....	22
2.2.2.3.2	Determinação dos parâmetros coesivos.....	22
2.2.2.4	Mecânica do dano.....	23
2.2.2.5	Método dos Elementos Finitos Extendido .....	24
2.3	Ensaio de caracterização à fratura .....	25
2.3.1	Fratura em tração (modo I) .....	27
2.3.1.1	Double-Cantilever Beam (DCB).....	27
2.3.1.2	Tapered Double-Cantilever Beam (TDCB).....	28
2.3.2	Fratura em corte (modo II).....	29
2.3.2.1	End-Notched Flexure (ENF).....	29
2.3.2.2	Four-Point End-Notched Flexure (4ENF).....	30
2.3.2.3	End-Loaded Split (ELS) .....	30

2.3.3	Fratura em modo misto (modo I+II) .....	31
2.3.3.1	Asymmetric Double-Cantilever Beam (ADCB) .....	31
2.3.3.2	Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam (ATDCB) .....	32
2.3.3.3	Fixed-Ratio Mixed-Mode (FRMM) .....	32
2.3.3.4	Single-Leg Bending (SLB) .....	33
2.3.3.5	Mixed-Mode Bending (MMB) .....	33
2.4	Ensaio Mixed-Mode Bending (MMB) .....	34
2.4.1	Caracterização do ensaio .....	35
2.4.2	Equipamentos desenvolvidos .....	36
2.4.2.1	Equipamentos desenvolvidos por Reeder e Crews [81, 82, 115] .....	36
2.4.2.2	Equipamento desenvolvido por Fernlund e Spelt [117] .....	37
2.4.2.3	Equipamento desenvolvido por Chen et al. [118] .....	38
2.4.2.4	Equipamento desenvolvido por Liu et al. [107] .....	39
2.4.2.5	Equipamento desenvolvido por de Moura et al. [104, 105] .....	40
2.4.2.6	Equipamento desenvolvido por Chaves [1] .....	40
2.4.2.7	Equipamento desenvolvido por Pereira et al. [113] .....	41
2.4.2.8	Equipamento desenvolvido por Droubi et al. [106] .....	42
2.4.3	Métodos para determinação da energia de fratura .....	42
2.4.3.1	Métodos que requerem a monitorização do comprimento de fenda .....	43
2.4.3.1.1	Modelo 1 - Método de Reeder e Crews [81, 82, 115] .....	43
2.4.3.1.2	Modelo 2 - Método Original de Kinloch et al. [78] .....	45
2.4.3.1.3	Modelo 3 - Método Modificado de Kinloch et al. [119] .....	46
2.4.3.1.4	Modelo 4 - Método de calibração de flexibilidade .....	46
2.4.3.1.5	Modelo 5 - Método de Deflexão de Carga .....	48
2.4.3.2	Métodos baseados num comprimento de fenda equivalente .....	48
2.4.3.2.1	Compliance-Based Beam Method (CBBM) .....	48
2.4.3.3	Método do integral-J .....	50
2.4.4	Estado da arte .....	52
3	DESENVOLVIMENTO .....	57
3.1	Disposições iniciais do trabalho a desenvolver .....	57
3.1.1	Objetivos do trabalho .....	57
3.1.2	Requisitos do equipamento .....	58
3.2	Anteprojecto do equipamento .....	58
3.2.1	Estudo e análise crítica dos equipamentos existentes .....	59
3.2.1.1	Análise SWOT .....	59
3.2.1.2	Análise detalhada do equipamento desenvolvido por Chaves [1] .....	61
3.2.1.2.1	Parametrização da simulação .....	62
3.2.1.2.2	Resultados da simulação .....	62
3.2.2	<i>Brainstorming</i> de ideias .....	64
3.2.2.1	Ideias de melhoria propostas por Chaves [1] .....	64

3.2.2.2	Ideias para os pinos .....	65
3.2.3	Decisão do equipamento a projetar e esboço inicial .....	66
<b>3.3</b>	<b>Projeto do equipamento .....</b>	<b>67</b>
3.3.1	Representação final do equipamento .....	67
3.3.2	Descrição dos mecanismos constituintes.....	68
3.3.3	Ligação à máquina de ensaio de tração .....	69
3.3.4	Descrição do funcionamento .....	70
3.3.4.1	Análise de sobreposição de cargas .....	71
3.3.4.2	Modelo de redução de dados .....	72
3.3.5	Solução inicial e otimização por MEF .....	74
3.3.5.1	Solução inicial .....	75
3.3.5.1.1	Parametrização da simulação .....	75
3.3.5.1.2	Resultados da simulação.....	76
3.3.5.2	Solução final.....	77
3.3.5.2.1	Parametrização da simulação .....	78
3.3.5.2.2	Resultados da simulação.....	78
3.3.5.3	Análise dos resultados obtidos nas simulações .....	80
<b>3.4</b>	<b>Fabrico do equipamento .....</b>	<b>81</b>
3.4.1	Definição dos componentes a fabricar e adquirir .....	81
3.4.1.1	Componentes a fabricar .....	81
3.4.1.2	Componentes a adquirir .....	82
3.4.1.3	Componentes a alterar após aquisição.....	84
3.4.2	Escolha de fornecedores .....	84
3.4.3	Criação dos desenhos de fabrico.....	85
3.4.4	Fabrico dos componentes .....	87
3.4.4.1	Processo de fabrico do componente EEMMB-006 .....	87
3.4.4.1.1	Desenho de fabrico do componente.....	87
3.4.4.1.2	Definição das ferramentas .....	88
3.4.4.1.3	Descrição do processo de fabrico .....	89
3.4.4.2	Registo fotográfico dos componentes fabricados e alterados após aquisição .....	94
3.4.5	Equipamento final .....	97
<b>3.5</b>	<b>Validação do funcionamento .....</b>	<b>97</b>
3.5.1	Materiais utilizados .....	97
3.5.1.1	Substratos em Aço PM300.....	98
3.5.1.2	Adesivo Araldite® AV 138/HV 998 .....	98
3.5.2	Geometria das juntas .....	98
3.5.3	Processo de fabrico .....	99
3.5.3.1	Substratos .....	99
3.5.3.1.1	Desenho de fabrico dos substratos.....	99
3.5.3.1.2	Definição das ferramentas .....	100
3.5.3.1.3	Descrição do processo de fabrico .....	101

---

3.5.3.2	Adesivo .....	104
3.5.3.3	Provetes de ensaio.....	104
3.5.3.3.1	Descrição do processo de fabrico .....	104
3.5.4	Ensaio das juntas .....	107
3.5.4.1	Condições de ensaio .....	107
3.5.4.2	Configurações de ensaio .....	108
3.5.4.3	Procedimento de ensaio .....	110
3.5.5	Resultados obtidos .....	111
3.5.5.1	Modos de rotura .....	111
3.5.5.2	Curvas P- $\delta$ .....	112
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	117
4.1	Conclusões .....	117
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	120
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	123
6	ANEXOS.....	135
6.1	ANEXO1 .....	135
6.2	ANEXO2 .....	135
6.3	ANEXO3 .....	135

# INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Metodologia
- 1.4 Estrutura



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito de um projeto curricular relativo ao Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, especialização em Construções Mecânicas.

Nas últimas décadas, a utilização das juntas adesivas tem aumentado devido às suas características competitivas comparativamente com os métodos tradicionais de união, como a soldadura, a rebiteagem ou a ligação aparafusada. As juntas adesivas são mais leves, permitem a ligação de materiais diferentes, apresentam menores concentrações de tensões e, ainda, apresentam bom comportamento sob cargas cíclicas ou de fadiga. Estas são usadas numa grande variedade de aplicações estruturais e podem estar sujeitas a tensões de tração (modo puro I), corte (modo puro II) ou modo misto (modo I+II), como é verificado na maioria das situações reais. A introdução dos adesivos estruturais nas aplicações mais exigentes leva à necessidade de conhecer as propriedades mecânicas e de fratura relevantes para essas aplicações, bem como o seu comportamento em diversos tipos de aderentes. Portanto, para aumentar a confiança no projeto de estruturas adesivas, é importante conseguir prever com precisão a sua resistência mecânica. Neste contexto, as abordagens pela Mecânica da Fratura e do Dano apresentam vantagens significativas relativamente aos métodos baseados na Resistência dos Materiais, principalmente em estruturas com singularidades de tensões e quando os materiais envolvidos apresentam comportamento plástico significativo. Frequentemente, a abordagem pela Mecânica da Fratura é aplicada por uma análise energética, onde a taxa crítica de libertação de energia de deformação ( $G_c$ ) é o principal parâmetro a determinar para a previsão da evolução do dano e rotura, que pode ser dividido em componentes de tração ( $G_{Ic}$ ) e corte ( $G_{IIc}$ ). Estas componentes podem ser determinadas pelos ensaios de modo puro I, modo puro II ou modo misto I+II, cuja solicitação aplicada ao provete de ensaio engloba uma componente de tração e outra de corte. Além da determinação do valor de  $G_c$ , devido às condições de carregamento em modo misto, é necessário estabelecer um critério de fratura que promova a propagação do dano nessas condições. Os ensaios de caracterização à fratura em modo misto I+II permitem a obtenção dos envelopes de fratura de adesivos para definir o critério de fratura mais adequado para cada tipo de junta adesiva. Deste modo, torna-se possível a utilização de métodos de previsão de resistência que consigam prever de forma correta o comportamento em modo misto I+II.

## 1.2 Objetivos

Neste trabalho, o principal objetivo é projetar, modelar numericamente e validar experimentalmente um equipamento de ensaio MMB para a realização de ensaios de adesivos estruturais. Experimentalmente, pretende-se projetar e fabricar o equipamento de ensaio MMB, e posteriormente realizar os respectivos ensaios e tratamento de dados conducente à validação do equipamento para ensaio de adesivos. Esta validação deve consistir na obtenção dos envelopes de fratura de adesivos e comparação com resultados da literatura. O trabalho numérico consiste na criação da geometria do equipamento em *software* e realização das respetivas simulações, com a finalidade de otimizar a geometria do equipamento de ensaio MMB. Outro objetivo deste trabalho é validar a utilização do método de redução na estimativa da tenacidade à fratura em estudo.

## 1.3 Metodologia

O trabalho desenvolvido obedeceu à seguinte metodologia:

### 1. Análise do projeto proposto e definição de objetivos

- Esta fase consistiu na contextualização e definição do projeto e na delimitação das atividades a desenvolver, de forma a identificar os principais objetivos do trabalho.

### 2. Pesquisa bibliográfica

- Após a realização da primeira etapa, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, onde foram reunidas diferentes referências bibliográficas, necessárias para compreender e aprofundar cientificamente os conceitos teóricos, técnicos e metodologias utilizadas no projeto.

### 3. Implementação das metodologias

- Após a pesquisa bibliográfica, implementaram-se os objetivos e requisitos para o trabalho prático de modo a ser possível alcançar a solução final para o equipamento fabricado. O anteprojecto e projecto do equipamento foram desenvolvidos como apoio da ferramenta Solidworks® e de acordo com os objetivos e requisitos definidos. Durante este processo foi efetuado um estudo para otimização por MEF e posterior desenvolvimento dos desenhos de fabrico dos componentes. Os componentes a adquirir foram selecionados e encomendados a diferentes fornecedores. O processo de fabrico do equipamento foi realizado nas oficinas do ISEP, bem como todos os ensaios necessários para a validação do equipamento.

### 4. Análise dos resultados, conclusões e sugestões de melhoria

- Por fim, foi efetuada uma análise dos resultados obtidos e comparados com os objetivos previamente definidos e, de um modo crítico, foram sugeridas melhorias para este projeto.

## 1.4 Estrutura

Esta dissertação está dividida em seis capítulos.

O Capítulo 1 é composto pelo enquadramento do projeto, são apresentados os objetivos, a metodologia utilizada e a estrutura do relatório.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, que reúne toda a informação teórica sobre os conceitos e metodologias utilizadas. Este capítulo é constituído por quatro subcapítulos que enquadram o tema desta dissertação na área dos adesivos estruturais e caracterização à fratura. Entre estes encontram-se:

- a ligação de componentes por juntas adesivas, onde são apresentados vários tópicos referentes às juntas adesivas, como caracterização e diferentes aplicações e configurações das mesmas, e ainda os tipos de esforços e modos de rotura que podem ser sujeitas;
- a previsão de resistência através de diferentes métodos analíticos e numéricos;
- os ensaios de caracterização à fratura em diferentes modos, nomeadamente tração (modo I), corte (modo II) e modo misto (modo I+II);
- o ensaio MMB, onde é realizada uma caracterização do mesmo e são apresentados os diferentes equipamentos existentes para este tipo de ensaio, bem como os diferentes métodos para a determinação da energia de fratura desenvolvidos.

O Capítulo 3 é constituído pelo desenvolvimento do trabalho, pelo que apresenta as técnicas e metodologias aplicadas ao projeto e os resultados obtidos. Este capítulo é constituído por cinco subcapítulos apresentam o trabalho prático desenvolvido nesta dissertação. Entre estes encontram-se:

- as disposições iniciais do trabalho a desenvolver, que englobam os objetivos definidos para o trabalho e os requisitos necessários para o equipamento;
- o anteprojecto do equipamento, onde são realizados um estudo e análise crítica dos equipamentos existentes e, posteriormente, é efetuado um *brainstorming* de ideias de modo a tomar decisões acerca do equipamento a desenvolver;
- o projeto do equipamento, onde é representado o estado final do equipamento, a descrição dos mecanismos constituintes e do respetivo funcionamento. Neste subcapítulo é ainda apresentada toda a evolução do projeto do equipamento desde a solução inicial à final, através de uma otimização por MEF;
- o fabrico do equipamento, onde são definidos todos os componentes a fabricar e adquirir, bem como a respetiva escolha de fornecedores e criação dos desenhos de fabrico. Neste subcapítulo é também apresentada uma descrição detalhada do fabrico dos componentes do equipamento e a representação final do mesmo;
- a validação do funcionamento, que consiste na realização de vários ensaios no equipamento, com diferentes materiais e geometrias de juntas e descrição do

respetivo processo de fabrico. Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos durante os ensaios para validação final do equipamento.

O Capítulo 4 é o capítulo conclusivo. Neste capítulo apresentam-se as conclusões retiradas do trabalho desenvolvido, assim como se apresentam sugestões de melhoria e considerações para trabalhos futuros.

O Capítulo 5 é composto pelas fontes de informação e referências bibliográficas, necessárias ao desenvolvimento do trabalho.

Por fim, no Capítulo 6, é apresentada a informação adicional, nomeadamente cálculos auxiliares e documentação anexa.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligação de componentes por juntas adesivas
- 2.2 Previsão de resistência
- 2.3 Ensaio de caracterização à fratura
- 2.4 Ensaio Mixed-Mode Bending (MMB)



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ligação de componentes por juntas adesivas

Atualmente, os adesivos são utilizados em situações de elevada exigência, embora nem sempre seja reconhecido o seu verdadeiro potencial [2]. Existem indícios significativos, como registos escritos e arqueológicos, que sugerem que os adesivos são utilizados pelo homem há milhares de anos. Em 1754, surgiu a primeira patente Britânica para “*a kind of glue called fish glue*”, cerca de cinquenta anos após o início da produção industrial de adesivos [3].

A necessidade de objetos mais resistentes, mais úteis ou simplesmente mais baratos, levou a ligação de componentes por juntas adesivas a ser utilizada continuamente ao longo do tempo, por meio dos recursos naturais disponibilizados. Provavelmente, os adesivos foram introduzidos gradualmente através de aplicações que usavam produtos “pegajosos” para preparações de adesivos simples [3].

O desenvolvimento de adesivos estruturais iniciou-se apenas no início do século XX e é considerada uma nova etapa na história desta área tecnológica, que permitiu a chegada de uma vasta gama de aplicações de adesivos ao atual mercado industrial. Os adesivos sofreram uma grande evolução, devido maioritariamente à introdução de polímeros sintéticos, que trouxeram novas propriedades como a compatibilidade com outros materiais e uma resistência capaz de transmitir cargas consideráveis [2].

A ligação de componentes por juntas adesivas é considerada uma das tecnologias do futuro e, por este motivo, a pesquisa e o desenvolvimento de adesivos, bem como as suas aplicações, nunca foi tão importante para cientistas e engenheiros, de modo a responder eficazmente à rápida evolução tecnológica [4].

#### 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Durante o processo de evolução das tecnologias adesivas, foram formulados diversos conceitos e criadas várias terminologias para a caracterização das juntas adesivas [2]. O projeto de uma junta adesiva é muito flexível e diversificado, pelo que é possível combinar vários materiais com diferentes propriedades e características. O adesivo e os aderentes são os componentes onde é possível variar o tipo de material de modo a obter a combinação de propriedades mais adequada para cada aplicação [4].

A adesão é definida como a atração entre dois materiais diferentes através de forças intermoleculares, enquanto a coesão envolve apenas as forças intermoleculares entre um único material. Ambas definem os modos de falha típicos das juntas adesivas [4].

### 2.1.1.1 Conceito

Uma junta adesiva traduz-se na união de elementos através de adesivos [4]. A junta adesiva resulta da combinação dos seus componentes: adesivo, substrato, interfase, interface e, caso aplicável, o primário (Figura 1).

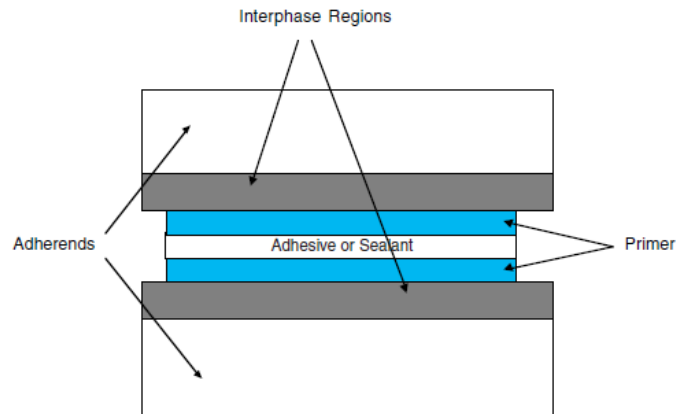


Figura 1 - Representação esquemática de uma junta adesiva e seus componentes [4]

A Tabela 1 apresenta uma breve descrição dos componentes de uma junta adesiva.

Tabela 1 - Descrição dos componentes de uma junta adesiva (adaptado de [2, 4])

Componente	Descrição
Substrato	Material a ser ligado, onde o adesivo é aplicado. Normalmente, após terminada a ligação adesiva, o substrato é designado como aderente, embora seja comum o uso dos dois termos indistintamente.
Interfase	Definida como a área entre o aderente e o adesivo, e apresenta características químicas e físicas diferentes de todos os materiais presentes na junta adesiva. A natureza da interfase é um fator crítico na determinação das propriedades mecânicas da ligação adesiva.
Interface	A interface, também designada por camada limite, é definida como o plano de contacto entre a superfície e os dois materiais. Esta camada está contida na interfase e é útil para definir e medir a energia da superfície. Na interfase, podem existir várias interfaces entre diferentes materiais localizados entre o adesivo e o aderente.
Primário	Substância que é aplicada sobre o substrato, para melhorar a adesão ou proteger as superfícies até à aplicação do adesivo.
Adesivo	Pode ser definido como um material com a capacidade de ligar duas ou mais superfícies, de forma a manter a junta rígida.

### 2.1.1.2 Vantagens e desvantagens

As ligações adesivas apresentam várias vantagens distintas em relação aos processos convencionais de fixação, como as ligações aparafusadas, soldadura, rebitagem ou brasagem. Por outro lado, existem algumas desvantagens inerentes às ligações adesivas, que podem torná-las impraticáveis [4]. A Tabela 2 apresenta as vantagens e desvantagens das ligações adesivas mais relevantes relativamente aos processos convencionais.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens das ligações adesivas [4, 5]

Vantagens	Desvantagens
Distribuição de tensões mais uniforme sobre as superfícies ligadas, o que permite uma rigidez mais elevada, favorece a transmissão de carga e possibilita uma redução de peso, um menor custo e um aumento da resistência à fadiga.	Necessidade de utilização de ferramentas de fixação, de modo a manter a posição dos componentes durante o processo de cura, uma vez que a ligação adesiva não é instantânea.
Amortecimento de vibrações, o que permite que as tensões aplicadas na junta sejam parcialmente absorvidas.	Necessidade de uma cuidadosa preparação das superfícies a ligar.
Ligação de diferentes materiais com distintas composições químicas e propriedades físicas.	Possibilidade de serem necessários longos tempos de cura.
Ligação de chapas de espessuras finas com elevada eficiência.	Possibilidade de ser necessária a utilização de fornos ou prensas.
Garantia de um contacto contínuo entre superfícies ligadas.	Não existe um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura.
Garantia de estruturas com contornos regulares, sem marcas originadas pela soldadura ou por parafusos ou rebites.	Geralmente, é necessário um controlo rígido do processo.
Ligação de componentes com diferentes geometrias.	Dificuldades na inspeção e no controlo da qualidade da ligação.
Minimização ou prevenção da corrosão galvânica entre metais diferentes.	Resistência limitada em ambientes extremamente degradantes.
As temperaturas necessárias para o fabrico da junta não alteram as propriedades dos materiais ligados.	Necessidade de considerações de saúde, ambiente e segurança.

### 2.1.2 Aplicações das juntas adesivas

A ligação de componentes por juntas adesivas é certamente uma tecnologia com um futuro promissor, capaz de competir com as tecnologias tradicionais e, em algumas aplicações, até superá-las [4].

Os adesivos são usados numa grande variedade de indústrias: aeroespacial, automóvel, construção civil, mobiliária, naval, têxtil, entre muitas outras. Existem várias unidades de negócios de adesivos para o desenvolvimento, fabrico e comercialização de diferentes produtos que empregam adesivos, que atingem bastantes consumidores finais numa vasta variedade de aplicações [4].

As indústrias da construção civil e das embalagens representam a maior percentagem de procura de soluções por juntas adesivas. Na indústria da construção civil, os adesivos são utilizados com bastante frequência na união de painéis de madeira, enquanto na indústria das embalagens, os adesivos são aplicados, maioritariamente, em caixas de papelão ondulado [4]. A indústria da construção civil tem recorrido à tecnologia das juntas adesivas em pontes e pequenas estruturas metálicas, que são responsáveis pela integridade estrutural do produto final [5].

O desenvolvimento de adesivos estruturais está essencialmente relacionado com a evolução da indústria aeronáutica, devido à excelente relação resistência-peso dos adesivos estruturais. Ao longo dos anos, os adesivos estruturais foram desenvolvidos e aprimorados de modo a permitir a aplicação dos mesmos em novos mercados, como por exemplo, nas indústrias de transportes [4, 5].

A necessidade do aumento da eficiência e da redução do consumo de combustível levou a indústria automóvel a investigar soluções na área tecnológica das ligações adesivas. A indústria naval começou a utilizar adesivos estruturais para a redução de peso e o aumento da resistência à corrosão, uma vez que os adesivos estruturais permitem uma excelente ligação entre materiais como plásticos e compósitos. Num futuro próximo, as juntas adesivas poderão representar cerca de 50% de todas as juntas num automóvel de competição [5].

### 2.1.3 Esforços e modos de rotura

Existem cinco tipos de esforços comuns, aos quais as ligações adesivas podem ser sujeitas (Figura 2). Por outro lado, também é possível ter combinações ou variações destas tensões em juntas adesivas [4].

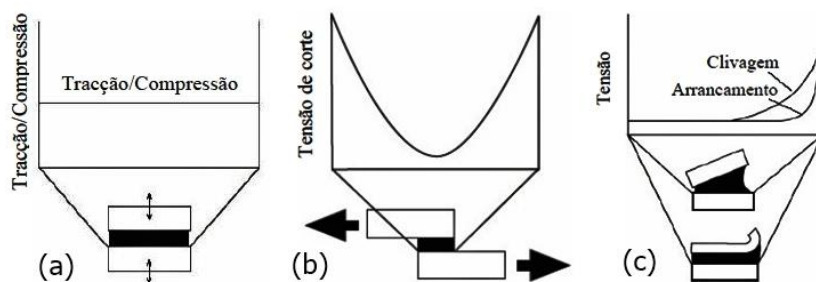


Figura 2 - Esforços e respetivas distribuições de tensões: (a) tração e compressão, (b) corte e (c) clivagem e arrancamento (adaptado de [6])

A Tabela 3 apresenta uma breve descrição dos tipos de esforços que podem estar presentes numa ligação adesiva.

Tabela 3 - Descrição dos tipos de esforços em ligações adesivas (adaptado de [5])

Tipo de esforço	Descrição
Tração	Estas tensões desenvolvem-se quando as forças atuam perpendicularmente ao plano de colagem. A distribuição das tensões normais, através do comprimento da colagem, é uniforme. Porém, em juntas coladas a distribuição destas tensões não é uniforme, uma vez que aparecem picos de tensões de clivagem ou de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição.
Compressão	São forças que tendem a comprimir um aderente contra o outro. A distribuição da tensão pelo adesivo é constante. Uma junta em compressão pura quase não necessita de adesivo.
Corte	Estas forças provocam o escorregamento entre os dois aderentes e tendem a separá-los. A distribuição da tensão de corte, no caso de uma junta de sobreposição simples, apresenta um maior nível de tensões nas extremidades da junta do que na parte central da ligação.

Tipo de esforço	Descrição
Clivagem	Estes esforços são provocados por forças de tração, embora aplicadas na extremidade de uma junta rígida. A extremidade da junta, que está sob as forças de clivagem, apresenta uma forte concentração de tensões.
Arrancamento	Estes esforços são provocados por forças de tração, embora um ou dois aderentes sejam bastante flexíveis e possam deformar-se plasticamente por ação das forças aplicadas, o que leva à concentração das forças de tração numa zona muito mais localizada numa das extremidades da ligação.

Os modos de rotura em juntas adesivas mais frequentes são a rotura adesiva, a rotura coesiva, a rotura mista, pela combinação de ambos modos, ou a rotura pelo aderente (Figura 3). A rotura coesiva no adesivo ou no aderente é considerada o modo de rotura preferencial, uma vez que é utilizada a totalidade da resistência dos materiais constituintes da junta [4].

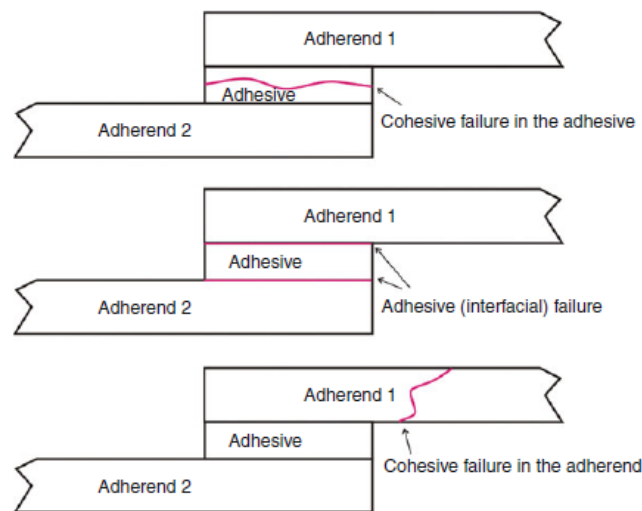


Figura 3 - Exemplos de modos de rotura em ligações adesivas (adaptado de [2])

A Tabela 4 apresenta uma breve descrição dos modos de rotura em juntas adesivas.

Tabela 4 - Descrição dos modos de rotura em ligações adesivas (adaptado de [3, 7])

Modo de rotura	Descrição
Adesiva	A rotura adesiva ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes. Apenas a superfície de um dos aderentes está coberta por adesivo.
Coesiva no Adesivo	Este modo de rotura ocorre quando a ligação entre o adesivo e o aderente é mais forte do que a resistência interna do adesivo. Ambas as superfícies de rotura estão cobertas por adesivo.
Mista	A rotura mista consiste na combinação entre as roturas adesiva e coesiva. Este modo de rotura pode dever-se à ineficaz limpeza numa dada região das superfícies a ligar ou devido à má homogeneização na mistura do adesivo.
Coesiva no Aderente	Este modo de rotura ocorre quando a ligação entre o aderente e o adesivo é mais forte do que a resistência do aderente. Existe uma rotura total ou parcial do aderente, porém a camada do adesivo permanece intacta. Quando a carga de rotura corresponde à resistência nominal do aderente, admite-se que a junta foi bem projetada.

### 2.1.4 Configurações possíveis de junta

As juntas adesivas são projetadas numa variedade de configurações, de modo a obter o mais alto desempenho do adesivo quando submetido a uma carga específica [4]. As configurações de juntas adesivas mais comuns estão representadas na Figura 4.

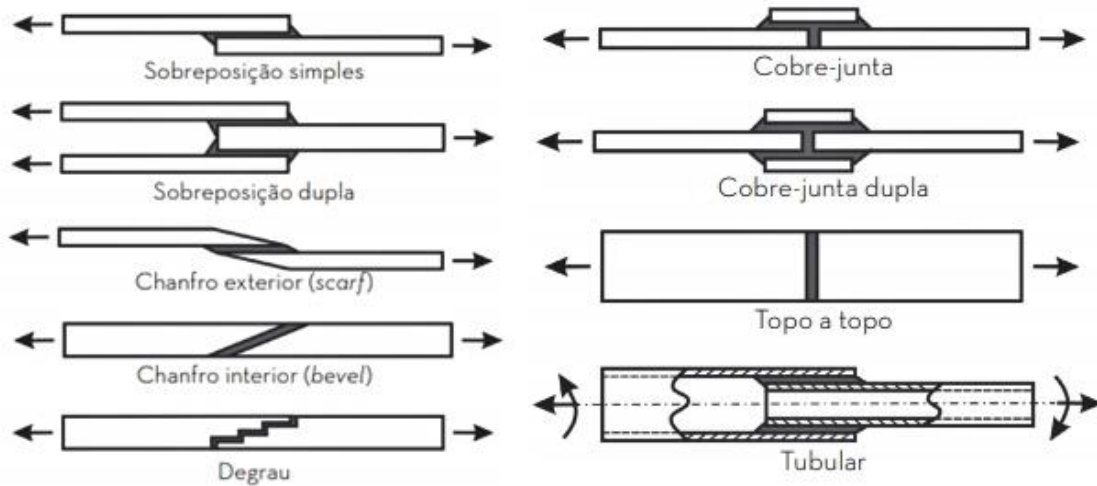


Figura 4 - Exemplos de possíveis configurações de junta (adaptado de [5])

A Tabela 5 apresenta uma breve caracterização das configurações de junta mais relevantes.

Tabela 5 - Caracterização das configurações de juntas adesivas (adaptado de [5])

Configuração de junta	Caracterização
Sobreposição simples	Esta configuração de junta é a mais usada em aplicações industriais, devido à sua simplicidade de fabrico. Porém, a aplicação descentrada da carga provoca efeitos de flexão, que promovem o aparecimento de tensões de arrancamento, o que reduz a resistência da junta.
Sobreposição dupla	Os efeitos da flexão são consideravelmente inferiores nesta configuração de junta. Contudo, a sua fabricação é mais lenta.
Chanfro interior; Degrau	Estas configurações foram desenvolvidas para reduzir as tensões de arrancamento. A utilização destas configurações de juntas permite a diminuição dos gradientes de tensões ao longo do adesivo, o que oferece uma elevada resistência a estas juntas. Estas apresentam uma diminuição da excentricidade dos esforços. A dificuldade de maquinar os degraus e os chanfros aumenta o custo do processo de fabrico.
Topo a topo	Esta configuração de junta é a mais simples de fabricar. Contudo, esta configuração não apresenta uma elevada eficácia, devido às acentuadas concentrações de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da ligação. Este tipo de junta não suporta esforços de flexão, uma vez que o adesivo estaria sujeito a clivagem.

### 2.1.5 Adesivos estruturais

Geralmente, os adesivos são agrupados como estruturais e não estruturais. O termo estrutural é empregue em adesivos à base de polímeros sintéticos, que apresentam a capacidade de resistir a altas cargas, responsáveis pela integridade estrutural, resistência e rigidez de montagem e contêm uma boa resistência ambiental [5].

Nas juntas adesivas, os adesivos estruturais têm como principal função manter unidos dois ou mais aderentes e suportar as elevadas tensões operacionais em serviço, durante a sua vida útil [4]. Os adesivos estruturais estão organizados em subclasses, baseados nas resinas químicas usadas na sua formulação [8] (Figura 5).

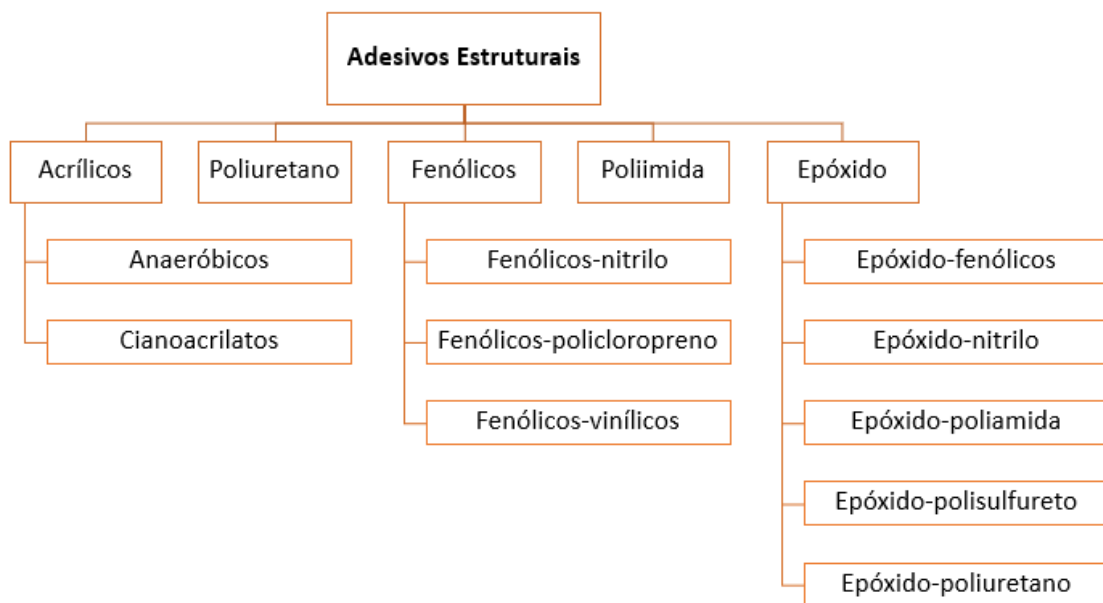


Figura 5 - Diferentes tipos de adesivos estruturais (adaptado de [7])

A Tabela 6 apresenta uma breve caracterização dos tipos de adesivos estruturais mais relevantes.

Tabela 6 - Caracterização de tipos de adesivos estruturais (adaptado de [5, 7])

Tipo de adesivo	Caracterização
Adesivos acrílicos	Os acrílicos modificados surgem da introdução de polimetilmetacrilato e uma borracha de nitrilo num adesivo acrílico básico. Estes adesivos apresentam elevada resistência à humidade, boa resistência ao arrancamento e ao impacto, baixa contração durante o processo de cura e, também, permitem ligações fortes, ainda que as superfícies não estejam bem limpas. Por outro lado, os adesivos modificados possuem baixa resistência mecânica a altas temperaturas e a elevada flamabilidade.
Adesivos de epóxido	Os adesivos de epóxido são largamente aplicados na colagem de uma grande variedade de materiais. Estes adesivos apresentam boa resistência mecânica, reduzida contração e não produzem agentes voláteis durante a cura. O processo de cura não necessita da aplicação de pressão, pelo que o simples posicionamento das peças a serem coladas é suficiente. As propriedades podem ser modificadas pela adição de outras resinas ou por um elastómero.

Tipo de adesivo	Caracterização
Adesivos fenólicos	Geralmente, os adesivos fenólicos apresentam baixo custo, boa resistência mecânica, a temperaturas elevadas e aos agentes ambientais. Em contrapartida, estes adesivos possuem baixa resistência à corrosão por solventes e ao impacto uma grande fragilidade, devido às elevadas tensões internas geradas pela contração durante o processo de cura.
Adesivos de poliimida	Os adesivos de poliimida são utilizados em aplicações em que a temperatura de serviço é bastante elevada e, geralmente, apresentam-se sob a forma de filmes ou líquido. Estes adesivos requerem longos tempos de cura com ciclos de pressão e elevada temperatura, pelo que a sua aplicação é complexa e o seu custo elevado. Embora os adesivos de poliimida apresentem uma grande dureza, estes são relativamente frágeis e pouco tenazes e, ainda, possuem má resistência a vibrações.
Adesivos de poliuretano	Os adesivos de poliuretano resultam da reação de um polimetilmetacrilato com uma borracha de nitrilo e, geralmente, apresentam-se sob a forma de dois componentes. A cura é processada lentamente à temperatura ambiente. Estes adesivos possuem boa flexibilidade e tenacidade, bom comportamento a baixas temperaturas, boa resistência ao arrancamento e à abrasão. Por outro lado, os adesivos de poliuretano apresentam elevada sensibilidade às proporções da mistura, toxicidade do isocianato e baixa resistência ao corte à temperatura ambiente.

## 2.2 Previsão de resistência

O desenvolvimento de juntas adesivas implica a seleção do adesivo estrutural e dos aderentes a utilizar de acordo com a aplicação a que a junta adesiva será sujeita. Todas as configurações de junta estudadas e bem consolidadas, assim como as cargas, tensões e modos de rotura a que cada junta será submetida, estão diretamente relacionadas com o desempenho das juntas adesivas. Contudo, estas podem ser alteradas após análise do projeto da junta, de modo a otimizar completamente a junta conforme a sua aplicação.

O processo evolutivo das juntas adesivas está diretamente relacionado com o desenvolvimento de metodologias de previsão fiáveis que permitam o aumento de eficiência na sua utilização. Deste modo, é possível superar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas, significativa há algumas décadas, que originavam estruturas mais caras e, também, mais pesadas, por consequência da falta de modelos materiais concretos e de critérios de rotura adequados.

Usualmente, o Método de Elementos Finitos (MEF) [9] é a técnica mais utilizada para a análise de juntas adesivas. Esta técnica foi aplicada por Harris e Adams [10], que consideraram diferentes fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes e do adesivo, bem como a influência dos filetes. O MEF pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, pelo fator de intensidade das tensões ou por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). No entanto, a necessidade de voltar a criar a malha no caso da propagação da fenda leva a que estas técnicas de modelação dificultem o processo de avaliação da propagação da fenda, o que será refletido no esforço computacional [11].

Ao longo do tempo, o uso das juntas adesivas tem aumentado consideravelmente o seu interesse, o que se reflete no desenvolvimento de muitos outros modelos para realizar previsões de resistência de juntas adesivas [12]. Para a análise de juntas adesivas podem ser consideradas duas metodologias definidas como os métodos analíticos, que consistem em análises de forma fechada, e os métodos numéricos.

### 2.2.1 Métodos analíticos

Em meados do século XX, a previsão da resistência à rotura de juntas adesivas foi registada pela primeira vez com a introdução de métodos analíticos com base na mecânica clássica. Estes não eram tão representativos dos modelos reais, no entanto eram considerados melhores do que os modelos de erro. Estes métodos têm vindo a ser constantemente atualizados, onde a complexidade do modelo é aumentada numa perspetiva mais pragmática dos modelos reais.

O modelo analítico de Volkersen [13] assume que os materiais são absolutamente elásticos e a deformação do adesivo ocorre apenas em corte. Por outro lado, a formulação analítica torna-se mais complexa caso o adesivo se deforme plasticamente ou sejam utilizados substratos de compósito ou de materiais diferentes. Este modelo é considerado uma solução simples a utilizar na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma vez que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Desta forma, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura (Figura 6).

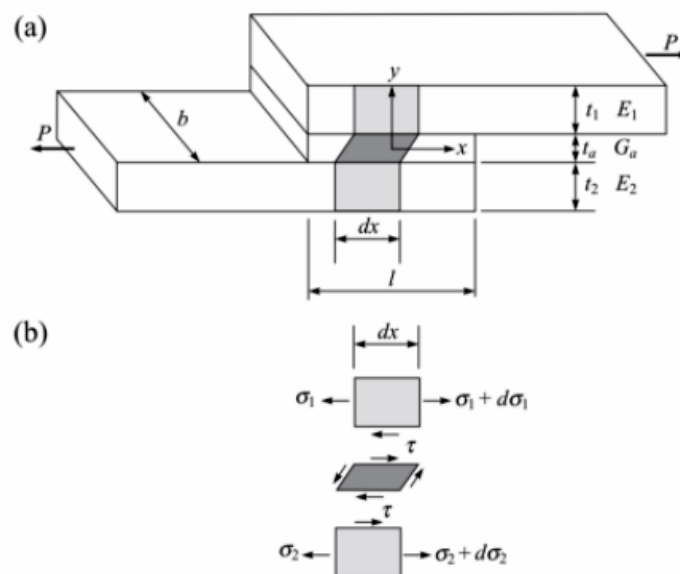


Figura 6 - Junta adesiva de sobreposição analisada por Volkersen: (a) geometria e (b) diagrama de corpo livre [14]

Existem várias publicações recentes que utilizaram métodos analíticos para a previsão de resistência de juntas adesivas [12], como por exemplo:

- O estudo desenvolvido por Zhao et al. [15], onde foi apresentado um método analítico bidimensional (2D) que fornece uma explícita solução de forma

fechada. Concluiu-se que esta solução pode fornecer uma boa previsão para as tensões e distribuições de carga no adesivo, bem como nos aderentes;

- O estudo desenvolvido por Yousefsani et al. [16], onde foi apresentado um método analítico para a análise de tensões de juntas adesivas simétricas homogêneas e heterogêneas duplas, submetidas a tensão uniaxial e momento fletor. Concluiu-se que os resultados apresentados podem ser considerados como soluções de referência para avaliar a credibilidade de outras soluções.

## 2.2.2 Métodos numéricos

Mais tarde, os métodos numéricos também foram introduzidos na análise de previsão da resistência à rotura das juntas adesivas. Os métodos numéricos surgiram devido à necessidade de prever o comportamento de adesivos novos e mais complexos, que implicam uma análise de complexidade elevada e podem impor soluções não analíticas. Estes métodos têm sido utilizados, principalmente, no desenvolvimento de juntas adesivas. As principais técnicas de previsão de resistência para os métodos numéricos são descritas de forma detalhada nos pontos seguintes.

### 2.2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos é uma técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos, como por exemplo o MEF, para obter os valores máximos de tensão e de deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para tal, os valores obtidos pelos modelos são comparados com os valores admissíveis dos materiais, o que permite então estimar a resistência das ligações adesivas.

Adams e Comyn [17] obtiveram bons resultados na aplicação do critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas. Estes autores consideram que a dimensão da malha é um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos, devido à existência de singularidades das tensões nas extremidades do comprimento de sobreposição ( $L_0$ ).

Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e, em alguns casos, admitem originar resultados satisfatórios [18]. Contudo, estes critérios podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas, pois não consideram as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, nem a presença de defeitos no adesivo.

Harris e Adams [10] admitem que, em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados, uma vez que após o adesivo ceder, este ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

Existem várias publicações recentes que utilizaram a mecânica dos meios contínuos para a previsão de resistência de juntas adesivas [12], como por exemplo:

- O estudo desenvolvido por Ozel et al. [19], onde foram analisadas as propriedades mecânicas da geometria de juntas adesivas de sobreposição simples, com diferentes configurações de aderentes, submetidos a esforços de tração. Concluiu-se que os aderentes de material compósito com diferentes sequências de orientação das fibras, diferentes espessuras de aderência e comprimento de sobreposição afetara, a tensão de rotura da junta;
- O estudo desenvolvido por Gültekin et al. [20], onde foram analisadas as propriedades mecânicas da geometria de juntas adesivas de sobreposição simples, com diferentes configurações de aderentes, submetidos a um ensaio de flexão em quatro pontos. Concluiu-se que a mudança da sequência de empilhamento e da espessura do compósito alterou a localização do eixo neutro na junta, o que influencia significativamente a capacidade de carga da junta.

### 2.2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica da fratura considera que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo e que pode apresentar defeitos, nomeadamente fendas. Estes defeitos podem ser causados por processos de fabrico ou por algum acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma particularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a  $180^\circ$ . Este efeito também se aplica à singularidade de tensões na interface entre os dois materiais ligados. Neste caso, ainda que deixem de existir superfícies livres, a descontinuidade de tensões mantém-se presente. Estes defeitos podem ser avaliados pela mecânica da fratura, de modo a verificar se estes defeitos podem causar uma rotura catastrófica. Esta técnica também permite avaliar se, durante o período de vida da estrutura, os defeitos se mantêm com dimensões inferiores às críticas, apesar de se poderem propagar para manter a segurança da estrutura.

A aplicação de cargas lentas, de impacto e por fadiga são exemplos de fatores que podem desencadear o início da fratura pela propagação de fendas. Isto deve-se a gradientes de temperatura ou, ainda, por deformações dependentes do tempo [5]. Griffith [21] foi o primeiro autor a apresentar um estudo onde surgem os princípios básicos da mecânica da fratura, através da análise de fraturas em fibras de vidro. Este autor concluiu que todos os corpos possuem defeitos e que a fratura ocorre a partir do ponto mais crítico.

Geralmente, a taxa de libertação de energia de deformação ( $G$ ), do modo I ( $G_I$ ), ou do modo II ( $G_{II}$ ), bem como o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, são utilizados nos estudos em juntas adesivas [22], ao invés de se utilizarem fatores de intensidade de tensão. Isto porque, quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade, estes fatores não são determinados facilmente.

A fratura de juntas adesivas também é considerada em modo misto, tendo em conta as diferenciadas propriedades dos adesivos em tração e corte e devido ao efeito dos substratos. Deste modo, é necessário introduzir o conceito de envelope da fratura, que

fornece uma função para a rotura, onde as componentes de tenacidade de tração e corte são abrangidas, sempre que ambas estão presentes na solitação.

Existem várias publicações recentes que utilizaram a mecânica da fratura para a previsão de resistência de juntas adesivas [12], como por exemplo:

- O estudo desenvolvido por Doitrand et al. [23], onde foi prevista a iniciação de fendas em juntas adesivas por meio de aplicações 2D e 3D do critério de acoplamento, sob tensão e flexão. Concluiu-se que a aplicação 3D do critério acoplado permite determinar a topologia da fenda, quando comparada à aplicação 2D;
- O estudo desenvolvido por Le Pavic et al. [24], onde foi abordada uma implementação de um esforço acoplado e critérios energéticos para prever a resistência de juntas adesivas em estruturas industriais. Concluiu-se que o uso da solução de forma fechada permitiu prever mais rapidamente a carga de falha e de forma mais conservadora, em comparação com os resultados experimentais.

### 2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

Barenblatt [25] e Dugdale [26] foram autores pioneiros a realizar estudos que apresentam o conceito dos Modelos de Dano Coesivo (MDC). Estes estudos descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda em relação ao efeito das cargas estáticas e, desta forma, deu-se início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC permitem a análise do início de uma fenda e a sua propagação no interior ou na interface dos materiais ou, também, em delaminação de compósitos. Estes modelos podem ser implementados em elementos de mola ou em elementos coesivos, que é considerada a forma mais convencional [27].

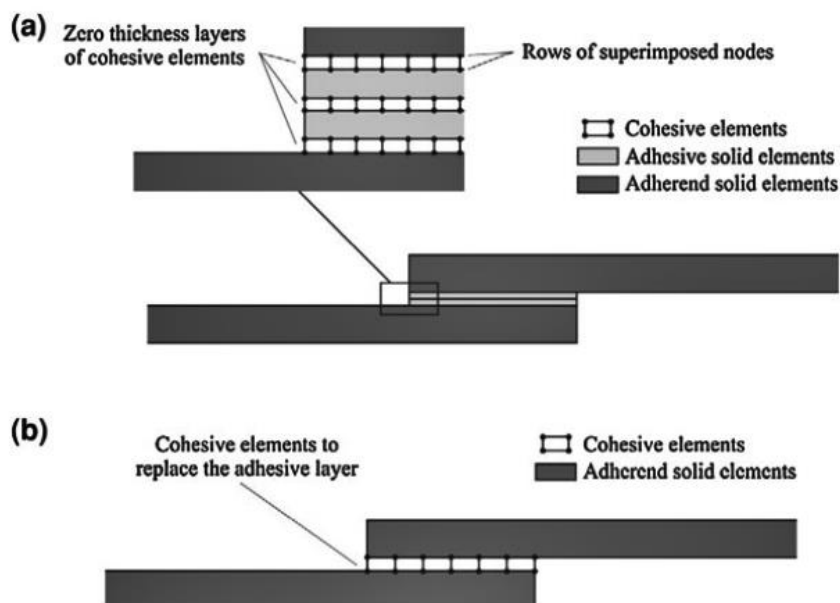


Figura 7 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) [28]

Os programas de análise por MEF podem integrar os MDC para modelação do comportamento de materiais sujeitos à fratura [29]. Os MDC têm como princípio fundamental a possibilidade de introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, de modo a avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. Esta técnica estabelece leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas, que são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos. As leis coesivas podem ligar os nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [30] ou, ainda, ser aplicadas diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material e, por exemplo, a simulação de uma ligação adesiva - aproximação contínua [31] (Figura 7).

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, o que desvaloriza os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Os MDC são utilizados na simulação da evolução elástica da tensão e conseqüente amaciamento até à rotura completa, o que permite simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. Geralmente, as leis de tração-separação são construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, ainda que possam ser definidas de uma forma diferentes, de modo a ser possível obter uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [32]. Este modelo encontra-se implementado em *softwares*, nomeadamente o Abaqus®, em duas dimensões (modelo 2D) e em três dimensões (modelo 3D), para uma análise estática. Relativamente ao modelo 2D, o modelo 3D apresenta uma componente adicional de corte [33].

Existem várias publicações recentes que utilizaram os MDC para a previsão de resistência de juntas adesivas [12], como por exemplo:

- O estudo desenvolvido por Stuparu et al. [34], onde foi simulado, no Abaqus®, o comportamento e a resistência de juntas adesivas de sobreposição simples, a partir de um MDC distinto, que mostra a variação de tensões normalizadas e danos na zona de processo deste tipo de juntas. Concluiu-se que as simulações numéricas estimam de forma exagerada a resistência e rigidez das juntas;
- O estudo desenvolvido por Floro et al. [35], onde foi simulado o comportamento à fratura de juntas adesivas, a partir de um MDC, com o objetivo de avaliar o método usado e indicar os seus pontos fortes e fracos. Concluiu-se que este método é adequado para condições de carregamento em modo I, porém são necessárias modificações neste método para condições de carregamento em modo II e modo misto.

### 2.2.2.3.1 Tipos de leis coesivas

Vários modelos de MDC foram estudados ao longo dos anos, como o modelo linear parabólico [36], triangular [37], exponencial [38], polinomial [39] e trapezoidal [31]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, é possível considerar formas distintas de leis coesivas para obter resultados mais precisos [40].

A lei triangular é a mais utilizada devido à sua simplicidade, ao número reduzido de parâmetros a serem determinados e pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [41]. O modo puro é a lei de maiores dimensões, que se caracteriza pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos, sempre que os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. Por outro lado, o modo misto é considerado a lei de menores dimensões, caracterizado por utilizar critérios energéticos e de tensões, de modo a combinar os modos puros de tração e corte [42]. A lei coesiva trapezoidal permite uma simulação adequada do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [43] e em modo II [44].

### 2.2.2.3.2 Determinação dos parâmetros coesivos

Os parâmetros coesivos devem ser calibrados em ensaios experimentais e respetivamente validados, para que seja obtida uma simulação com maior precisão da rotura da ligação [45]. Jung Lee et al. [46] assumem que alguns parâmetros como a tensão máxima de tração ( $t_n^0$ ) e a tensão máxima de corte ( $t_s^0$ ) ainda não se encontram devidamente padronizados, pelo que surgem algumas técnicas de análise de dados, como o método de definição individual de parâmetros, o método direto e o método inverso. Existem, ainda, alguns trabalhos realizados que obtiveram bons resultados na validação de ensaios em modo misto, pela estimativa dos MDC em modo puro através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF) [31, 47].

O método individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. Contudo, é considerado um método menos preciso devido a desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a ligação adesiva [48]. O método inverso consiste no procedimento iterativo de ajuste entre as previsões numéricas e os dados experimentais e considera a curva  $P-\delta$ , que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições específicas em que está a executar o ajuste de parâmetros [49]. O método direto permite definir a forma exata das leis coesivas, uma vez que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura, através da diferenciação das curvas  $G_I-\delta_n$  ou  $G_{II}-\delta_s$ , onde  $\delta_n$  e  $\delta_s$  são os deslocamentos em tração e em corte, respetivamente [48].

Os ensaios tipicamente usados para a determinação das componentes  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ , independentemente da técnica utilizada para a avaliação dos parâmetros coesivos, são os ensaios para tração DCB e corte ENF, respetivamente. Estes ensaios serão descritos de forma detalhada no Capítulo 2.3.

#### 2.2.2.4 *Mecânica do dano*

Na previsão de resistência, a mecânica do dano diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Estes métodos estabelecem um parâmetro de dano para que seja possível modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Daudeville e Ladevèze [50] e Khoramishad et al. [51] aplicaram esta metodologia nos seus trabalhos, para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz e para camadas finas de adesivo, respetivamente. O parâmetro de dano estabelecido nestes trabalhos resulta na possibilidade de obter a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [27].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo, as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, apesar de não estarem diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a área relativa de micro-cavidades ou a dimensão das porosidades [52]. O crescimento do dano é definido, pela mecânica do dano, em função da carga para simulações estáticas [53] ou em função do número de ciclos para análises de fadiga [54, 55]. Em aplicações específicas, quando comparada aos MDC, a mecânica do dano pode ser sugerida no caso de o dano ser generalizado ou, ainda, no caso de o caminho de propagação da fenda não ser conhecido, uma vez que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [56].

Hua et al. [57] sugeriram um modelo de mecânica do dano que apresenta resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil, sujeitas a degradação ambiental. Este efeito era alcançado na modelação numérica, através da introdução de um parâmetro de dano, baseado no deslocamento e na equação constitutiva dos materiais, que depende do grau de humidade. Para calibrar este parâmetro de dano foram realizados ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto. Desta forma, foram reduzidos os valores de tensão na junta de acordo com o deslocamento plástico equivalente, o que permitiu a obtenção de resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Existem várias publicações recentes que utilizaram a mecânica do dano para a previsão de resistência de juntas adesivas [12], como por exemplo:

- O estudo desenvolvido por Kim e Hong [58], onde foi proposta uma adaptação de um modelo de dano de modo misto I+II, que permite simular diferentes caminhos de propagação de fenda em juntas adesivas, baseada na evolução exponencial do dano. Concluiu-se que a aplicação do modelo proposto permite efetuar a simulação de um caminho de propagação de fenda assimétrica e que as comparações com os resultados experimentais estão em concordância;

- O estudo desenvolvido por Riccio et al. [59], onde foi simulada a trajetória da propagação da fenda dentro de uma camada adesiva, através de um ensaio de flexão de três pontos. Neste estudo também foi avaliada a distribuição de tensões e a resistência à fratura em juntas de chanfro. O modelo de dano proposto foi aplicado a diferentes configurações de junta. Concluiu-se que este modelo foi capaz de aumentar consideravelmente a eficácia das previsões de resistência, quando comparado com os resultados experimentais.

### 2.2.2.5 Método dos Elementos Finitos Extendido

O Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX) é um método relativamente recente derivado de uma evolução do MEF, que se traduz numa nova técnica para modelar a propagação de fendas e permite a análise do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas. Este método é baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores dos deslocamentos de tração e corte correspondentes à carga máxima ( $P_{máx}$ ), utilizados nos MDC. Uma vantagem significativa no MEFX, quando comparado aos MDC, consiste em deixar de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido. Deste modo, a fenda pode então propagar-se livremente no interior da estrutura sem a necessidade de a malha coincidir com a geometria das discontinuidades e carecimento de refazer a malha na proximidade da fenda [60].

Belytschko e Black [61] apresentaram as características fundamentais do MEFX, baseadas no conceito de partição de unidade. Este conceito pode ser implementado no MEF através da introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto da extremidade da fenda, de modo a permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [62].

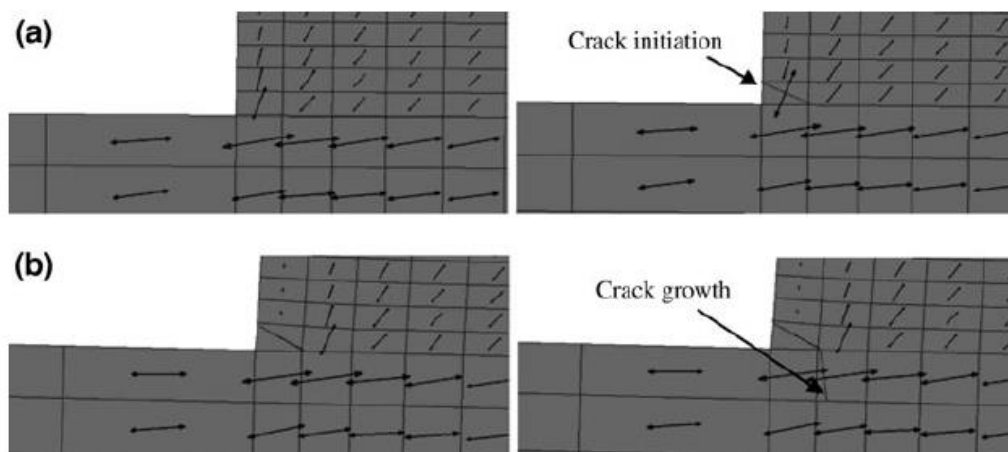


Figura 8 - Representação das tensões pelo uso do MEFX numa junta de sobreposição simples: (a) iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (b) e crescimento dano do aderente de alumínio [28]

Campilho et al. [63] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla com um adesivo dúctil, com o objetivo de comparar os resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 8). Estes autores concluíram que, neste estudo, o MEFX não é considerado o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo. Isto deve-se ao facto de a direção da fenda ser perpendicular à tensão principal máxima, o que se traduz na propagação do dano na direção dos substratos, ao invés de ocorrer ao longo da camada do adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas adesivas. Em contrapartida, os resultados pelos MDC indicaram previsões bastante precisas do comportamento da junta.

Existem várias publicações recentes que utilizaram o MEFX para a previsão de resistência de juntas adesivas [12], como por exemplo:

- O estudo desenvolvido por Fernandes et al. [64], onde foi analisado o desempenho de três adesivos diferentes em juntas de sobreposição simples. Este estudo foi acompanhado por uma análise numérica com base no MEFX, o que permitiu detalhar o desempenho desse método aplicado às juntas adesivas. Concluiu-se que o MEFX não é o método mais adequado para a caracterização do crescimento de danos no modo misto, embora tenha sido alcançada uma previsão aproximada;
- O estudo desenvolvido por Stein et al. [65], onde foi proposta uma melhoria na abordagem do MEFX, que consiste em desviar a propagação da fenda quando é esperado que esta se propague de um material para outro mais rígido, através da análise do crescimento de fendas. Concluiu-se que esta proposta permite uma previsão realista de resistências e trajetórias de fenda com propagação da fenda apenas no adesivo, pelo que pode ser aplicada ao estudo de processos de fratura.

### 2.3 Ensaios de caracterização à fratura

O aumento do uso de adesivos estruturais implica um estudo aprofundado das suas características e diferentes aplicações, de modo a prever a resistência à fratura e a garantir um melhor desempenho de cada adesivo. Principalmente quando aplicados em juntas adesivas, o desempenho dos adesivos estruturais depende de um conjunto de propriedades, normalmente divididas em: propriedades físicas, mecânicas e térmicas. As propriedades físicas e térmicas são intrínsecas à natureza do adesivo, enquanto a análise das propriedades mecânicas é apenas baseada na realização de ensaios [5].

Geralmente, os ensaios de caracterização à fratura em juntas adesivas baseiam-se nos conceitos da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE). Estes conceitos estabelecem que a deformação dos substratos se mantém linear elástica durante o carregamento e que qualquer plasticidade é limitada para uma pequena região à frente da ponta da fenda [2].

As juntas adesivas com uma espessura de adesivo compreendida entre 0,1 e 2,0 mm são consideradas ideais para o estudo da tenacidade à fratura ( $G_c$ ). Numa junta adesiva, os aderentes próximos afetam o comportamento do adesivo. Isto pode limitar o tamanho da zona plástica que se forma na ponta da fenda que, por consequência, limita a tenacidade da junta [2].

O ensaio do adesivo, como parte de um sistema de junta adesiva, permite obter análises adicionais relacionadas com a localização do caminho de falha. Este pode ser coesivo no adesivo, próximo da interface ou, ainda, através do aderente. Os potenciais cenários para o caminho de falha podem resultar em diferentes medições de resistência à fratura. Portanto, os ensaios em juntas adesivas são bastante complexos e considerados realmente relevantes para a caracterização à fratura. Contudo, em provetes de juntas adesivas, a direção da fenda e o caminho de falha resultante são normalmente restritos, o que pode originar fendas que se propagam sob condições de carregamento em modo misto [2].

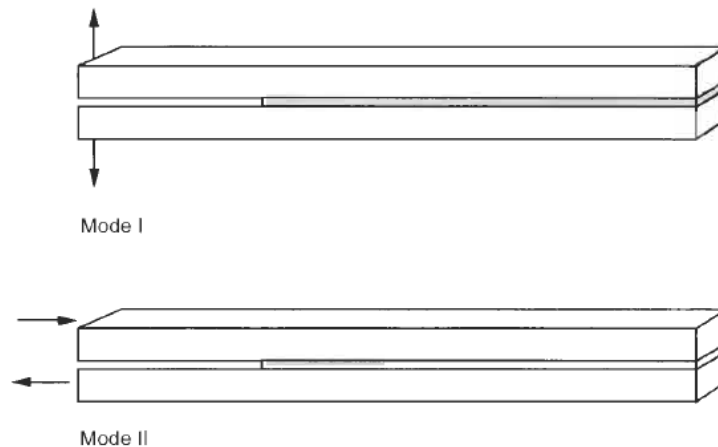


Figura 9 - Representação esquemática do modo puro I e do modo puro II [66]

Em algumas aplicações, as juntas adesivas são submetidas apenas a tensões de tração ou tensões de corte, provocadas por carregamentos em modo I e em modo II, respetivamente (Figura 9). Contudo, na prática, a combinação de ambas tensões corresponde às aplicações mais comuns. O carregamento em modo misto resulta da combinação do modo I com o modo II, onde as tensões de tração e de corte estão presentes na junta adesiva durante as condições de carregamento a que esta é submetida. A existência da condição de carregamento em modo misto aumenta significativamente a complexidade da previsão de resistência das juntas adesivas [66].

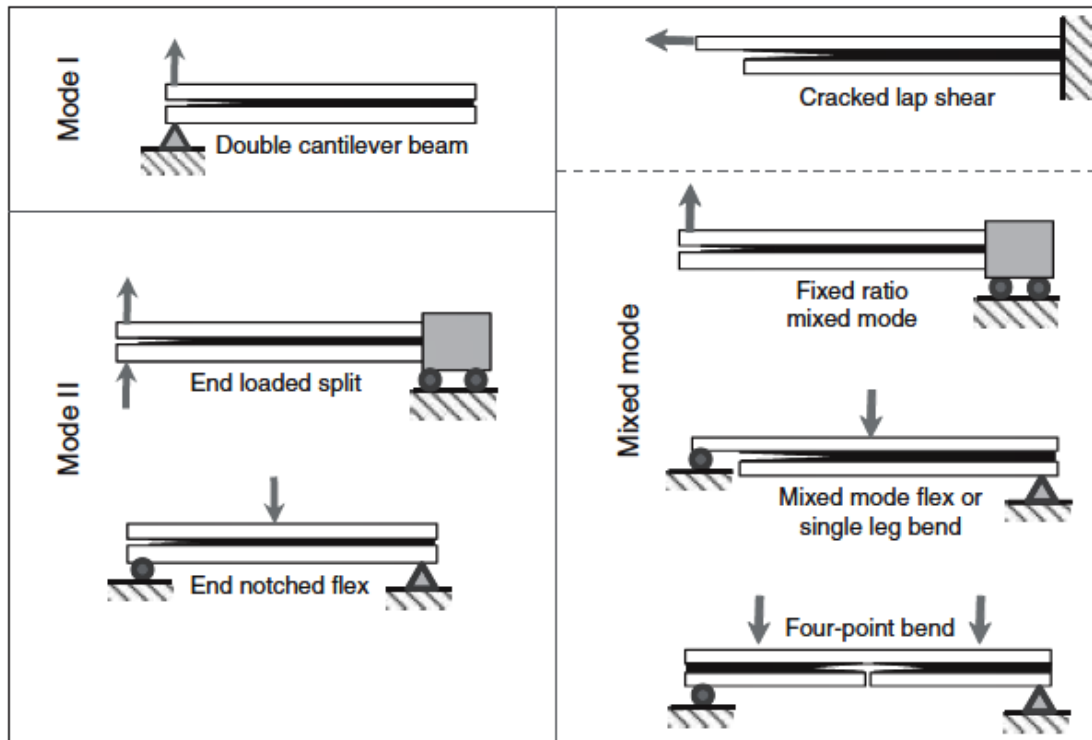


Figura 10 - Representações esquemáticas de ensaios de caracterização à fratura nos modo I, II e misto (I+II) [67]

Os ensaios mais utilizados para a caracterização à fratura em modo I, modo II e modo I+II, representados na Figura 10, são descritos de forma detalhada nos pontos seguintes, bem como outros ensaios considerados relevantes.

### 2.3.1 Fratura em tração (modo I)

O modo I corresponde ao movimento de abertura da fenda na direção perpendicular ao seu plano, por efeito das tensões de tração nessa direção. É o modo mais crítico no que se refere à propagação da fenda, devido ao facto de as tensões serem concentradas em porções menores no adesivo e por a junta apresentar menor resistência ao arrancamento do que ao corte [5].

#### 2.3.1.1 Double-Cantilever Beam (DCB)

A caracterização à fratura em tração de juntas adesivas é realizada, principalmente, pelo ensaio DCB, através da medição de  $G_{Ic}$  pois este ensaio apresenta uma geometria simples e de fácil fabrico dos provetes [2]. Este ensaio foi inicialmente descrito pela norma ASTM D3433-99 [68], sendo que ao longo dos anos foi aprimorado e tornou-se também normalizado pela norma ISO 25217-09 [69].

O provete de ensaio DCB (Figura 11) é constituído por dois aderentes simétricos (*the double cantilevers*), retangulares e de dimensões iguais, colados por uma camada fina de adesivo de modo a formar a junta. Esta configuração exige um comprimento de fenda inicial ( $a_0$ ), sem adesivo, numa das extremidades do provete de ensaio. Devido a este facto, torna-se necessário um sistema de fixação de autoalinhamento, de modo

a garantir um estado uniaxial de tração [2]. Porém, o ensaio DCB pode apresentar algumas dificuldades na determinação do valor de  $G_{Ic}$ . Em alguns casos, a propagação da fenda pode ser instável, o que dificulta a medição do valor de  $a$ , durante o ensaio, uma vez que a ponta da fenda pode não ser claramente visível pois depende do adesivo utilizado [44].

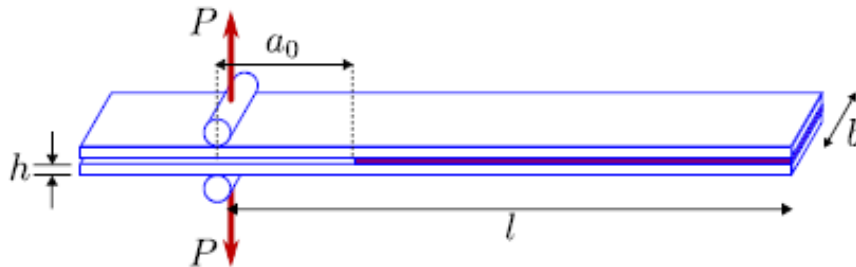


Figura 11 - Representação esquemática do provete de ensaio DCB [70]

A norma ASTM D3433-99 [68] designa que a velocidade do ensaio DCB deverá ser contínua um minuto após o início do ensaio, de modo a que a pré-fenda se possa desenvolver. Portanto, uma velocidade compreendida entre 0,5 e 3,0 mm/min, que depende da geometria da junta e das propriedades do material, é recomendada [5].

### 2.3.1.2 Tapered Double-Cantilever Beam (TDCB)

Uma alternativa ao ensaio DCB para a caracterização à fratura em tração de juntas adesivas é o ensaio TDCB, também normalizado pela norma ASTM D3433-99 [68]. Este ensaio foi desenvolvido com o principal objetivo de permitir obter  $G_{Ic}$  sem a necessidade de realizar a medição do valor de  $a$  [5].

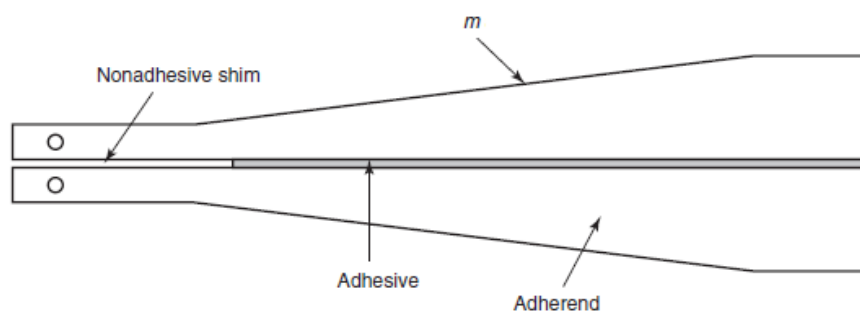


Figura 12 - Representação esquemática do provete de ensaio TDCB [67]

O provete de ensaio TDCB (Figura 12) é constituído por dois aderentes simétricos que, ao contrário do provete de ensaio DCB, não apresentam uma espessura constante em toda a sua extensão. Por outro lado, de igual forma os aderentes são colados por uma camada fina de adesivo de modo a formar a junta. Esta configuração exige um  $a_0$ , sem adesivo, numa das extremidades do provete de ensaio. A espessura dos aderentes ( $h$ ) do provete de ensaio é afilada de modo a permitir uma taxa constante de mudança conforme o valor de  $a$  [2].

O aumento da espessura dos aderentes do provete de ensaio proporciona uma maior resistência à deformação plástica nos aderentes do provete de ensaio. Este efeito é considerado como uma vantagem do ensaio TDCB, uma vez que pode facilitar que as condições dos conceitos da MFLE sejam mantidas na junta [2]. Contudo, a geometria dos aderentes do provete de ensaio TDCB implica um processo de fabrico complexo [5]. Esta geometria é projetada de forma a que o fator de geometria ( $m$ ) se mantenha constante (Figura 12) [67]. Os aderentes apresentam valores de  $h$  constantes nas suas extremidades e, na zona intermédia,  $m$  é dado pela equação (1):

$$m = \frac{3a^3}{h^3} + \frac{1}{h}. \quad (1)$$

### 2.3.2 Fratura em corte (modo II)

O modo II é considerado o modo deslizante devido ao corte, onde as superfícies da fenda se deslocam uma sobre a outra no sentido perpendicular à frente da fenda. Até ao momento, não existe qualquer norma para caracterização à fratura em corte de juntas adesivas. A maior parte dos artigos publicados baseiam-se em ensaios geralmente utilizados para a caracterização à fratura interlaminar de modo II em materiais compósitos [5].

Uma desvantagem inerente aos principais ensaios para a caracterização à fratura em modo II está relacionada com a necessidade de realizar a monitorização de  $a$  durante a sua propagação, visto que a fenda se propaga sem ocorrer abertura, o que impede uma clara visualização da ponta da fenda [67].

#### 2.3.2.1 End-Notched Flexure (ENF)

A caracterização à fratura por corte de juntas adesivas é realizada, principalmente, pelo ensaio ENF, devido à simplicidade e precisão deste ensaio. Contudo, este ensaio apresenta alguns problemas relacionados com uma propagação de fenda instável. A abordagem analítica aplicada ao ensaio ENF é baseada na teoria das vigas clássica, onde ambos aderentes atuam como vigas independentes na região da fenda, sendo que cada viga suporta metade da carga aplicada [5].

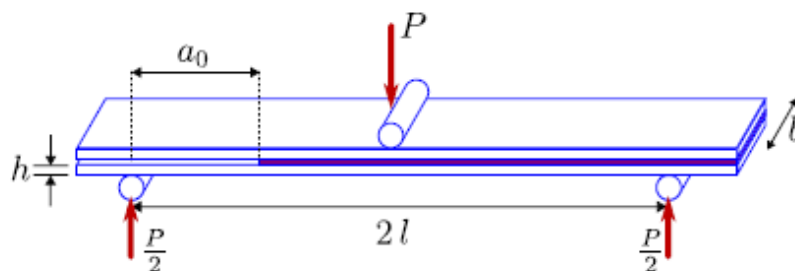


Figura 13 - Representação esquemática do provete de ensaio ENF [70]

O provete de ensaio ENF (Figura 13) é constituído por dois aderentes simétricos, retangulares e de dimensões iguais, colados por uma camada fina de adesivo de modo

a formar a junta, e simplesmente apoiados nas extremidades. Esta configuração exige um  $a_0$ , sem adesivo, numa das extremidades do provete de ensaio [2]. A solicitação aplicada promove a propagação da fenda sem que ocorra a separação dos aderentes. A propagação da fenda é estável quando  $a_0$  é pelo menos igual a 70% do comprimento total do provete ( $2L$ ) [71].

### 2.3.2.2 Four-Point End-Notched Flexure (4ENF)

Uma alternativa ao ensaio ENF para a caracterização à fratura em corte de juntas adesivas é o ensaio 4ENF, onde a propagação da fenda é estável, embora seja mais complexo e exija dispositivos de configuração e monitorização mais sofisticados [5]. O ensaio 4ENF implica que sejam aplicadas cargas mais elevadas, devido às forças de atrito que atuam nas faces das superfícies de fratura serem superiores às registadas no ensaio ENF [2].

O provete de ensaio 4ENF (Figura 14) é geometricamente igual ao provete de ensaio ENF, pelo que também exige um  $a_0$ , sem adesivo, numa das extremidades do provete de ensaio. A plataforma de carregamento pode girar livremente de modo a garantir uma aplicação uniforme da carga entre os dois cilindros [2].

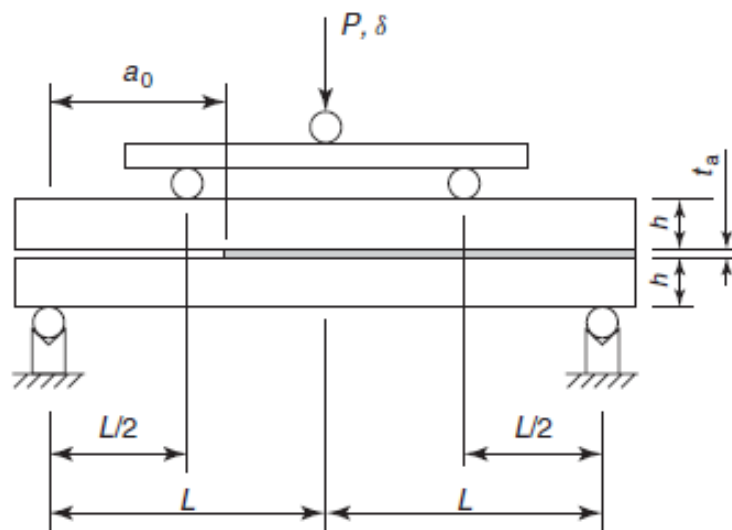


Figura 14 - Representação esquemática do provete de ensaio 4ENF [67]

### 2.3.2.3 End-Loaded Split (ELS)

Este ensaio apresenta algumas dificuldades na avaliação de  $G_{IIC}$  devido à existência de grandes deslocamentos e de alguma sensibilidade às condições de aperto [5].

O ensaio ELS exige que o provete de ensaio (Figura 15) seja fixo numa plataforma linear com rolamentos que possa deslizar horizontalmente de forma livre. O provete de ensaio pode ser projetado de modo a manter a propagação da fenda estável. Durante o ensaio ELS são medidos os valores da carga ( $P$ ), do deslocamento ( $\delta$ ) e de  $a$  [2]. Enquanto o ensaio é realizado, são registados os valores de  $P$  e  $\delta$ , para o valor de  $a$  correspondente.

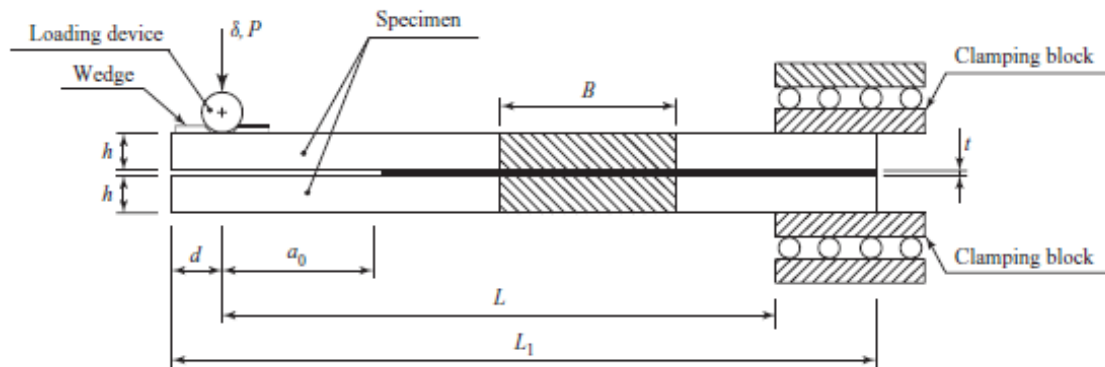


Figura 15 - Representação esquemática do provete de ensaio ELS [67]

### 2.3.3 Fratura em modo misto (modo I+II)

Frequentemente, em aplicações reais, as juntas adesivas são submetidas a solicitações de modo misto (modo I+II). Nos ensaios de modo misto utilizam-se provetes de ensaio idênticos aos ensaios em modo puro I e modo puro II, com a diferença na forma como se aplica a carga para obter a combinação de ambos os modos. Alguns destes ensaios permitem a variação do rácio entre o modo I e o modo II e, desta forma, analisar a influência do rácio de modo misto na resistência à fratura da junta [2].

À semelhança do modo II, nos ensaios de modo misto o caminho de falha geralmente não se encontra no centro da camada adesiva, uma vez que, normalmente, este se desvia de modo a aproximar-se da interface com o substrato superior. Contudo, esta é uma característica pouco relevante tendo em conta a proporção de modo misto aplicada. Deste modo, ao assumir que o caminho de falha permanece essencialmente o mesmo, é observado que a resistência à fratura aumenta com o aumento da percentagem de modo II do ensaio [2].

#### 2.3.3.1 Asymmetric Double-Cantilever Beam (ADCB)

O ensaio ADCB é semelhante ao ensaio DCB para o modo puro I. Porém, o provete do ensaio ADCB é constituído por dois aderentes de materiais ou espessuras diferentes (Figura 16), de modo a permitir um estudo da resistência à fratura em modo misto. A assimetria dos aderentes permite a criação de um carregamento em modo misto cujo rácio é definido pela relação entre as espessuras dos dois aderentes [72].

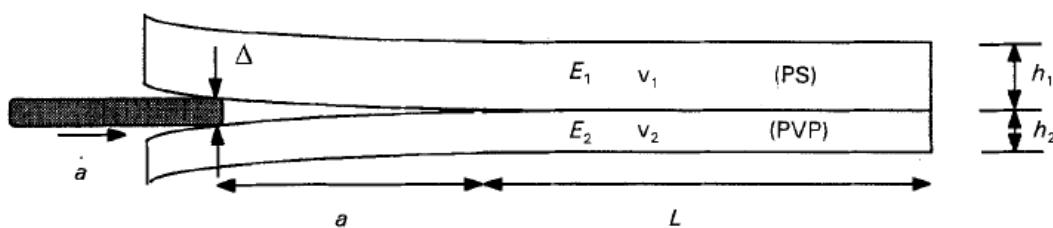


Figura 16 - Representação esquemática do provete de ensaio ADCB [73]

Xiao et al. [73] apresentaram um modelo que considera o provete de ensaio ADCB dividido em dois aderentes elásticos, para determinar o valor de  $G_c$  em modo misto. Este modelo assume que toda a energia elástica libertada durante a fratura resulta exclusivamente da flexão dos dois aderentes da amostra. Em contrapartida, Creton et al. [74] propuseram uma melhor descrição para o comportamento da fratura em modo misto do ensaio ADCB, ao aplicar o modelo sugerido por Kannien [75] à teoria das vigas simples. Este modelo considera que a viga permanece livre na zona fraturada, embora apoiada por uma fundação elástica da ponta da fenda.

### 2.3.3.2 *Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam (ATDCB)*

O ensaio ATDCB, recentemente proposto por Park e Dillard [76], consiste numa configuração híbrida, onde um aderente apresenta uma secção constante e o outro aderente é cónico (Figura 17), à semelhança da geometria típica do ensaio TDCB.

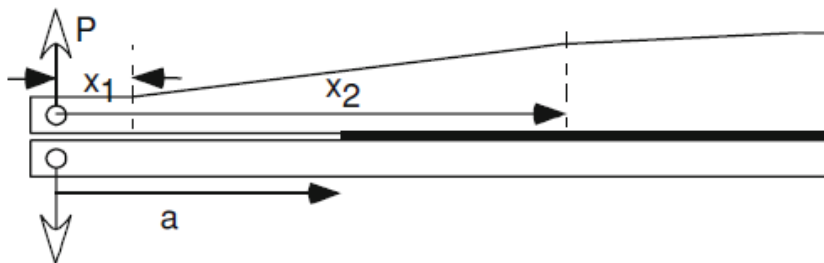


Figura 17 - Representação esquemática do provete de ensaio ATDCB [76]

À medida que o deslocamento se propaga, a rigidez dos aderentes varia de forma sistemática, o que resulta numa faixa de mixidades de modo de  $0^\circ$  a aproximadamente  $20^\circ$ . Embora a amplitude de mixidade de modo disponível neste ensaio seja limitada, a faixa útil é considerada cada vez mais interessante para ensaios de caracterização à fratura [76].

### 2.3.3.3 *Fixed-Ratio Mixed-Mode (FRMM)*

O ensaio FRMM fornece um único rácio de modo misto,  $G_I/G_{II}=4/3$ , para uma junta com substratos de espessura igual [77]. À semelhança do ensaio ELS, o ensaio FRMM exige que o provete de ensaio (Figura 18) seja fixo numa plataforma linear com rolamentos que possa deslizar horizontalmente de forma livre. A aplicação da carga ao aderente superior permite que a extremidade do aderente inferior deforme livremente. Devido à quantidade significativa de carregamento em modo I presente no provete de ensaio FRMM, a abertura da ponta da fenda é mais acentuada, o que facilita a sua deteção. Esta deformação desigual entre os aderentes do provete de ensaio induz o modo II [67].

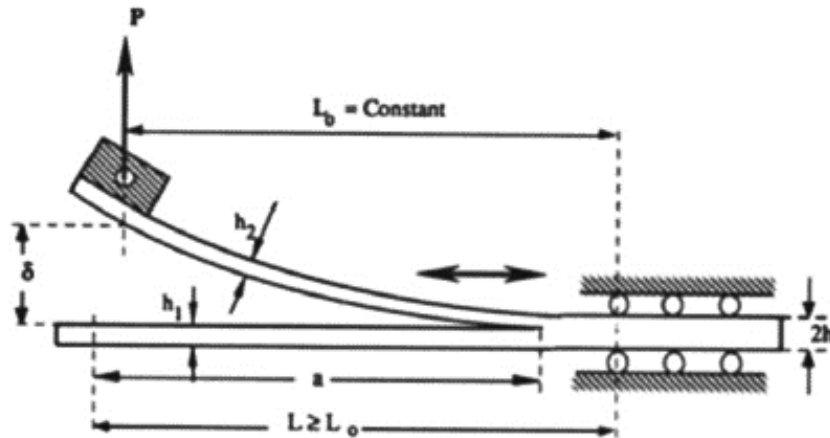


Figura 18 - Representação esquemática do provete de ensaio FRMM [78]

#### 2.3.3.4 Single-Leg Bending (SLB)

O ensaio SLB, proposto por Yoon e Hong [79] como um provete de ensaio ENF modificado, apresenta uma faixa de mixidade de modo limitada quando comparado ao ensaio MMB, embora o ensaio SLB exija menos equipamentos e o seu procedimento experimental seja mais fácil [80].

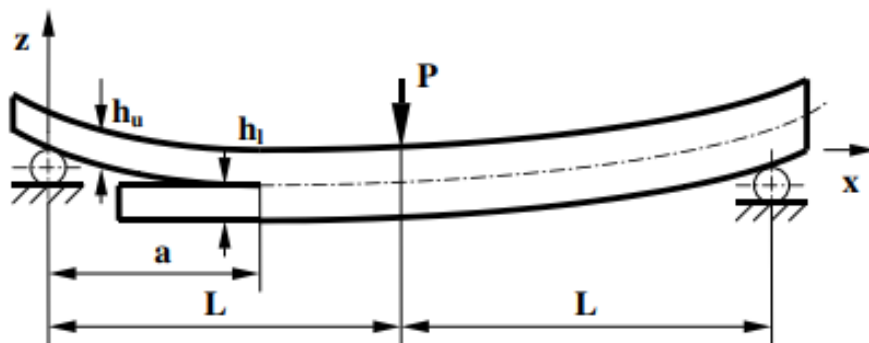


Figura 19 - Representação esquemática do provete de ensaio SLB [80]

O provete de ensaio SLB (Figura 19) é constituído por dois aderentes com comprimentos diferentes. O aderente superior é mais longo do que o aderente inferior, mas ambos são colados paralelamente por uma camada fina de adesivo de modo a formar a junta, e simplesmente apoiados nas extremidades. Esta configuração exige um  $a_0$ , sem adesivo, na extremidade do provete de ensaio onde existe a diferença de comprimento entre os aderentes [67].

#### 2.3.3.5 Mixed-Mode Bending (MMB)

O equipamento de ensaio MMB desenvolvido por Reeder e Crews [81, 82] apresenta uma configuração relativamente complexa (Figura 20). A principal vantagem do ensaio MMB, quando comparado com os restantes ensaios de modo misto, é permitir a variação do rácio de modo misto praticamente sem limitações [2].

Este ensaio é o principal caso de estudo deste trabalho, pelo que a sua caracterização será feita de forma mais detalhada no Capítulo 2.4.

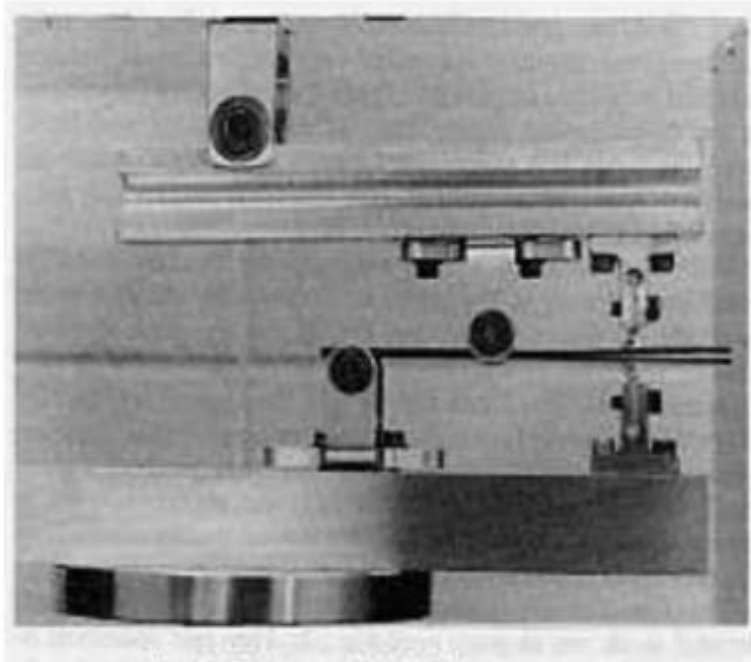


Figura 20 - Fotografia do primeiro equipamento de ensaio MMB desenvolvido [82]

## 2.4 Ensaio Mixed-Mode Bending (MMB)

O ensaio MMB é considerado o melhor método para a avaliação de  $G_c$  numa ampla gama de combinações de modo misto, uma vez que qualquer combinação de carregamento em modo I e em modo II pode ser investigada experimentalmente pela configuração MMB [83].

Ao longo dos anos, vários estudos sobre o ensaio MMB têm sido apresentados por diferentes autores. Estes estudos abrangem o desenvolvimento de diferentes propostas de configurações de equipamentos de ensaio MMB, bem como o desenvolvimento de diferentes métodos para a determinação da energia de fratura, para aplicações e materiais distintos. A maioria destes trabalhos tem foco no estudo de materiais compósitos [81, 82, 84-102], contudo existem vários trabalhos que estudaram outros materiais, como madeira [103-105], materiais metálicos [106, 107], estruturas *sandwich* [108], estruturas híbridas (*bimaterial*) [109, 110], adesivos estruturais [111, 112] ou, ainda, osso cortical [113].

O ensaio MMB é o único ensaio de modo misto normalizado (pela norma ASTM D6671/D6671M-06 [114]) para determinar o valor de  $G_c$  interlaminar de materiais compósitos em modo misto. Esta norma inclui a definição dos diferentes conceitos inerentes ao ensaio MMB, a descrição do equipamento de ensaio e respetivos funcionamento e calibração e, ainda, a descrição da configuração típica do provete de ensaio MMB.

O provete de ensaio MMB (Figura 21) é constituído por um laminado unidirecional, retangular e de espessura uniforme e contém uma inserção não adesiva no plano médio, que é utilizado como um indicador de delaminação, numa das extremidades do provete de ensaio. Esta configuração exige dois blocos de alumínio ou dobradiças, que são fixados ao laminado na mesma extremidade [114].

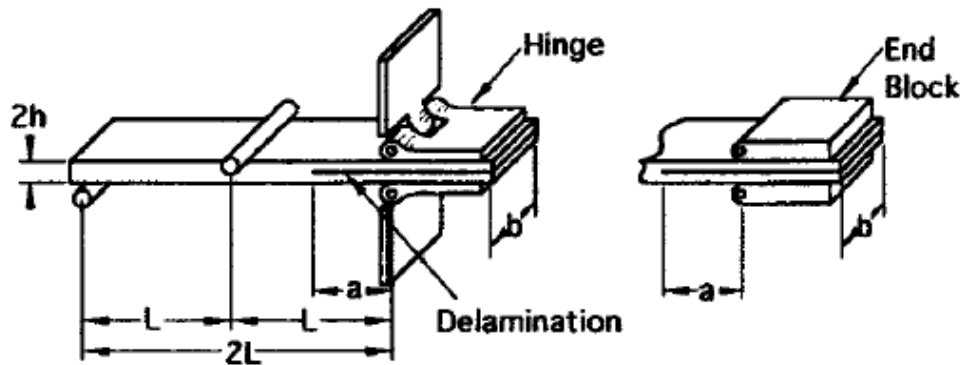


Figura 21 - Representação esquemática do provete de ensaio MMB [114]

A configuração do provete de ensaio DCB (Figura 11) é idêntica à configuração utilizada no ensaio MMB (Figura 21), o que permite a possibilidade da configuração do provete de ensaio DCB ser utilizada diretamente no ensaio MMB para avaliar o comportamento de propagação de fendas durante o ensaio e, deste modo, medir o valor de  $G_c$  em modo misto [67].

#### 2.4.1 Caracterização do ensaio

O ensaio MMB consiste na combinação dos ensaios DCB e ENF, usados para a caracterização de juntas adesivas em modo puro I e modo puro II, respetivamente [67]. Esta combinação é obtida com a adição de uma carga descendente, aplicada no comprimento médio do provete, como é possível verificar na Figura 22 (a). Esta carga adicional permite a separação unidirecional dos aderentes do provete de ensaio. Os valores relativos destas duas cargas aplicadas determinam o rácio de modo misto na extremidade da fenda. Ao aplicar estas duas cargas através de uma alavanca e de uma dobradiça, o ensaio é efetuado apenas com a aplicação de um único valor de  $P$ , de acordo com a Figura 22 (b). A posição do ponto de carregamento ( $c$ ) define o valor relativo destas duas cargas aplicadas ao provete de ensaio e, portanto, permite a variação do rácio de modo misto sem a necessidade de se alterar a geometria dos provetes de ensaio [81, 82].

O carregamento em modo puro I ocorre quando a alavanca de carregamento é removida e é aplicada uma carga ascendente à dobradiça. O carregamento em modo puro II resulta quando a carga é aplicada de forma a que  $c < L/3$ . Qualquer outra posição produz condições de carregamento em modo misto [83] (Figura 22).

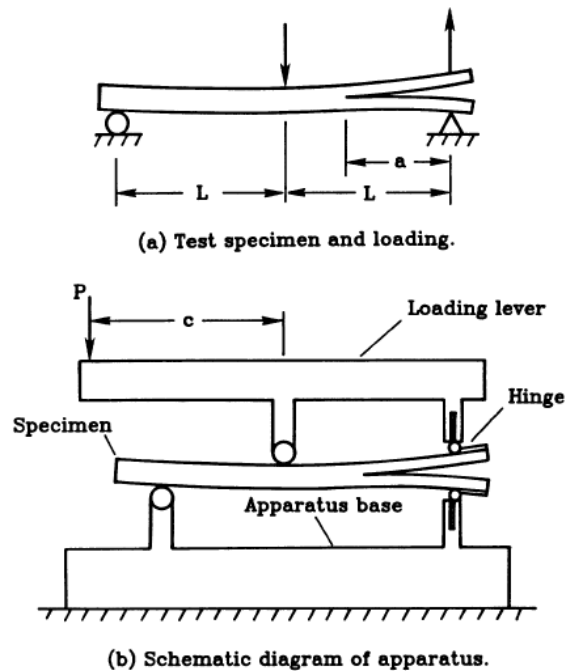


Figura 22 - Representação esquemática do ensaio MMB: (a) provete de ensaio e carregamento e (b) diagrama esquemático do equipamento [81]

## 2.4.2 Equipamentos desenvolvidos

O primeiro equipamento de ensaio MMB foi desenvolvido por Reeder e Crews [81, 82] (Figura 20) que foi posteriormente aprimorado pelos mesmos autores [115]. Ao longo do tempo, outros autores desenvolveram diversos estudos relativos ao ensaio MMB em aplicações distintas, o que permitiu o desenvolvimento de vários equipamentos diferentes. Os equipamentos desenvolvidos serão descritos de forma detalhada nos pontos seguintes, por ordem cronológica.

### 2.4.2.1 Equipamentos desenvolvidos por Reeder e Crews [81, 82, 115]

Após o desenvolvimento do primeiro equipamento de ensaio MMB (Figura 20), Reeder e Crews [115] efetuaram uma análise iterativa que considera a não linearidade geométrica do mesmo. Esta análise previu com precisão a resposta da curva  $P-\delta$  obtida e o valor de  $G_c$  do provete de ensaio utilizada na versão original do equipamento. Estes autores verificaram ainda que a versão original do equipamento (Figura 20) apresentava um problema que afetava consideravelmente os resultados do ensaio. A alavanca de carregamento estava sujeita a um movimento de rotação durante a propagação da fenda e, por consequência, os momentos fletores variavam conforme o valor de  $a$ .

Com o objetivo de corrigir este problema e minimizar a não linearidade, com base na versão original do equipamento, Reeder e Crews [115] redesenharam o equipamento, onde a principal alteração consiste no ajuste do posicionamento do pino de carregamento intermediário na viga superior do equipamento (Figura 23), através da adição de uma sela para que a alavanca não entre em contacto com o provete de

ensaio durante o carregamento. A sela estende-se na vertical em ambos os lados da alavanca e do provete de ensaio, o que permite a variação das distâncias  $b$  e  $c$ , elimina a não linearidade geométrica e, por consequência, permite obter o rácio de modo misto ( $G_I/G_{II}$ ) independente do valor de  $a$ .

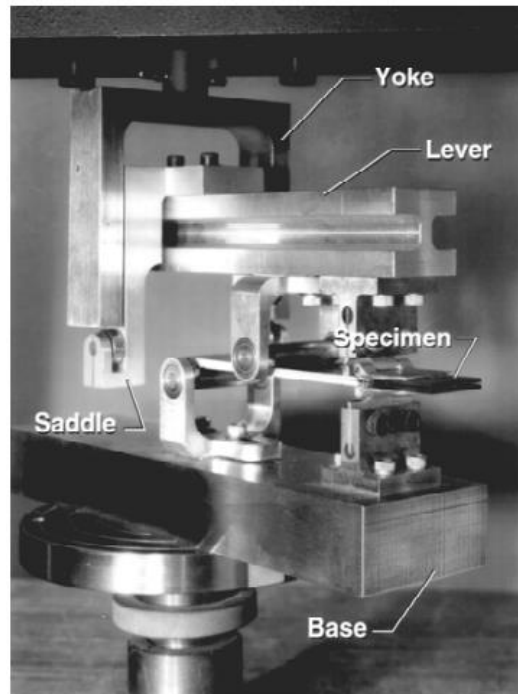


Figura 23 - Fotografia do equipamento de ensaio MMB redesenhado por Reeder e Crews [115]

Porém, o equipamento de ensaio MMB redesenhado por Reeder e Crews [115] não permite a redução de erros na determinação do valor de  $G_c$  causados pelo peso da alavanca. Posto isto, Reeder [116] apresentou um estudo em que avalia os efeitos do peso da alavanca do equipamento de ensaio MMB redesenhado e concluiu que o peso da alavanca pode originar erros significativos quando são testados materiais com menor valor de  $G_c$ .

Mais tarde, com base nas duas versões dos equipamentos, Kinloch et al. [78] investigaram a influência das diferentes geometrias do ensaio MMB na delaminação de modo misto de materiais compósitos de fibra polimérica. Desta abordagem concluíram que a versão original (Figura 20) apresentou grandes problemas, quando utilizada para a obtenção dos valores de energia de fratura interlaminar. Contudo, a versão redenhada (Figura 23) apresenta resultados que estão de acordo com os valores obtidos através de outros métodos de ensaio bem fundados.

#### 2.4.2.2 Equipamento desenvolvido por Fernlund e Spelt [117]

Fernlund e Spelt [117] desenvolveram um equipamento de ensaio MMB (Figura 24) para a caracterização à fratura de juntas adesivas com aderentes metálicos, sob carregamentos em modos puro I, puro II e misto I+II. Este equipamento foi usado para obter o envelope de fratura completo de uma junta adesiva constituída por dois aderentes de alumínio colados por um adesivo de epóxico, sem a necessidade de

medição do valor de  $\alpha$ . A configuração deste equipamento consiste num sistema de braço articulado, onde duas vigas rígidas estão ligadas entre si, ao provete de ensaio e a uma placa de base. Ao alterar as distâncias  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$  e  $s_4$  é possível variar o rácio entre o modo I e o modo II o que permite a variação das forças  $F_1$  e  $F_2$ , aplicadas aos aderentes superior e inferior, respetivamente. Com o objetivo de minimizar as deformações e evitar não a linearidade geométrica, as duas vigas horizontais furadas foram fabricadas em aço de secção quadrada.

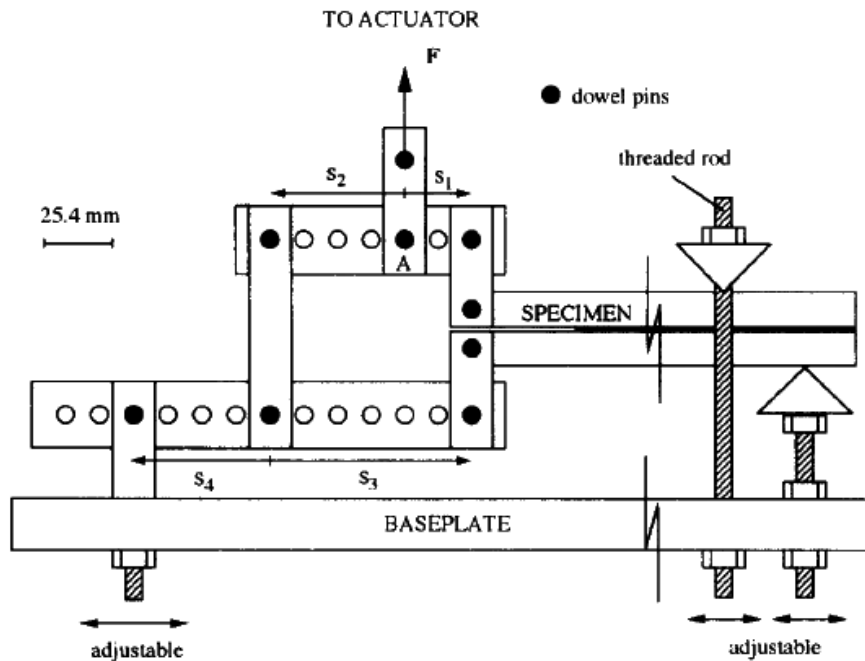


Figura 24 - Representação esquemática do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por Fernlund e Spelt [117]

#### 2.4.2.3 Equipamento desenvolvido por Chen et al. [118]

Com base na configuração de equipamento proposta por Reeder e Crews [115], Chen et al. [118] desenvolveram um equipamento de ensaio MMB (Figura 25) para promover a redução dos efeitos do peso da alavanca sobre os valores de  $G_c$  interlaminar em modo misto I+II. A principal alteração consiste em fixar dois rolos à sela, que apenas podem ser movidos horizontalmente e são colocados num suporte ligado à máquina de ensaio de tração (MTS). Os autores concluíram que o equipamento de ensaio MMB, por eles desenvolvido, pode evitar a influência da pré-carga causada pelo peso da alavanca no provete de ensaio.

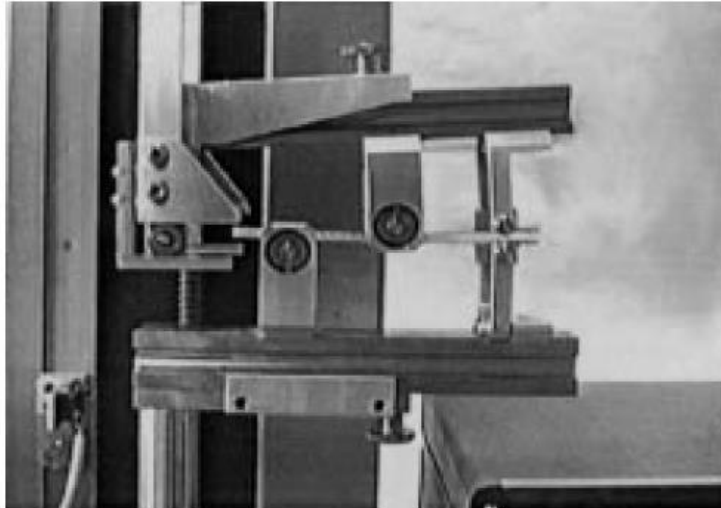


Figura 25 - Fotografia do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por Chen et al. [118]

#### 2.4.2.4 Equipamento desenvolvido por Liu et al. [107]

Com base na configuração de equipamento proposta por Reeder e Crews [81, 82, 115], Liu et al. [107] desenvolveram um equipamento de ensaio MMB (Figura 26) para a caracterização à fratura de juntas adesivas com aderentes metálicos, ambos de alumínio, sob carregamento em modo misto I+II. Estes autores utilizaram um novo conceito de aplicação de carga e uma nova configuração do provete de ensaio MMB. Com o objetivo de minimizar a plastificação nos aderentes antes do início da propagação da fenda, foram usadas vigas de apoio espessas. As estruturas originais da dobradiça foram substituídas por estruturas de pino com gancho de segurança, devido à facilidade da sua montagem. Esta alteração garante que a localização exata do centro de carregamento é muito próxima ao plano médio do provete de ensaio. Os rolamentos de esferas foram substituídos por rolamentos de rolos e buchas adaptadoras, o que permite aplicar um maior carregamento em modo misto. Os autores concluíram que o ensaio MMB é adequado para a caracterização à fratura de juntas adesivas com aderentes metálicos sob carregamento em modo misto I+II.

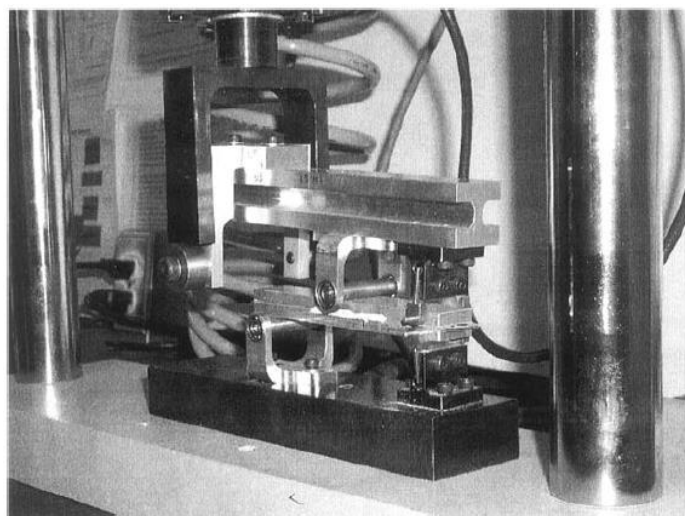


Figura 26 - Fotografia do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por Liu et al. [107]

#### 2.4.2.5 Equipamento desenvolvido por de Moura et al. [104, 105]

Os autores de Moura et al. [104, 105] desenvolveram um equipamento de ensaio MMB (Figura 27) para a caracterização à fratura de provetes de ensaio de madeira de pinho, sob carregamento em modo misto I+II. Este equipamento apresenta dimensões maiores em relação à configuração do equipamento original de Reeder e Crews [81, 82, 115], devido às grandes dimensões dos provetes de ensaio utilizados neste estudo. Deste modo, a alavanca de carregamento foi fabricada em alumínio, para diminuir o seu peso. Com o objetivo de obter um critério de fratura de modo misto para a madeira de pinho, os autores testaram vários rácios de modo a abranger uma ampla gama de combinações de modo misto. Um método de redução de dados baseado na flexibilidade do provete de ensaio, na teoria das vigas e no conceito de comprimento de fenda equivalente ( $a_e$ ) foi utilizado para obter os valores de  $G_I$  e  $G_{II}$ . Os diferentes critérios de fratura foram analisados e verificou-se que o critério de fratura linear é o mais adequado para caracterizar o comportamento de fratura de madeira de pinho.

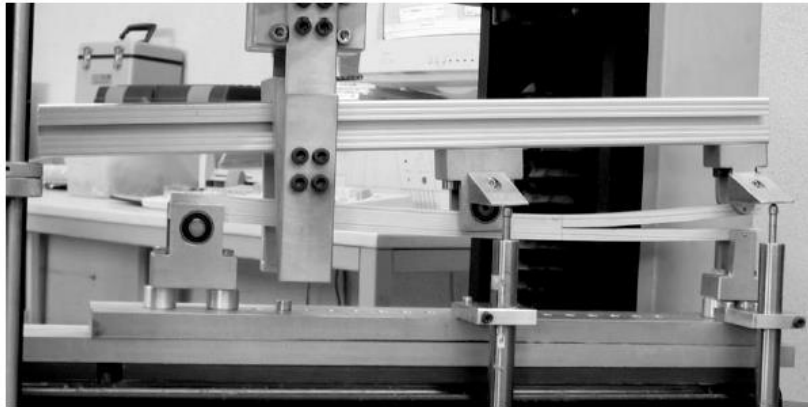


Figura 27 - Fotografia do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por de Moura et al. [104]

#### 2.4.2.6 Equipamento desenvolvido por Chaves [1]

Com base na configuração de equipamento proposta por Fernlund e Spelt [117], Chaves [1] desenvolveu um equipamento de ensaio MMB (Figura 28) para a caracterização à fratura de juntas adesivas, sob carregamentos em modos puro I, puro II e misto I+II. Este equipamento baseia-se exclusivamente na curva  $P-\delta$  registada durante o ensaio, que permite obter o envelope de fratura completo sem a necessidade de medição do valor de  $a$ . Outra vantagem deste equipamento, quando comparado aos restantes equipamentos desenvolvidos, é o posicionamento do provete de ensaio na parte interior da estrutura, o que diminui as dimensões gerais do equipamento e facilita as operações de ensaio exigidas.



Figura 28 - Fotografia do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por Chaves (adaptado de [1])

#### 2.4.2.7 Equipamento desenvolvido por Pereira et al. [113]

Pereira et al. [113] desenvolveram um equipamento de ensaio MMB (Figura 29) para a caracterização à fratura do osso cortical, sob carregamento em modo misto I+II. Este equipamento foi desenvolvido segundo as especificações da configuração do equipamento desenvolvido por de Moura et al. [104] (Figura 27) e de acordo com as dimensões limitadas dos provetes de ensaio utilizados neste estudo. Deste modo, pode considerar-se que este equipamento é uma versão em miniatura do equipamento desenvolvido por de Moura et al. [104] e que este é adequado para a caracterização à fratura do osso cortical sob carregamento em modo misto I+II.

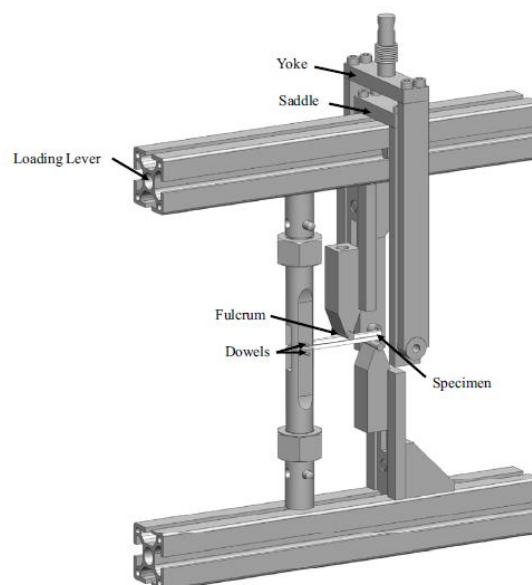


Figura 29 - Representação esquemática do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por Pereira et al. [113]

#### 2.4.2.8 Equipamento desenvolvido por Droubi et al. [106]

Droubi et al. [106] desenvolveram um equipamento de ensaio MMB (Figura 30) para a caracterização à fratura de juntas adesivas com aderentes metálicos, ambos de alumínio, sob carregamento em modo misto I+II. Este equipamento foi desenvolvido segundo uma adaptação da configuração do equipamento de ensaio MMB estabelecida na norma ASTM D6671/D6671M-06 [114]. De modo a garantir uma fixação rígida do equipamento e evitar o movimento livre, foi projetada uma placa de compressão para fixar a base da MTS, o que permite efetuar variações no comprimento do braço da alavanca. Esta alteração garantiu, ainda, que os pontos de carregamento desejados estivessem alinhados corretamente com as células de carregamento inferior e superior. A caracterização à fratura de juntas adesivas com aderentes metálicos, sob carregamento em modo misto I+II, foi efetuada com sucesso no ensaio MMB.

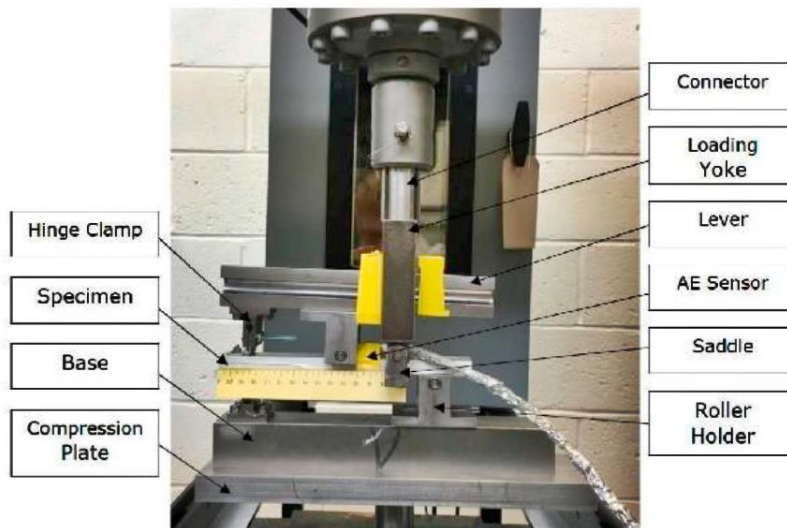


Figura 30 - Fotografia do equipamento de ensaio MMB desenvolvido por Droubi et al. [106]

#### 2.4.3 Métodos para determinação da energia de fratura

Existem vários estudos que apresentam métodos desenvolvidos para a determinação da energia de fratura. Os métodos mais comuns requerem a monitorização do valor de  $a$ , pelo que se podem considerar diferentes modelos possíveis. Estes modelos dependem ainda da configuração e aplicação da junta. Devido às dificuldades encontradas nos diversos estudos na monitorização do valor de  $a$ , foi desenvolvido um método com base no conceito de  $a_e$ , de modo a evitar a medição do valor de  $a$  durante o ensaio [67].

O valor de  $G$  pode ser calculado através de técnicas analíticas ou numéricas. Este valor pode ser comparado ao valor de  $G_c$ , que pode ser determinado experimentalmente sob carregamento em modo puro I e em modo puro II, através dos ensaios DCB e ENF, respetivamente. Porém, o ensaio MMB pode ser usado com um único tipo de provete de ensaio para promover a fratura numa gama completa de combinações de modo misto, o que permite obter os valores de  $G_I$  e  $G_{II}$  [2].

### 2.4.3.1 Métodos que requerem a monitorização do comprimento de fenda

Bhashyam e Davidson [119] desenvolveram um estudo que descreve uma comparação detalhada de cinco diferentes modelos de redução de dados para o ensaio MMB. Estes modelos, que serão descritos, são diferenciados pela abordagem analítica para estimar os valores de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ . Alguns dos modelos desenvolvidos usam a mesma abordagem analítica, embora possam ter diferentes pressupostos de simplificação e complexidade.

#### 2.4.3.1.1 Modelo 1 - Método de Reeder e Crews [81, 82, 115]

Este modelo é baseado na teoria das vigas e permite calcular os valores de  $G_I$  e  $G_{II}$ . Reeder e Crews [82] apresentaram o ensaio MMB representado por uma sobreposição simples dos carregamentos em modos I e II (Figura 31). Desta forma, as equações que definem o valor de  $G$  aplicadas nos ensaios DCB e ENF podem ser combinadas de modo a obter as equações que definem o valor de  $G$  para o ensaio MMB.

As componentes do carregamento do provete de ensaio em modo I ( $P_I$ ) (Figura 31 (b)) e modo II ( $P_{II}$ ) (Figura 31 (c)) são apresentadas nas equações (2) e (3), respetivamente:

$$P_I = \frac{3c - L}{4L} \times P, \quad (2)$$

$$P_{II} = \frac{c + L}{L} \times P, \quad (3)$$

onde  $P$  é a carga aplicada,  $c$  a posição do ponto de carregamento e  $L$  o comprimento entre os dois pontos de contacto do braço de solicitação com o provete de ensaio.

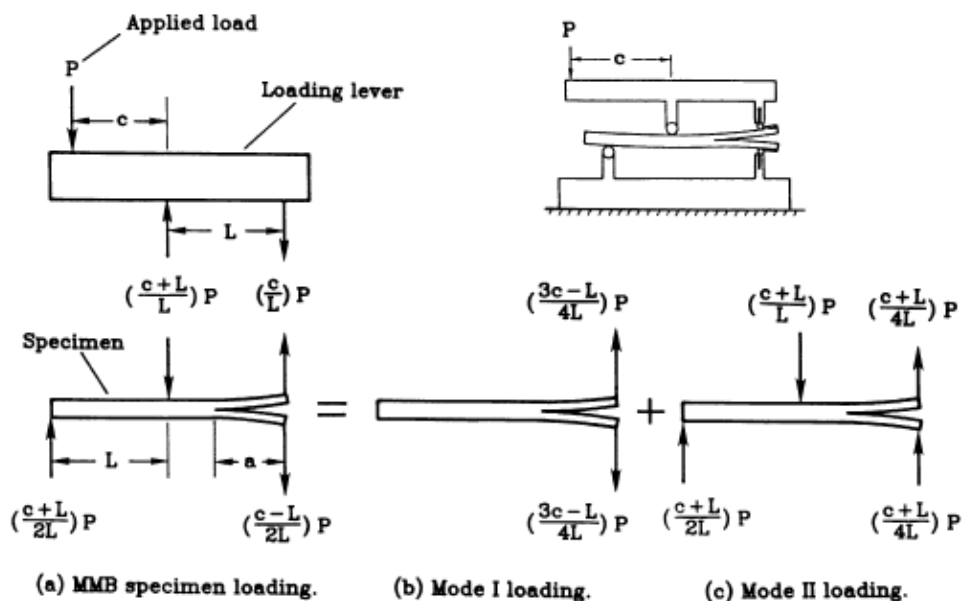


Figura 31 - Representação esquemática da análise de sobreposição de carregamento no provete de ensaio MMB: (a) carregamento do provete de ensaio, (b) carregamento em modo I e (c) carregamento em modo II [81]

Pela da teoria das vigas simples do provete de ensaio é possível obter as equações (4) e (5) para as componentes  $G_I$  e  $G_{II}$ , respetivamente:

$$G_I = \frac{3a^2 P^2}{4B^2 h^3 L^2 E_{11}} \times (3c - L)^2, \quad (4)$$

$$G_{II} = \frac{9a^2 P^2}{16B^2 h^3 L^2 E_{11}} \times (c + L)^2. \quad (5)$$

onde  $B$  é a largura do provete de ensaio,  $h$  a espessura do aderente e  $E_{11}$  é módulo axial da viga.

Ao dividir a equação (4) pela equação (5), obtém-se o rácio de modo misto para o ensaio MMB:

$$G_I / G_{II} = \frac{4}{3} \times \left( \frac{3c - L}{c + L} \right)^2, \quad c \geq L/3. \quad (6)$$

Note-se que neste modelo não é considerado o contacto entre os dois aderentes do provete de ensaio [82]. A soma entre as equações (4) e (5) permite obter o valor de  $G$  para o ensaio MMB:

$$G = \frac{3a^2 P^2}{16B^2 h^3 L^2 E_{11}} \times \left[ 4(3c - L)^2 + 3(c + L)^2 \right]. \quad (7)$$

Através da análise da teoria das vigas modificada do provete de ensaio, considera-se a energia de deformação por corte associada à flexão e a rotação da viga na ponta da fenda. Ao adicionar as componentes de deformação por corte e a correção da rotação, é possível obter as equações (8) e (9) para as componentes  $G_I$  e  $G_{II}$ , respetivamente:

$$G_I = \frac{3P^2 \times (3c - L)^2}{4B^2 h^3 L^2 E_{11}} \times \left( a^2 + \frac{2a}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} + \frac{h^2 E_{11}}{10G_{13}} \right), \quad (8)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2 \times (c + L)^2}{16B^2 h^3 L^2 E_{11}} \times \left( a^2 + \frac{0,2h^2 E_{11}}{G_{13}} \right), \quad (9)$$

onde

$$\lambda = \left( \frac{3k}{Bh^3 E_{11}} \right)^{1/4} \quad \text{e} \quad k = \frac{2BE_{22}}{h}.$$

Assim, o valor de  $G$  para o ensaio MMB é definido pela soma entre as equações (8) e (9), ou seja,  $G = G_I + G_{II}$ .

### 2.4.3.1.2 Modelo 2 - Método Original de Kinloch et al. [78]

Tal como no modelo anterior, este modelo é baseado na teoria das vigas para obter os valores de  $G_I$  e  $G_{II}$ . Kinloch et al. [78] consideraram um valor de  $a$  efetivo para calcular a contribuição para o valor de  $G_{II}$ . Estes autores basearam-se no argumento do caso de carregamento geral, que pode ser dividido nos momentos  $M_I$  e  $M_{II}$ . Desta forma, é possível escrever as componentes  $G_I$  e  $G_{II}$  pelas equações (10) e (11), respetivamente:

$$G_I = \frac{M_I^2}{BE_{11}I} \times \frac{1+\psi}{16(1-\xi)^3}, \quad (10)$$

$$G_{II} = \frac{M_{II}^2}{BE_{11}I} \times \frac{3(1+\psi) \times (1-\xi)}{16\xi^2}, \quad (11)$$

onde  $E_{11}$  é módulo axial da viga,

$$\xi = \frac{h_1}{2h}; \quad \psi = \left( \frac{1-\xi}{\xi} \right)^3,$$

e  $M_I$  e  $M_{II}$  são dados por:

$$M_I = \frac{M_2 - \psi M_1}{1+\psi} \quad \text{e} \quad M_{II} = \frac{M_2 + M_1}{1+\psi}.$$

Ao aplicar a teoria das vigas à configuração do ensaio MMB, representada na Figura 20, é possível obter as equações (12) e (13) para os momentos fletores  $M_1$  e  $M_2$ , respetivamente:

$$M_1 = P \times a \times \frac{c}{b}, \quad (12)$$

$$M_2 = P \times a \times \left( 1 - \frac{c+b}{L} \right). \quad (13)$$

Com os fatores de correção apropriados e a partir das equações (10), (11), (12) e (13), é possível obter as equações (14) e (15) para as componentes  $G_I$  e  $G_{II}$ , respetivamente:

$$G_I = \frac{3P^2 \times (a + \chi_I h)^2}{B^2 E_{11} h^3} \times \left[ \left( 1 - \frac{c+b}{L} \right) - \frac{c}{b} \right]^2, \quad (14)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2 \times (a + \chi_{II} h)^2}{4B^2 E_{11} h^3} \times \left[ \left( 1 - \frac{c+b}{L} \right) + \frac{c}{b} \right]^2, \quad (15)$$

onde  $\chi_I$  e  $\chi_{II}$  são os fatores de correção para a fratura no modo I e no modo II, respetivamente, e

$$\xi = 1/2; \quad \psi = 1.$$

Ao dividir a equação (14) pela equação (15), obtém-se o rácio de modo misto para o ensaio MMB:

$$G_I / G_{II} = \frac{4}{3} \times \left[ \frac{\left(1 - \frac{c+b}{L}\right) - \frac{c}{b}}{\left(1 - \frac{c+b}{L}\right) + \frac{c}{b}} \right]^2 \times \left( \frac{a + \chi_I h}{a + \chi_{II} h} \right)^2. \quad (16)$$

O valor de  $G$  para o ensaio MMB é definido pela soma entre as equações (14) e (15), ou seja,  $G = G_I + G_{II}$ .

#### 2.4.3.1.3 Modelo 3 - Método Modificado de Kinloch et al. [119]

Com o objetivo de melhorar a precisão do Método Original de Kinloch et al. [78], Bhashyam e Davidson [119] propuseram uma modificação a este modelo, ao qual intitularam de Método Modificado de Kinloch. Neste modelo, as equações que definem as componentes  $G_I$  e  $G_{II}$  são reformuladas em termos da rigidez de flexão do provete de ensaio. Desta forma, é possível obter as equações (17) e (18) para as componentes  $G_I$  e  $G_{II}$ , respetivamente:

$$G_I = \frac{P_I^2 \times (a + \chi h)^2}{B^2 D_I}, \quad (17)$$

$$G_{II} = \frac{(R - 2) \times P_{II}^2 \times (a + 0,42 \chi h)^2}{16 B^2 D}, \quad (18)$$

onde  $D$  é a rigidez de flexão da região não fragmentada do provete de ensaio,  $D_I$  a rigidez de flexão da região fragmentada do provete de ensaio e

$$R = D / D_I.$$

Note-se que, se neste modelo, o valor de  $E_{11}$  for determinado experimentalmente, verifica-se que a única diferença entre o Método Original de Kinloch e o Método Modificado de Kinloch é o pressuposto de  $R=8$  no primeiro modelo. O valor de  $G$  para o ensaio MMB é definido pela soma entre as equações (17) e (18), ou seja,  $G = G_I + G_{II}$ .

#### 2.4.3.1.4 Modelo 4 - Método de calibração de flexibilidade

Este modelo segue o princípio fundamental que se traduz na equação (19) [119]. Para um determinado provete de ensaio linear elástico que contém uma fenda e é submetido a um carregamento num único ponto, o valor de  $G$  é dado por:

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da}, \quad (19)$$

onde  $C$  a flexibilidade do provete de ensaio e  $a$  o comprimento de fenda.

Martin e Hansen [120] sugeriram a aplicação deste método no ensaio MMB, pois ao controlar a carga na alavanca de modo a manter a propagação da fenda constante, o crescimento da delaminação será estável.



Como  $G$  é proporcional a  $1/a^4$ , a derivada  $dC/da$  é sempre negativa, o que indica um crescimento de delaminação estável.

#### 2.4.3.1.5 Modelo 5 - Método de Deflexão de Carga

Bhashyam e Davidson [119] propuseram um novo método de redução de dados independente das propriedades do material, denominado como Método de Deflexão de Carga. Este método utiliza os dados de carga e deflexão do ensaio MMB para determinar as componentes  $G_I$  e  $G_{II}$ . Como, no ensaio MMB, as cargas e as deflexões podem ser separadas em componentes, é possível obter a equação (25) para a componente  $G_I$ :

$$G_I = \frac{3P_I \delta_I}{2B \times (a + \chi h)}. \quad (25)$$

Através das equações (18) e (19) é determinada a derivada  $dC_{II}/da$ , que permite obter o valor de  $C_{II}$  pela sua integração. Ao substituir, novamente, este resultado na equação (18), é possível obter a equação (26) para a componente  $G_{II}$ :

$$G_{II} = \frac{3P_{II} \delta_{II} \times (R - 2) \times (a + 0,42 \chi h)^2}{2B \times [4L^3 + (R - 2) \times (a + 0,42 \chi h)^3]}. \quad (26)$$

O valor de  $G$  para o ensaio MMB é definido pela soma entre as equações (25) e (26), ou seja,  $G = G_I + G_{II}$ .

#### 2.4.3.2 Métodos baseados num comprimento de fenda equivalente

Os métodos clássicos de tratamento de resultados, baseados na calibração da flexibilidade ou na teoria das vigas, requerem a medição do valor de  $a$  durante a sua propagação e não consideram a energia dissipada na Zona de Processo de Fratura (ZPF). Desta forma, foi desenvolvido um novo método, baseado no conceito de  $a_e$  e que considera a energia dissipada na ZPF. Este método é denominado como *Compliance-Based Beam Method* (CBBM) [67].

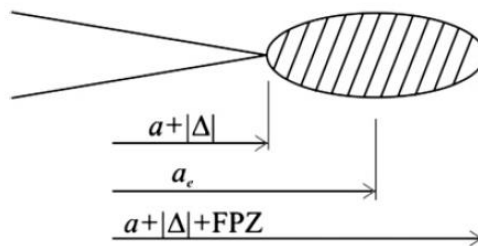


Figura 33 - Representação esquemática de ZPF e conceito de  $a_e$  [43]

##### 2.4.3.2.1 Compliance-Based Beam Method (CBBM)

O CBBM depende apenas da flexibilidade do provete de ensaio durante o respetivo ensaio e é aplicado aos ensaios DCB [43] e ENF [44], dos quais deriva o ensaio MMB

[121]. Vários autores têm vindo a aplicar este método em diferentes estudos que abordam o ensaio MMB [1, 104, 105, 113]. Este método permite obter as curvas de resistência (curvas- $R$ ) e os de valores de  $G_I$  e  $G_{II}$  sem a necessidade da medição do valor de  $a$  durante o ensaio. A energia de deformação do provete de ensaio devido à flexão e incluído os efeitos de corte é dada pela equação (27):

$$U_I = 2 \times \left[ \int_0^a \frac{M_f^2}{2E_1 I} dx + \int_0^a \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\tau^2}{2G_{13}} \times B dz dx \right], \quad (27)$$

onde  $M_f$  é o momento fletor,  $I$  o segundo momento da área de cada aderente,  $E_1$  o módulo de Young,  $G_{13}$  módulo de corte e:

$$\tau = \frac{3}{2} \times \frac{V}{Bh} \times \left( 1 - \frac{z^2}{c^2} \right),$$

onde  $c$  representa metade da espessura do provete e  $V$  a carga transversal de cada aderente. Através do teorema Castigliano e da teoria das vigas, é possível obter as equações (28) e (29) para as componentes  $\delta_I$  e  $\delta_{II}$ , respetivamente:

$$\delta_I = \frac{\partial U}{\partial P_I} = P_I \times C_I, \quad (28)$$

$$\delta_{II} = P_{II} \times C_{II}, \quad (29)$$

onde  $P_I$  e  $P_{II}$  são as componentes do carregamento do provete de ensaio em modo I e modo II, respetivamente, e  $C_I$  e  $C_{II}$  as componentes das flexibilidades em modo I e em modo II, respetivamente.

As equações (28) e (29) constituem uma abordagem baseada na teoria das vigas e permitem obter as equações (30) e (31), que definem os valores de  $C_I$  e  $C_{II}$  através da curva  $P$ - $\delta$ , respetivamente:

$$C_I = \frac{8P_I a^3}{E_1 B h^3} + \frac{12P_I a}{5BhG_{13}}, \quad (30)$$

$$C_{II} = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_1 B h^3} + \frac{3L}{10G_{13} B h}. \quad (31)$$

Porém, a teoria das vigas não considera alguns efeitos que influenciam a curva  $P$ - $\delta$ , como concentrações de tensão na ponta da fenda ou interações entre os aderentes do provete de ensaio. De modo a incluir estes efeitos, o valor de  $E_1$  é substituído por um módulo de flexão corrigido ( $E_f$ ). Ao considerar a flexibilidade inicial medida ( $C_0$ ) e o valor de  $a_0$ , é possível obter as equações (32) e (33) para as componentes  $E_{fI}$  e  $E_{fII}$ , respetivamente:

$$E_{fI} = \left[ C_0 - \left( \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{5BhG_{13}} \right) \right]^{-1} \times \frac{8(a_0 + |\Delta|)^3}{Bh^3}, \quad (32)$$

$$E_{fII} = \left[ C_0 - \left( \frac{3L}{10G_{13}Bh} \right) \right]^{-1} \times \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8Bh^3}. \quad (33)$$

Os efeitos da ZPF podem ser incluídos ao considerar a flexibilidade e o conceito de  $a_e$ , durante a propagação da fenda. Assim, de acordo com a Figura 33, a componente de  $a_e$  para o modo I é dada por:

$$a_{eI} = a + |\Delta| + \Delta a_{ZPF}. \quad (34)$$

Através das equações (31) e (33), a componente de  $a_e$  para o modo II é dada por:

$$a_{eII} = a + \Delta a_{ZPF} = \left[ \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} \times a_0^3 + \left( \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) \times L^3 \right]^{1/3}, \quad (35)$$

onde

$$C_{0corr} = C_0 - \left( \frac{3L}{10G_{13}Bh} \right).$$

Deste modo é possível obter as equações (36) e (37), para as componentes  $G_I$  e  $G_{II}$ , respetivamente:

$$G_I = \frac{6P^2}{B^2h} \times \left( \frac{2a_{eI}^2}{h^2E_f} + \frac{1}{5G_{13}} \right), \quad (36)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2 \times a_{eII}^2}{4B^2h^3E_f}. \quad (37)$$

O valor de  $G$  para o ensaio MMB é definido pela soma entre as equações (36) e (37), ou seja,  $G=G_I+G_{II}$ .

#### 2.4.3.3 Método do integral-J

O método do integral-J tem sido utilizado para a determinação da taxa de libertação de energia de deformação não linear ( $J$ ) através de um integral independente do caminho em torno da ponta da fenda [2]. Existem diversos estudos que utilizam este método para vários provetes de ensaios à fratura, em modo puro I [33, 122-126], modo puro II [127-130] e em modo misto I+II [131-135], dos quais são destacados os estudos que investigaram a aplicação do integral-J no ensaio MMB [136-141]. Este método foi inicialmente proposto por Rice [122] para a caracterização da concentração de tensões à volta de fendas e entalhes. O integral-J é definido pela equação (38):

$$J = \int_{\Gamma} \left( W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \right), \quad (38)$$

onde  $W$  é a densidade da energia de deformação,  $T$  o vetor de tração,  $u$  o vetor de deslocamento,  $ds$  o incremento de comprimento ao longo do contorno e  $\Gamma$  o contorno em torno da ponta da fenda.

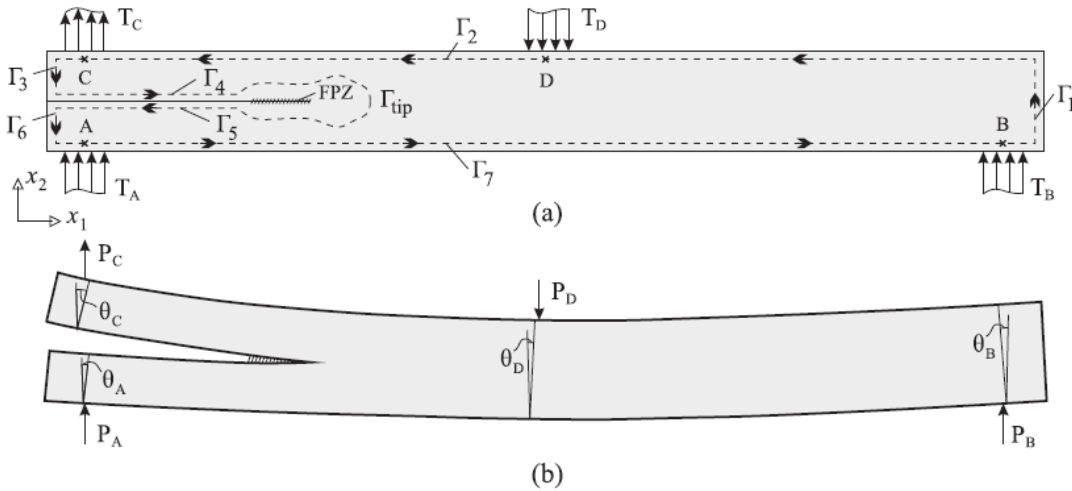


Figura 34 - Desenvolvimento do contorno de integral-J na configuração do provete de ensaio MMB: (a) seleção do caminho de integração na configuração não deformada e (b) ângulos de rotação na configuração deformada [136]

Com base na relação de forma fechada proposta por Rice [122], é possível considerar um caminho de integração do contorno dentro da superfície, de acordo com a Figura 34 (a). Uma vez que o integral- $J$  não depende do caminho em contorno da ponta da fenda, o valor de  $\Gamma$  pode ser definido pela equação (39):

$$\Gamma = \sum \Gamma_i. \quad (39)$$

A integração ao longo de  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_3$  e  $\Gamma_6$  é igual a zero, uma vez que estas se situam numa região livre de tensões. Os valores de  $\Gamma_4$  e  $\Gamma_5$ , que são paralelos à ponta da fenda ( $dy$ ) e o valor de  $T$ , também são nulos. Contudo, devido à existência da tração aplicada,  $\Gamma_2$  e  $\Gamma_7$  apresentam valores diferentes de zero, e são dados pelas equações (40) e (41), respetivamente:

$$J_{\Gamma_2} = \int [T_C(x) + T_D(x)] \frac{\partial u}{\partial x} dx, \quad (40)$$

$$J_{\Gamma_7} = \int [T_A(x) + T_B(x)] \frac{\partial u}{\partial x} dx, \quad (41)$$

onde  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  e  $T_D$  são as trações nos pontos de aplicação de cargas, que podem ser transformadas em  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$  e  $P_D$ , respetivamente, conforme indica a Figura 34 (b). Assim, de acordo com a Figura 34 (b), o integral- $J$  é definido pela equação (42):

$$J = \frac{1}{B} \times (P_A \theta_A + P_B \theta_B + P_C \theta_C - P_D \theta_D), \quad (42)$$

onde  $B$  é a largura do provete de ensaio e  $\theta_A$ ,  $\theta_B$ ,  $\theta_C$  e  $\theta_D$  são os ângulos de rotação nos pontos de aplicação das cargas  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$  e  $P_D$ , respetivamente.

Estas cargas podem ser obtidas em função de  $P$ , através do equilíbrio estático da configuração do ensaio MMB, representada na Figura 31 (a). Deste modo, e pela equação (42), é possível obter a equação (43) para a definição do integral- $J$  para o ensaio MMB:

$$J = \frac{P}{B} \times \left[ \left( \frac{1}{2} - \frac{c}{2L} \right) \times \theta_A + \left( \frac{1}{2} + \frac{c}{2L} \right) \times \theta_B + \left( \frac{c}{L} \right) \times \theta_C - \left( 1 + \frac{c}{L} \right) \times \theta_D \right], \quad (43)$$

onde  $c$  é a posição do ponto de carregamento. Através da equação (43) é possível obter as equações (44) e (45), para as componentes de  $J$  para o modo I,  $J_I$  e o modo II,  $J_{II}$ , respetivamente:

$$J_I = \frac{P}{2B} \times \left( \frac{3c}{L} - \frac{1}{2} \right) \times (\theta_C - \theta_A), \quad (44)$$

$$J_{II} = \frac{P}{B} \times \left( \frac{c}{L} + \frac{1}{2} \right) \times \left[ \theta_B - 2\theta_D + \frac{1}{2} \times (\theta_C - \theta_A) \right]. \quad (45)$$

#### 2.4.4 Estado da arte

Existem várias publicações recentes de trabalhos de MMB experimentais e numéricos [87, 88, 96-98, 109, 110, 112]. A Tabela 7 apresenta uma breve descrição de alguns exemplos dos trabalhos mais relevantes.

Tabela 7 - Descrição de trabalhos de MMB experimentais e numéricos

Autor	Descrição do trabalho
Plagianakos et al. [87]	Neste trabalho, os autores analisaram experimentalmente os valores de $G_c$ interlaminar de um material compósito de grafite e um epóxi unidirecional através do ensaio MMB e, deste modo, avaliar o efeito do envelhecimento por armazenamento em condições quentes e húmidas dos materiais testados. Os resultados obtidos foram comparados com previsões analíticas e previsões numéricas segundo o MEF, pelo que se verificou um desvio considerável nos ensaios. Concluiu-se que o ensaio MMB é o mais sensível às imperfeições geométricas e/ou aos materiais usados
Gong et al. [97]	Neste trabalho, os autores investigaram experimentalmente o comportamento da curva-R completa de laminados compósitos de carbono/epóxi unidirecionais e multidirecionais através do ensaio MMB. Os resultados do ensaio mostraram que a camada superficial da interface e o rácio de modo misto influenciam significativamente o valor de $G_c$ inicial e em estado estacionário. Concluiu-se que, com base nos resultados obtidos nos ensaios, os valores de $G_{IIc}$ previstos pelo critério de Benzeggagh-Kenane são muito próximos aos valores de $G_{IIc}$ experimentais. Desta forma verificou-se a possibilidade de determinar o valor de $G_{IIc}$ sem efetuar ensaios de delaminação em modo II. Neste trabalho, também foi proposta uma expressão semi-empírica que pode prever com precisão o comportamento de delaminação em modo misto I+II.

Autor	Descrição do trabalho
Gong et al. [98]	<p>Neste trabalho, os autores avaliaram os efeitos do complexo mecanismo de falha no módulo de flexão dos laminados unidirecionais através do ensaio MMB, onde o principal objetivo foi descobrir se a norma ASTM D6671, estabelecida para laminados unidirecionais, poderia ser aplicada para laminados multidirecionais. Os autores destacaram um potencial erro em usar o método original de redução de dados em laminados multidirecionais. De modo a evitar esse erro, foi proposto um procedimento de ensaio aprimorado e um método de redução de dados avançado para a obtenção do módulo de flexão em diferentes comprimentos de delaminação. Concluiu-se que o módulo de flexão aumenta com o comprimento de delaminação, pelo que existe uma relação quase linear entre si. O método de redução de dados aprimorado proposto é adequado para laminados multidirecionais sob o carregamento de modo misto I+II, de modo a fornecer uma caracterização precisa para <math>G_c</math>.</p>
Arouche et al. [110]	<p>Neste trabalho, os autores investigaram a influência de uma camada de manta de fibra de vidro (GFM) inserida numa interface de uma junta adesiva bimaterial como um mecanismo de endurecimento para melhorar o desempenho da estrutura. O comportamento da fratura foi avaliado sob cargas quase estáticas através do ensaio MMB. Os resultados obtidos revelaram um aumento do valor de <math>G_c</math> com a inserção de uma camada adjacente de GFM e verificou-se uma relação entre <math>G_c</math> e a rugosidade da superfície de fratura. Concluiu-se que o efeito do endurecimento é mais evidente em condições de fratura de modo II, ainda que a fratura tenha tendência a se propagar na interface entre a camada adesiva e o aderente.</p>
Stamoulis e Carrere [112]	<p>Neste trabalho, os autores investigaram as propriedades de fratura de um adesivo estrutural através do ensaio MMB, onde foi analisada a influência do rácio de modo misto na resistência à fratura da junta. A análise dos resultados obtidos foi baseada nos conceitos da MFLE de modo a obter o valor de <math>G</math>. O ensaio MMB foi realizado em diferentes velocidades e rácios de modo misto, pelo que se verificou que o valor de <math>G</math> é influenciado pelos mesmos. Concluiu-se, ainda, que a velocidade do ensaio apresentou um impacto considerável no comportamento da fratura quando próximo do modo II. Neste trabalho, também foi estabelecido um critério de fratura que permitiu a obtenção de envelopes de fratura adequados para cada rácio de modo misto, pelo que o cálculo dos valores de <math>G_{IIc}</math> foi efetuado por interpolação.</p>



# DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Disposições iniciais do trabalho a desenvolver
- 3.2 Anteprojeto do equipamento
- 3.3 Projeto do equipamento
- 3.4 Fabrico do equipamento
- 3.5 Validação do funcionamento



## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Disposições iniciais do trabalho a desenvolver

O projeto desenvolvido neste trabalho surge em resposta à necessidade de aumentar a confiança no projeto de estruturas adesivas, uma vez que é importante conseguir prever com precisão a sua resistência mecânica. Para tal, é considerada uma análise energética, onde o valor de  $G_c$  é o principal parâmetro para a previsão da evolução do dano e rotura e para caracterização à fratura de juntas adesivas, sob carregamentos em modos puro I, puro II e misto I+II. Devido às condições de carregamento em modo misto é necessário estabelecer um critério de fratura que promova a propagação do dano nessas condições.

O equipamento de ensaio MMB desenvolvido representa uma evolução da configuração de equipamento proposta por Chaves [1]. Este permite a obtenção do envelope de fratura completo sem a necessidade de medição do valor de  $a$ . Uma análise crítica e detalhada sobre os equipamentos já desenvolvidos é apresentada e considerada para o projeto do equipamento, de forma a colmatar os pontos fracos de cada equipamento e criar uma versão melhorada.

Este equipamento foi concebido com auxílio do MEF, para otimizar a resistência da montagem para uma carga máxima de 20 kN. Todos os componentes projetados foram fabricados em aço de alto limite elástico de modo a garantir uma maior resistência. Os restantes componentes do equipamento são componentes normalizados. O provete de ensaio é um provete com geometria DCB, que obedece às condições impostas pela norma ASTM D3433-99 [68]. O fabrico e respetiva montagem do equipamento, bem como os ensaios efetuados, foram realizados com o apoio de ferramentas e máquinas disponíveis nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do ISEP.

#### 3.1.1 Objetivos do trabalho

O principal objetivo deste trabalho é projetar, modelar numericamente e validar experimentalmente um equipamento de ensaio MMB para a realização de ensaios de adesivos estruturais, tendo em conta o estudo e análise crítica dos equipamentos existentes. Experimentalmente, pretende-se fabricar o equipamento projetado e realizar os respetivos ensaios e tratamento de dados para validação do funcionamento do equipamento. O trabalho numérico consiste na criação das geometrias dos diferentes componentes do equipamento em *software* e realização das respetivas simulações. Nomeadamente, pretende-se efetuar a comparação entre o equipamento de base de estudo, desenvolvido por Chaves [1], e as soluções apresentadas durante a evolução do

projeto. Outro objetivo deste trabalho é promover a obtenção de várias combinações de modo misto, com recurso apenas ao próprio equipamento e ao mesmo tipo de provete de ensaio, para posterior validação através do método de redução na estimativa da tenacidade à fratura em estudo.

### 3.1.2 Requisitos do equipamento

Após a definição dos objetivos para este trabalho, é importante indicar quais os requisitos do equipamento que o desenvolvimento deste trabalho impõe:

- compatibilidade com a MTS e fácil fixação à mesma;
- configuração simples e compacta;
- versátil, prático e intuitivo;
- fácil montagem e configuração do equipamento;
- bom acabamento superficial e promover o aumento da vida útil do equipamento;
- utilização de pinos calibrados para eliminar o atrito;
- utilização de pinos que promovam a rápida montagem e desmontagem;
- peças fabricadas em aço de alto limite elástico para garantir elevada resistência;
- componentes de ligação, fixação ou orientação com elevada resistência;
- dimensionamento do equipamento por MEF para otimização da rigidez;
- permitir uma carga máxima de 20 kN;
- adequado para provetes de ensaio de elevada rigidez;
- carregamentos em modo puro I, puro II e misto I+II;
- variação do rácio de modo misto sem limitações numa ampla gama do envelope de fratura;
- determinação do valor de  $G_c$  em diversas combinações de modo misto;
- medição dos valores de  $\delta$  de cada aderente do provete de ensaio, sem a necessidade de medição do valor de  $a$ ;
- medição do valor de  $P$  aplicado;
- medição dos valores de  $\delta$  através do sistema LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*);
- o equipamento não deverá marcar o provete de ensaio durante os ensaios.

### 3.2 Anteprojecto do equipamento

Neste trabalho, o anteprojecto do equipamento consistiu na realização de um estudo e análise crítica dos equipamentos existentes de acordo com os objetivos pretendidos e os requisitos do equipamento. Com base nas reflexões finais deste estudo e análise crítica, efetuou-se um *brainstorming* de ideias e definiram-se as bases a considerar para a tomada de decisão do equipamento a projetar, representado por um esboço inicial.

### 3.2.1 Estudo e análise crítica dos equipamentos existentes

A abordagem definida para o estudo dos equipamentos existentes, descritos no Capítulo 2.4, pode ser dividida em dois passos sequenciais de análise crítica. Inicialmente, realizou-se uma primeira análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*) que permite realizar uma breve comparação entre todos os equipamentos de ensaio MMB existentes e, posteriormente, uma análise detalhada do equipamento desenvolvido por Chaves [1], sendo este a base de estudo neste trabalho.

#### 3.2.1.1 Análise SWOT

Para esta análise SWOT foram considerados como principal foco os pontos fortes e fracos de cada equipamento existente, quer a nível da configuração do equipamento quer a nível do seu funcionamento, tendo em conta os requisitos necessários indicados no Subcapítulo 3.1.2 (Tabela 8).

Tabela 8 - Análise SWOT dos equipamentos de ensaio MMB desenvolvidos

Equipamento	✓ Pontos fortes	✗ Pontos fracos
1º equipamento de Reeder e Crews [81, 82]	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ A alavanca de carregamento é uma viga de alumínio com peso desprezável;</li> <li>✓ Os rolos montados em rolamentos minimizam as forças de atrito.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ O equipamento apresenta uma configuração relativamente complexa;</li> <li>✗ O equipamento apresenta não linearidade geométrica;</li> <li>✗ A alavanca de carregamento é sujeita a um movimento de rotação durante a propagação da fenda;</li> <li>✗ Os momentos fletores variam conforme o valor de <math>a</math>;</li> <li>✗ O equipamento apresenta grandes problemas quando utilizado para a obtenção dos valores de fratura interlaminar.</li> </ul>
2º equipamento de Reeder e Crews [115]	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ A não linearidade geométrica foi eliminada;</li> <li>✓ A sela, que se estende na vertical em ambos os lados da alavanca de carregamento e do provete de ensaio, permite a variação das distâncias <math>b</math> e <math>c</math> (Figura 22);</li> <li>✓ O equipamento apresenta resultados que estão de acordo com os valores obtidos através de outros métodos de ensaio bem fundados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ O equipamento apresenta uma configuração relativamente complexa;</li> <li>✗ A alavanca apresenta um peso elevado, visto que foi adicionada a sela;</li> <li>✗ O equipamento não permite a redução de erros na determinação da tenacidade à fratura.</li> </ul>

Equipamento	✓ Pontos fortes	✗ Pontos fracos
Fernlund e Spelt [117]	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ As vigas horizontais furadas, fabricadas em aço de secção quadrada, minimizam as deformações e a não linearidade geométrica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ O equipamento apresenta uma configuração relativamente complexa;</li> <li>✗ O equipamento apresenta grandes dimensões gerais devido ao posicionamento do provete de ensaio na parte exterior da estrutura.</li> </ul>
Chen et al. [118]	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Os rolos, fixados à sela e colocados num suporte ligado à MTS, promovem a redução dos efeitos do peso da alavanca;</li> <li>✓ O equipamento pode evitar a influência da pré-carga causada pelo peso da alavanca no provete de ensaio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ O equipamento apresenta uma configuração relativamente complexa.</li> </ul>
Liu et al. [107]	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ As vigas de apoio espessas minimizam a plastificação nos aderentes antes do início da propagação da fenda;</li> <li>✓ As estruturas de pino com gancho de segurança garantem que a localização exata do centro de carregamento é muito próxima ao plano médio do provete de ensaio;</li> <li>✓ Os rolamentos de rolos e buchas adaptadoras permitem aplicar uma maior margem de rácios de modo misto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ O equipamento apresenta uma configuração relativamente complexa.</li> </ul>
de Moura et al. [104, 105]	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ O equipamento permite a realização de ensaios com provetes de ensaio de grandes dimensões.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ O equipamento apresenta uma configuração complexa;</li> <li>✗ As dimensões gerais do equipamento são elevadas e limitam a utilização de provetes com dimensões diferentes para as quais o equipamento foi projetado;</li> <li>✗ A alavanca foi fabricada em alumínio, pelo que a sua resistência é baixa.</li> </ul>
Chaves [1]	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ O posicionamento do provete de ensaio na parte interior da estrutura diminui as dimensões gerais do equipamento e facilita as operações de ensaio exigidas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ A configuração do equipamento pode limitar o uso de diferentes dimensões dos provetes de ensaio;</li> <li>✗ Algumas dificuldades no manuseamento dos pinos;</li> <li>✗ O equipamento marca os provetes de ensaio.</li> </ul>

Equipamento	✓ Pontos fortes	✗ Pontos fracos
Pereira et al. [113]	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ O equipamento permite a realização de ensaios com provetes de ensaio de dimensões muito pequenas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ O equipamento apresenta uma configuração relativamente complexa;</li> <li>✗ As dimensões gerais do equipamento são significativamente pequenas e limitam a utilização de provetes com dimensões diferentes para as quais o equipamento foi projetado.</li> </ul>
Droubi et al. [106]	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ A placa de compressão, fixada à base da MTS, garante uma fixação rígida do equipamento e evita o movimento livre do provete;</li> <li>✓ O equipamento permite efetuar variações no comprimento do braço da alavanca e o correto alinhamento dos pontos de carregamento com as células de carregamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ O equipamento apresenta uma configuração relativamente complexa.</li> </ul>

Através da análise SWOT apresentada na Tabela 8 é possível verificar que a maioria dos equipamentos existentes apresenta uma configuração relativamente complexa, ainda que estes possuam pontos fortes bastante bons, que podem dar origem a um equipamento ideal caso sejam combinados corretamente.

Deste modo, pode dizer-se que o 1º equipamento de Reeder e Crews [81, 82] é o equipamento que apresenta mais limitações e problemas no seu funcionamento, enquanto o equipamento desenvolvido por Chaves [1] é o mais versátil, prático e intuitivo e apresenta uma configuração simples e compacta, ainda que esta possa limitar o uso de diferentes dimensões dos provetes de ensaio.

### 3.2.1.2 Análise detalhada do equipamento desenvolvido por Chaves [1]

Para uma análise detalhada do equipamento desenvolvido por Chaves [1], considerou-se a configuração de equipamento proposta pelo autor (Figura 28) e foi efetuada uma simulação por MEF do equipamento tendo em conta os parâmetros definidos para a análise de tensões: tensão máxima de von Mises, deslocamento máximo, coeficiente de segurança mínimo e massa do equipamento, sem considerar os componentes de fixação e ligação, como parafusos, porcas e pinos.

### 3.2.1.2.1 Parametrização da simulação

A parametrização definida para esta simulação, representada na Figura 35 (a), em termos de força aplicada e condições fronteira, é idêntica àquela definida para a simulação da solução inicial, descrita no Subcapítulo 3.3.5.1.1. A representação da malha gerada pelo SolidWorks® na configuração de equipamento proposta por Chaves [1] encontra-se apresentada na Figura 35 (b).

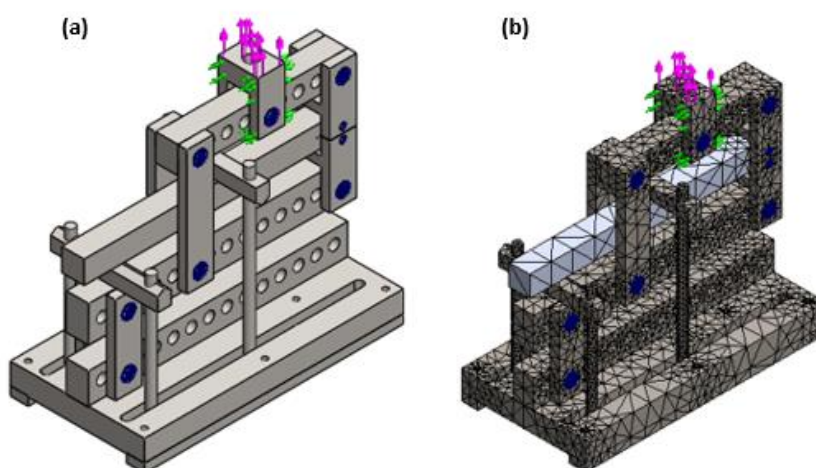


Figura 35 - Parametrização da simulação - equipamento desenvolvido por Chaves [1]: (a) força aplicada e condições fronteira e (b) malha gerada

Após a definição da força aplicada e das condições fronteira a ela associadas, foram definidos os parâmetros de malha a usar nesta análise (Tabela 9), com o apoio das Tabela 14 e Tabela 15.

Tabela 9 - Parâmetros da malha utilizada na simulação do equipamento desenvolvido por Chaves [1]

Parâmetro	Descrição	Unidades
Tamanho mínimo de elementos	6,0890	mm
Tamanho máximo de elementos	30,445	mm
Número de elementos	39951	-
Número de nós	70092	-

### 3.2.1.2.2 Resultados da simulação

Os resultados obtidos na simulação efetuada para análise detalhada do equipamento desenvolvido por Chaves [118], em termos de tensões equivalentes de von Mises, deslocamentos resultantes e coeficiente de segurança, encontram-se representados na Figura 36, Figura 37 e Figura 38, respetivamente.

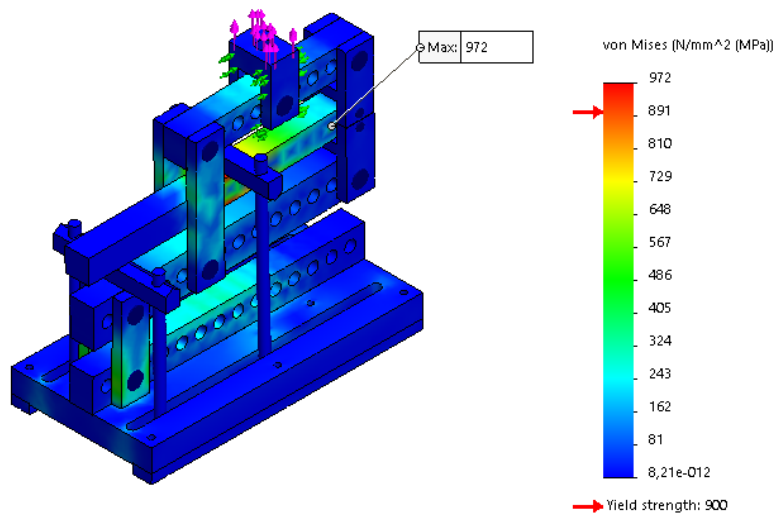


Figura 36 - Tensões equivalentes de von Mises do equipamento desenvolvido por Chaves [1]

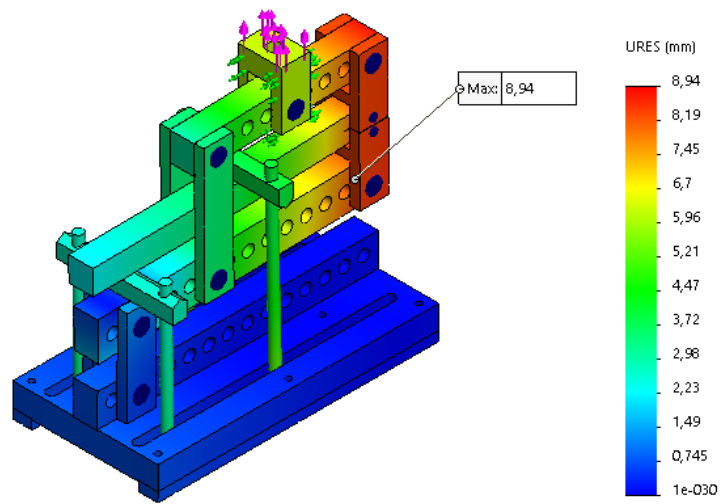


Figura 37 - Deslocamentos resultantes do equipamento desenvolvido por Chaves [1]

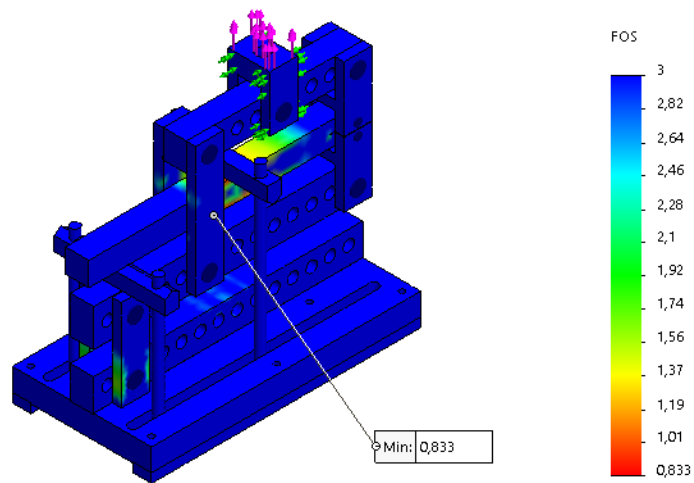


Figura 38 - Coeficiente de segurança do equipamento desenvolvido por Chaves [1]

Os resultados obtidos nesta simulação indicam uma tensão máxima de von Mises de 972 MPa (Figura 36). No que se refere aos deslocamentos resultantes do equipamento desenvolvido por Chaves [118], o valor máximo obtido é 8,94 mm (Figura 37) e um coeficiente de segurança mínimo igual a 0,833 (Figura 38). A massa do equipamento é cerca de 16 kg e as dimensões gerais são: altura de aproximadamente 290 mm, largura de 290 mm e comprimento de 150 mm.

A partir dos resultados desta análise averigua-se que a tensão máxima de von Mises é ligeiramente superior à tensão de cedência do material. Contudo, não é aconselhável submeter o material ao seu limite de tensão de cedência. Esta premissa é ainda reforçada pelo baixo valor de coeficiente de segurança mínimo, que tem valor menor que um, o que significa que o equipamento não está em segurança para a carga definida. Deste modo, pode-se afirmar que existe a possibilidade de obter resultados mais satisfatórios através de pequenas alterações na configuração deste equipamento.

### 3.2.2 *Brainstorming* de ideias

De modo a cumprir os requisitos do equipamento, definidos no Subcapítulo 3.1.1, foram estudadas diferentes ideias. Nos pontos seguintes, é apresentada uma análise detalhada às diferentes ideias propostas para diferentes aspetos do equipamento.

#### 3.2.2.1 *Ideias de melhoria propostas por Chaves [1]*

A Figura 39 engloba um conjunto de ideias de melhoria propostas por Chaves [1] aquando o término do estudo sobre o equipamento desenvolvido pelo autor.

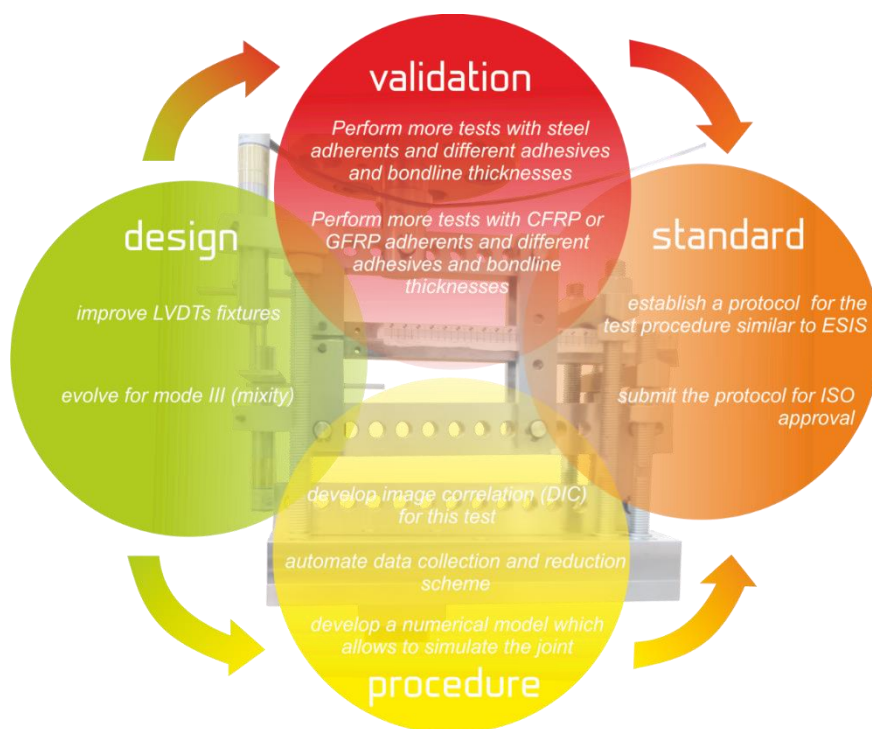


Figura 39 - Ideias de melhoria propostas por Chaves [1]

A Tabela 10 traduz-se numa análise acerca da viabilidade das ideias de melhoria propostas por Chaves [1] (Figura 39) tendo em conta o tema e os objetivos desta dissertação, definidos no Capítulo 1.2 e Subcapítulo 3.1.1.

Tabela 10 - Análise da viabilidade das ideias de melhoria propostas por Chaves [1]

Categoria	Ideia	Viabilidade
<i>Design</i>	Melhoria dos suportes LVDT	✓ Esta ideia está incluída no objetivo referente à melhoria da configuração do equipamento em estudo.
	Evolução para o modo III	✗ Esta ideia não é viável para este trabalho, uma vez que este se foca no estudo do modo misto I+II.
<i>Procedimento</i>	Desenvolver um método de correlação de imagem	✗ Estas ideias não são viáveis para este trabalho visto que se encontram além dos objetivos impostos para o mesmo.
	Automatizar o sistema de recolha de dados	
	Desenvolver um modelo numérico que permita simular a junta	
<i>Validação</i>	Realização de ensaios com aderentes em aço, diferentes adesivos e espessuras	✓ Esta ideia é parcialmente viável para este trabalho, uma vez que os provetes de ensaio a utilizar neste trabalho serão constituídos por aderentes em aço de alta qualidade.
	Realização de ensaios com aderentes em CFRP e GFRP	✓ Esta ideia não é viável para este trabalho, uma vez que os provetes de ensaio a utilizar neste trabalho serão constituídos por aderentes em aço de alta qualidade.
<i>Standard</i>	Estabelecer e submeter para aprovação ISO, um protocolo para o procedimento de ensaio	✓ Esta ideia é viável caso sejam cumpridos todos os objetivos propostos para este trabalho, e a validação final do equipamento tenha sucesso.


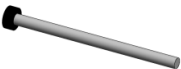

### 3.2.2.2 Ideias para os pinos

A análise acerca dos pinos a selecionar obedece aos requisitos seguintes:

- versátil, prático e intuitivo;
- fácil montagem e configuração do equipamento;
- utilização de pinos calibrados para eliminar o atrito;
- utilização de pinos que promovam a rápida montagem e desmontagem;
- componentes de ligação, fixação ou orientação com elevada resistência;
- permitir uma carga máxima de 20 kN.

A Tabela 11 apresenta as diferentes soluções encontradas para posterior seleção dos pinos a aplicar no equipamento, respetivas descrições e características.

Tabela 11 - Ideias para os pinos

Ideia	Ilustração	Descrição	Características
A		Pino calibrado de bloqueio com esferas de autobloqueio, com punho combinado e ergonómico, para fixação rápida e fácil desbloqueio para ligações frequentemente repetidas. As esferas são desbloqueadas quando o botão contido no punho é pressionado.	Fabricante: HALDER Material: 1.4305 (X10CrNiS18-9) Resistente à corrosão. Resistência ao corte: 87 kN Disponível nas dimensões pretendidas: Ø6x45 e Ø12x45 mm
B		Extrator de cabeça cilíndrica nitrurado e calibrado.	Fabricante: COFERAC Material: 1.2344 (X40CrMoV5-1) Resistente à corrosão. Dureza: Superfície > 950 HV 0.3 Disponível nas dimensões pretendidas: Ø6x100 mm
C		Pino calibrado de bloqueio com esferas de autobloqueio e compacto, para fixação rápida e fácil desbloqueio. As esferas são desbloqueadas quando o botão contido no punho é pressionado.	Fabricante: HALDER Material: 1.4542 (X5CrNiCuNb16-4) Resistente à corrosão. Resistência ao corte: 35 kN. Disponível nas dimensões pretendidas: Ø6x45 e Ø12x45 mm

### 3.2.3 Decisão do equipamento a projetar e esboço inicial

O equipamento a projetar apresentará uma configuração idêntica à configuração do equipamento desenvolvido por Chaves [1]. Deste modo, o projeto do equipamento terá como base a geometria dos componentes existentes. As alterações que afetam diretamente uma possível melhoria do equipamento e respetiva explicação/função estão apresentadas na Tabela 12. O esboço inicial do equipamento (Figura 40) foi concebido com o apoio da ferramenta SolidWorks®. Este esboço apenas contempla os componentes que oferecem a geometria ao conceito estudado para o equipamento.

Tabela 12 - Decisão do equipamento a projetar

Alteração	Explicação/Função
Aumento do comprimento da viga horizontal superior com catorze furos.	Promover o uso de diferentes dimensões dos provetes de ensaio.
Aplicação de pinos calibrados de bloqueio com esferas de autobloqueio.	Eliminar as dificuldades no manuseamento dos pinos.
Criação de superfícies com raio de curvatura superior nas duas vigas de suporte/bloqueio do provete de ensaio.	Minimizar as marcas que o equipamento provoca nos provetes de ensaio.

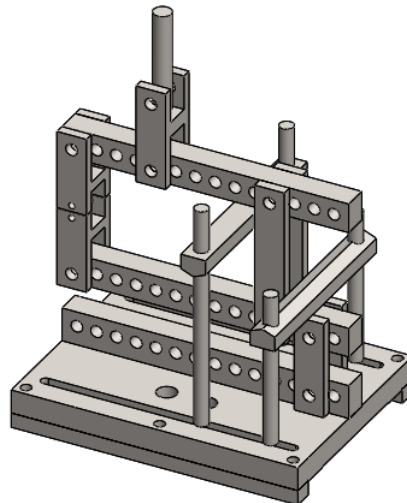


Figura 40 - Representação esquemática do esboço inicial do equipamento

### 3.3 Projeto do equipamento

O projeto do equipamento evoluiu de acordo com os pressupostos definidos no Subcapítulo 3.2.3. A solução final resulta de uma otimização por MEF partindo da solução inicial. A descrição dos mecanismos constituintes e do funcionamento do equipamento MMB desenvolvido são apresentados de forma detalhada nos pontos seguintes, bem como outros aspectos considerados relevantes.

#### 3.3.1 Representação final do equipamento

A representação final do projeto do equipamento MMB desenvolvido é exibida na Figura 41. O peso total do equipamento é cerca de 28 kg e as dimensões gerais são: altura de aproximadamente 415 mm, largura de 220 mm e comprimento de 290 mm.

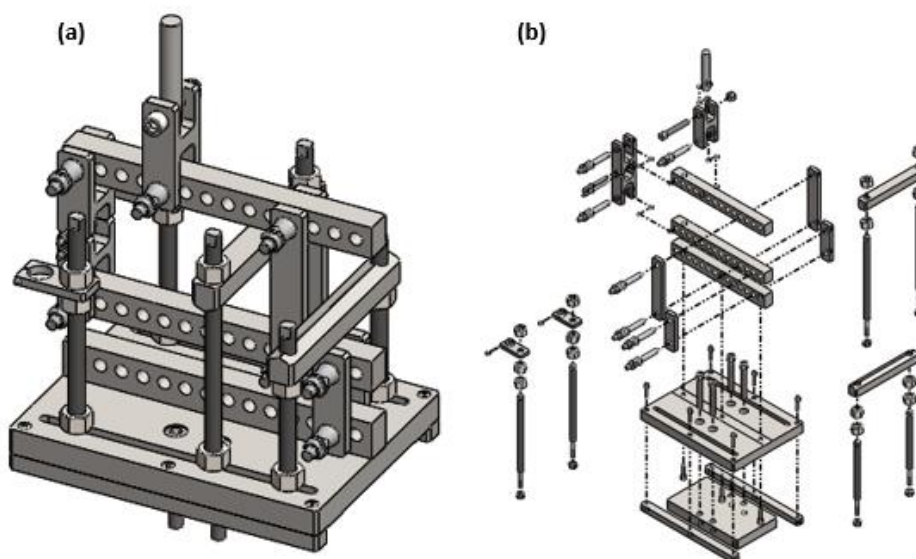
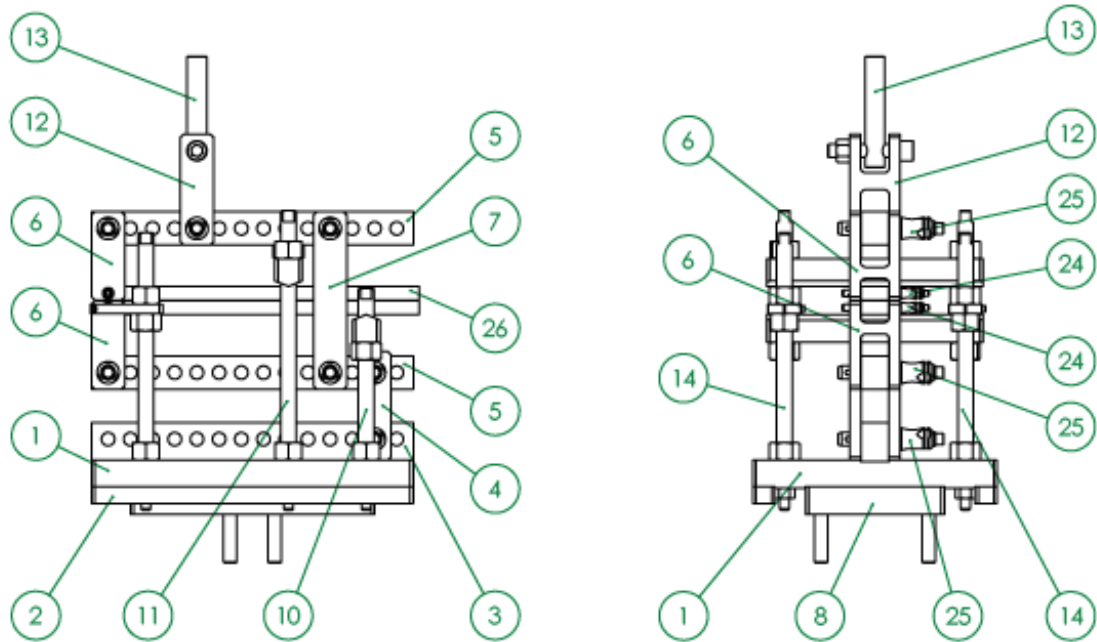


Figura 41 - Representação final do equipamento MMB desenvolvido: (a) vista colapsada e (b) vista explodida

### 3.3.2 Descrição dos mecanismos constituintes

Através da Figura 42 é possível descrever, de forma detalhada, os mecanismos constituintes do equipamento MMB desenvolvido (Figura 41).



Nº POS.	REFERÊNCIA	QNTD
1	EEMMB-001	1
2	EEMMB-002	2
3	EEMMB-003	1
4	EEMMB-004	2
5	EEMMB-005	2
6	EEMMB-006	2
7	EEMMB-007	2
8	EEMMB-008	1
9	EEMMB-009	2
10	EEMMB-010	2
11	EEMMB-011	2
12	EEMMB-012	1
13	EEMMB-013	1
14	EEMMB-014	2
15	EEMMB-015	2
16	ISO - 4034 - M10 - N	6
17	ISO - 4034 - M12 - N	1
18	ISO - 4034 - M16 - N	14
19	ISO 4762 M3 x 30 - 30C	2
20	ISO 4762 M6 x 30 - 30C	6
21	ISO 4762 M8 x 30 - 30C	3
22	ISO 4762 M12 x 70 - 70C	1
23	ISO 4762 M12 x 80 - 80C	4
24	EH 22380.0029	2
25	EH 22380.0069	7
26	PROVETE-DCB	1

Figura 42 - Representação esquemática dos mecanismos constituintes do equipamento MMB desenvolvido e respectiva lista de componentes

Este equipamento inclui:

- uma base (1) fixada a um conector (8) para a parte inferior da MTS;
- uma viga horizontal (3) com catorze furos fixada à base (1) e ligada por um pino calibrado (25) aos elementos de ligação verticais (4), que se encontram ligados por um pino calibrado (25) à viga horizontal inferior (5) com catorze furos;
- uma viga horizontal inferior (5) com catorze furos, ligada por um pino calibrado (25) aos elementos de ligação verticais (7), que se encontram ligados por um pino calibrado (25) à viga horizontal superior (5) com catorze furos;
- uma viga horizontal superior (5) com catorze furos, ligada por um pino calibrado (25) ao conector composto por um veio (13) e uma peça em forma de “H” (12) para a parte superior da MTS;
- uma peça em forma de “H” inferior (6) ligada por um pino calibrado (25) à viga horizontal inferior (5) com catorze furos;
- uma peça em forma de “H” superior (6), ligada por um pino calibrado (25) à viga horizontal superior (5) com catorze furos;
- um provete de ensaio (26), ligado por dois pinos calibrados (24), um à peça em forma de “H” inferior (6) e outro à peça em forma de “H” superior (6);
- dois suportes (15) para os dois LVDT, conectados aos veios roscados (14), que se encontram fixados à base (1) por porcas;
- duas vigas (9) de suporte e bloqueio do provete de ensaio (26) conectadas aos veios roscados (10 e 11), que se encontram fixados à base (1) por porcas;
- duas guias (2) fixadas à base (1) de modo a permitir o bloqueio das porcas de fixação dos seis veios roscados (10, 11 e 14).

### 3.3.3 Ligação à máquina de ensaio de tração

Neste trabalho, foi utilizada uma MTS da Shimadzu® (Figura 43), disponibilizada pelo DEM. Esta máquina é registada com o número de série 346-55240-11, modelo AGX™-100, e apresenta uma capacidade máxima na célula de carga de 100 kN.

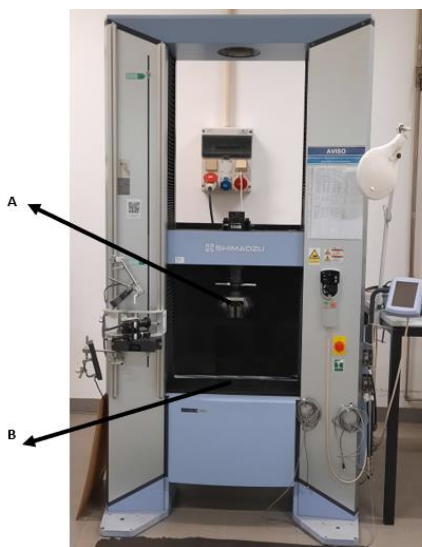
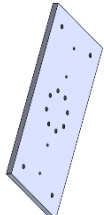
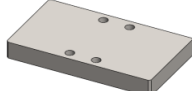




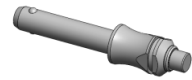


Figura 43 - Fotografia da máquina de ensaio de tração AGX™-100

A Tabela 13 apresenta os componentes disponíveis para ligação à MTS e respetivas soluções projetadas no equipamento.

Tabela 13 - Ligação à máquina de ensaio de tração (Figura 42 e Figura 43)

Máquina de ensaio de tração			Equipamento MMB desenvolvido		
Componente	Ilustração	Descrição	Solução de ligação	Ilustração	Quantidade
Base (A)		Parte inferior da MTS com furação roscada M12 na zona central da base.	EEMMB-008 (8)		1
			Parafuso M12x80 mm		4
Garra (B)		Parte superior da MTS	EEMMB-012 (12)		1
			EEMMB-013 (13)		1
			Pino Ø12x45 mm		1

### 3.3.4 Descrição do funcionamento

Através da análise da Figura 42 e Figura 44 e da informação contida no Subcapítulo 3.3.2, é possível descrever o funcionamento do equipamento MMB desenvolvido (Figura 41).

O equipamento (Figura 41) é fixado à MTS (Figura 43) por um conector (8) na parte inferior e um conector (12 e 13) na parte superior. O conector (8), fixado à base (1), permite o registo do valor de  $\delta$  imposto ao equipamento que é medido pela garra superior (tal como a força através da célula de carga). O conector (12 e 13) transfere o valor de  $F$  do equipamento para a célula de carga da MTS que regista o valor de  $P$ . A viga horizontal (3) é fixada à base (1) de modo a garantir que a rotação das duas vigas horizontais inferior e superior (5) ocorre apenas pelos pinos calibrados (25). As duas vigas horizontais (5) estão ligadas ao provete de ensaio (26) por duas peças em forma de "H" (6) que transferem a carga através dos dois pinos calibrados (24). Estes mantêm um estreito contacto com o sistema LVDT, garantido pelos dois suportes (15) e dois veios roscados (14), o que permite a medição do valor de  $\delta$  para o provete de ensaio (26). De notar que um LVDT regista o valor de  $\delta$  referente ao aderente inferior do provete de ensaio (26) e o outro ao aderente superior do mesmo. Todos os veios roscados (10, 11 e 14) são fixados à base (1) com o auxílio das duas guias (2), que bloqueiam as respetivas porcas de fixação. Os dois veios roscados (11) estão conectados a uma viga (9) que está em contacto com a superfície superior do provete de ensaio (26) e, desta forma, suporta o provete de ensaio (26). Os dois veios roscados (10) estão conectados à outra viga (9) que está em contacto com a superfície inferior do provete de ensaio (26) e, desta forma promove o bloqueio do provete de ensaio (26). A variação do posicionamento dos

quatro veios roscados (10 e 11) ao longo dos rasgos efetuados na base (1) altera as distâncias relativas  $L_1$  e  $(2L-L_1)$ . A variação do posicionamento dos pinos calibrados (25) nos catorze furos das três vigas horizontais (3 e 5), altera a posição relativa dos quatro elementos de ligação verticais (4 e 7) e, por conseguinte, altera as distâncias  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$  e  $s_4$ . Desta forma, é possível variar o rácio de modo misto aplicado aos provetes.

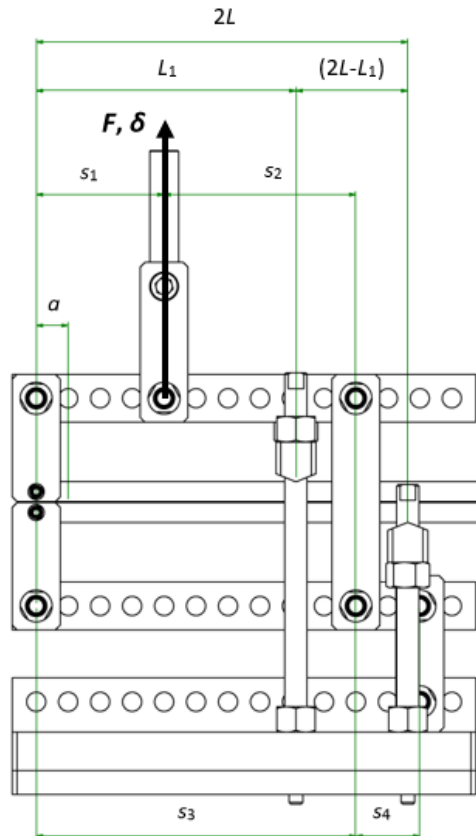


Figura 44 - Representação esquemática das variáveis geométricas do equipamento MMB desenvolvido

### 3.3.4.1 Análise de sobreposição de cargas

Na Figura 45 encontram-se representadas as componentes  $F_1$  e  $F_2$  do carregamento nos aderentes do provete de ensaio (26) e as distâncias  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$  e  $s_4$ , (Figura 44) definidas pela posição relativa entre o conetor (12 e 13), as duas peças em forma de “H” (6) e os quatro elementos de ligação verticais (4 e 7). Quando o equipamento (Figura 41) é carregado pela MTS (Figura 43), os aderentes superior e inferior do provete de ensaio (26) são carregados por  $F_1$  e  $F_2$ , respetivamente (Figura 45).

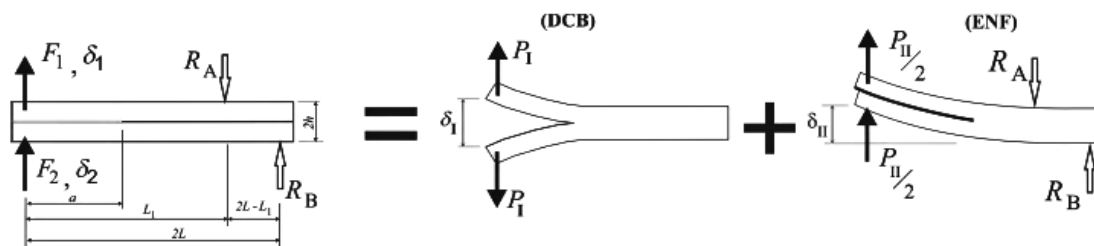


Figura 45 - Representação esquemática da análise de sobreposição de cargas no provete de ensaio MMB [1]

### 3.3.4.2 Modelo de redução de dados

As componentes  $F_1$  e  $F_2$  (Figura 45), com as condições geométricas  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$  e  $s_4$  aplicadas através de  $F$  (Figura 44), são obtidas pelas equações (46) e (47), desenvolvidas por Fernlund e Spelt [117], respetivamente:

$$F_1 = \frac{s_2}{s_3} \times F, \quad (46)$$

$$F_2 = \frac{s_1 s_4}{s_3 \times (s_3 + s_4)} \times F. \quad (47)$$

A combinação das componentes  $F_1$  e  $F_2$  e o bloqueio proporcionado pelas duas vigas (9) (Figura 42) permitem obter as componentes do carregamento do provete de ensaio em modo I ( $P_I$ ) e modo II ( $P_{II}$ ) (Figura 45) através das equações (48) e (49), respetivamente:

$$P_I = \frac{F_1 - F_2}{2}, \quad (48)$$

$$P_{II} = F_1 + F_2. \quad (49)$$

As componentes do deslocamento para o modo I ( $\delta_I$ ) e modo II ( $\delta_{II}$ ) (Figura 45), registadas pelos LVDT, são apresentadas nas equações (50) e (51), respetivamente:

$$\delta_I = \delta_1 - \delta_2, \quad (50)$$

$$\delta_{II} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}. \quad (51)$$

Tendo em conta os modelos descritos no Subcapítulo 2.4.3 é possível designar as diferentes equações indicadas para o equipamento MMB desenvolvido.

Segundo o Modelo 4 [119], a equação (19) traduz o valor de  $G$ . Assim, ao aplicar o CBBM [121] a este ensaio, é possível obter as equações (36) e (37), para as componentes  $G_I$  e  $G_{II}$ , respetivamente. Deste modo, é possível obter a componente de  $\alpha_e$  para o modo I através da resolução da equação (52) referente a  $C_I$ :

$$C_I = \delta_I / P_I = \frac{8a^3}{EBh^3} + \frac{12a}{5BhG}, \quad (52)$$

que pode ser traduzida pela equação (53):

$$\alpha a_{el}^3 + \beta a_{el} + \gamma = 0, \quad (53)$$

onde  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são dados por:

$$\alpha = \frac{8}{EBh^3}; \quad \beta = \frac{12}{5BhG} \quad \text{e} \quad \gamma = -C_I.$$

Com o apoio da ferramenta Matlab® e ao manter apenas a solução real, Chaves [1] desenvolveu a equação (54) para obter a componente de  $a_e$  para o modo I:

$$a_{eI} = \frac{1}{6\alpha} \times A - \frac{2\beta}{A}, \quad (54)$$

onde

$$A = \left[ \left( -108\gamma + 12 \times \sqrt{3 \times \left( \frac{4\beta^3 + 27\gamma^2\alpha}{\alpha} \right)} \right) \times \alpha^2 \right]^{1/3}.$$

Ao aplicar o mesmo raciocínio definido para o modo I, é possível obter a componente de  $a_e$  para o modo II através da resolução da equação (55) referente a  $C_{II}$ :

$$C_{II} = \delta_{II} / P_{II} = \frac{3a^3 + 2L \times L_1^2}{2EBh^3} + \frac{6L \times L_1}{5BhG \times (2L - L_1)}, \quad (55)$$

que, ao resolver a equação (55) em ordem a  $a$ , a componente de  $a_e$  para o modo II é dada pela equação (56):

$$a_{eII} = \left[ \left( C_{II} - \frac{6L \times L_1}{5BhG \times (2L - L_1)} \right) \times \frac{2EBh^3}{3} - \frac{2L \times L_1^2}{3} \right]^{1/3}. \quad (56)$$

Ao aplicar o teorema Castigliano nas equações (28) e (29), as componentes  $\delta_I$  e  $\delta_{II}$  podem ser definidas pelas equações (57) e (58), respetivamente:

$$\delta_I = \frac{4 \times \left[ F_1 \times a^3 + \frac{(F_1 + F_2) \times (2L \times L_1^2 - a^3)}{8} \right]}{EBh^3} + \frac{3 \times \left[ F_1 \times 2a + (F_1 + F_2) \times \left( L_1 - a + \frac{L_1^2}{2L - L_1} \right) \right]}{5BhG}, \quad (57)$$

$$\delta_{II} = \frac{4 \times \left[ F_2 \times a^3 + \frac{(F_1 + F_2) \times (2L \times L_1^2 - a^3)}{8} \right]}{EBh^3} + \frac{3 \times \left[ F_2 \times 2a + (F_1 + F_2) \times \left( L_1 - a + \frac{L_1^2}{2L - L_1} \right) \right]}{5BhG}. \quad (58)$$

O ângulo de fase nominal de carregamento ( $\psi$ ), definido por Fernlund e Spelt [117], permite discriminar cada cenário de carregamento, é dado pelas equações (59) e (60):

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{G_{II}}{G_I} \right), \quad (59)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{\left( \frac{F_1}{F_2} + 1 \right)}{\left( \frac{F_1}{F_2} - 1 \right)} \right]. \quad (60)$$

### 3.3.5 Solução inicial e otimização por MEF

A solução inicial foi desenvolvida a partir do esboço inicial do equipamento, representado na Figura 40. A evolução da solução inicial até à solução final é apresentada nos pontos seguintes, tendo em conta uma otimização por MEF.

Para que os resultados de uma simulação por MEF sejam os mais reais possíveis, é necessário definir uma correta parametrização da simulação de acordo com a análise pretendida. Neste trabalho, a otimização por MEF cumpre os parâmetros de simulação gerais descritos na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros para simulação por MEF

Parâmetro	Descrição
Estudo	Estático linear
Material	Aço PM300 modelado como <i>elastic isotropic</i>
Condição fronteira	Fixo Deslizante
Tipo de ligação	Ligação por pinos Ligação sem penetração Ligação <i>bonded</i>
Força aplicada	Força ascendente de 20 kN
Malha	Malha sólida e baseada na curvatura

É importante salientar que, ao considerar a ligação por pinos, é possível obter resultados mais reais. Este tipo de ligação consiste em simular a presença dos pinos, ainda que estes não estejam representados como componentes à semelhança das restantes peças do equipamento. Assim, é possível garantir superfícies concêntricas e a inexistência de deslocamento superficial e tornar a análise mais leve devido à supressão dos pinos reais.

As propriedades e características do Aço PM300, mais relevantes para este estudo, estão apresentadas na Tabela 15. A ficha técnica referente ao Aço PM300 encontra-se disponível no Anexo 6.1.

Tabela 15 - Propriedades e características do Aço PM300

Características/Propriedades	Descrição/Valor	Unidades
Módulo de elasticidade longitudinal	210000	MPa
Coeficiente de Poisson	0,3	-
Módulo de corte	80770	MPa
Densidade	7800	kg/m <sup>3</sup>
Tensão de rotura	1000	MPa
Tensão de cedência	900	MPa
Dureza	290-330	HB
Categoria	Aço de moldes/Aço de alta qualidade	-
Tratamento	Temperado e endurecido	-
Designação	1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)	-

### 3.3.5.1 Solução inicial

O conceito da solução inicial encontra-se representado pela Figura 40. A Tabela 16 indica as principais características dos componentes que foram considerados para alteração, tendo em conta as decisões tomadas na Tabela 12.

Tabela 16 - Componentes alterados para a solução final

Componente	Ilustração	Dimensões
Viga horizontal superior com catorze furos		Altura: 30 mm Largura: 25 mm Comprimento: 290 mm
Vigas de apoio e fixação do provete de ensaio		Altura: 20 mm Largura: 25 mm Comprimento: 195 mm Raio para quebra de aresta: 1 mm

#### 3.3.5.1.1 Parametrização da simulação

Com o apoio da Figura 42 e Tabela 14 é possível explicar a parametrização definida para esta simulação, representada na Figura 46 (a), em termos de força aplicada e condições fronteira. A representação da malha gerada pelo SolidWorks® na solução inicial do equipamento encontra-se na Figura 46 (b).

Uma força ascendente de 20 kN é aplicada na extremidade do conetor (13), as condições fronteira são os quatro apoios fixos nos furos de fixação do conetor (8) e a condição de deslizante no conetor (12).

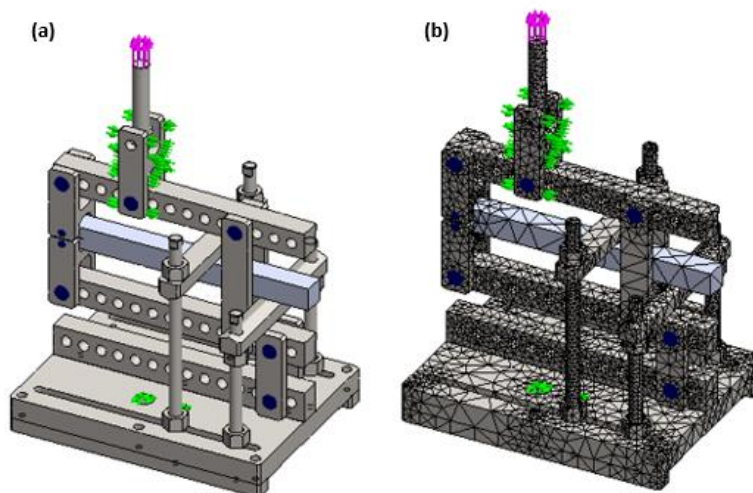


Figura 46 - Parametrização da simulação - solução inicial: (a) força aplicada e condições fronteira e (b) malha gerada

Após a definição da força aplicada e das condições fronteira a ela associadas, foram definidos os parâmetros de malha a usar na análise da solução inicial (Tabela 17).

Tabela 17 - Parâmetros da malha utilizada na simulação da solução inicial

Parâmetro	Valor	Unidades
Tamanho mínimo de elementos	6,0890	mm
Tamanho máximo de elementos	30,445	mm
Número de elementos	55544	-
Número de nós	96945	-

### 3.3.5.1.2 Resultados da simulação

Os resultados obtidos na simulação efetuada para análise da solução final em termos de tensões equivalentes de von Mises, deslocamentos resultantes e coeficiente de segurança estão representados na Figura 47, Figura 48 e Figura 49, respetivamente.

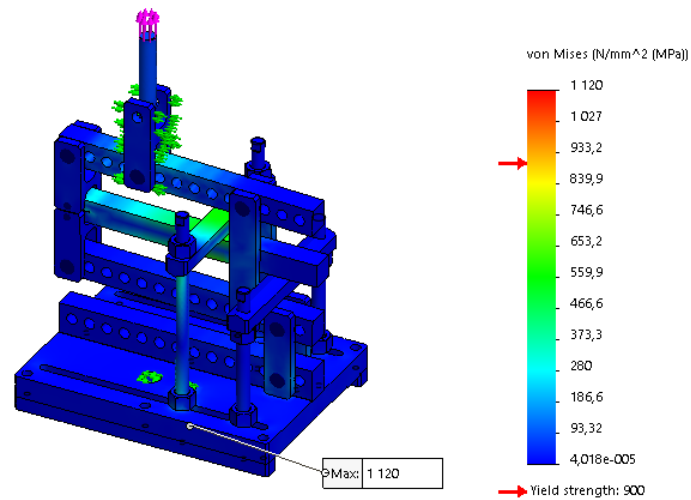


Figura 47 - Tensões equivalentes de von Mises da solução inicial

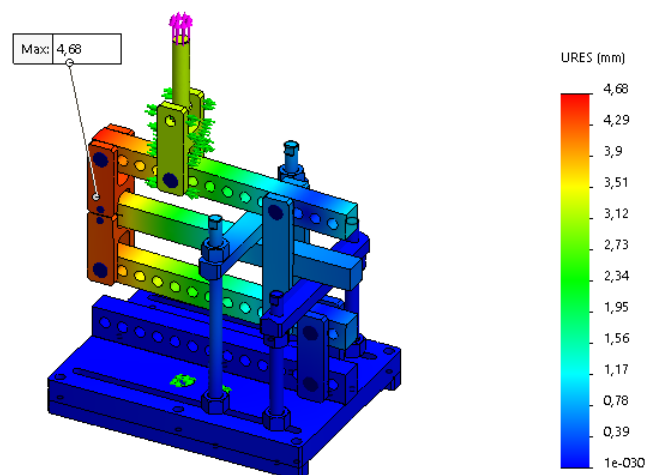


Figura 48 - Deslocamentos resultantes da solução inicial

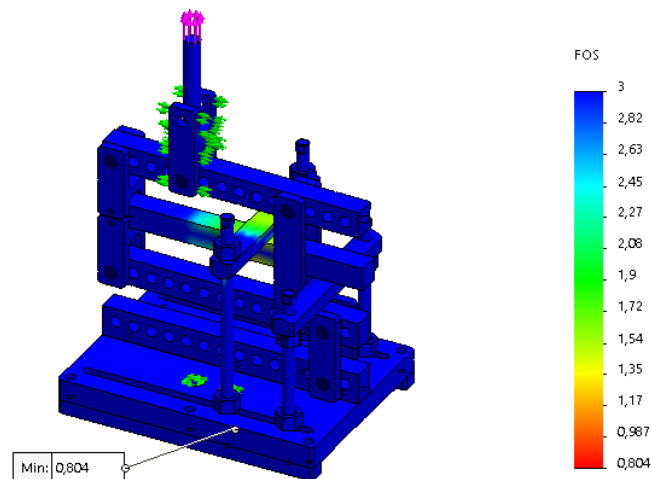


Figura 49 - Coeficiente de segurança da solução inicial

Os resultados obtidos nesta simulação indicam uma tensão máxima de von Mises de 1120 MPa (Figura 47). No que se refere aos deslocamentos resultantes da solução inicial, o valor máximo obtido é 4,68 mm (Figura 48) e o coeficiente de segurança mínimo igual a 0,804 (Figura 49).

Estes resultados indicam que esta solução não é adequada, principalmente porque se verifica que a tensão máxima de von Mises é relativamente superior à tensão de cedência do material. Esta premissa é ainda reforçada pelo baixo valor de coeficiente de segurança mínimo, que é inferior à unidade.

A zona com maior concentração de tensão tem lugar na viga superior de apoio e fixação do provete de ensaio, pelo que a melhoria dos resultados pode ser obtida pela alteração das dimensões desta viga e, conseqüentemente, da viga inferior de apoio e fixação do provete de ensaio.

### 3.3.5.2 Solução final

O conceito da solução final encontra-se representado pela Figura 41. A Tabela 18 indica as alterações efetuadas na solução final relativamente à solução inicial.

Tabela 18 - Alterações da solução inicial para a solução final

Componente	Solução	Ilustração	Dimensões
Vigas de apoio e fixação do provete de ensaio	Inicial		Altura: 20 mm Largura: 25 mm Comprimento: 195 mm
	Final		Altura: 25 mm Largura: 25 mm Comprimento: 195 mm

### 3.3.5.2.1 Parametrização da simulação

A parametrização definida para esta simulação, representada na Figura 50 (a), em termos de força aplicada e condições fronteira, é idêntica àquela definida para a simulação da solução inicial, descrita no Subcapítulo 3.3.5.1.1. A representação da malha gerada pelo SolidWorks® na solução final do equipamento encontra-se na Figura 50 (b).

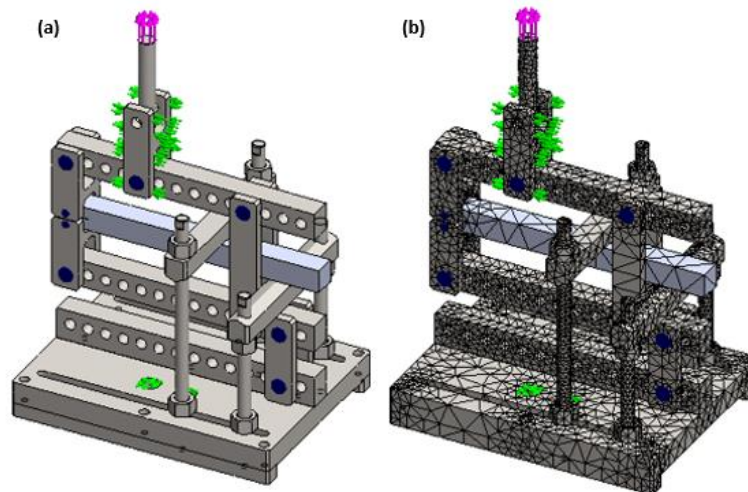


Figura 50 - Parametrização da simulação - solução final: (a) força aplicada e condições fronteira e (b) malha gerada

Após a definição da força aplicada e das condições fronteira a ela associadas, foram definidos os parâmetros de malha a usar na análise da solução final (Tabela 19).

Tabela 19 - Parâmetros da malha utilizada na simulação da solução final

Parâmetro	Descrição	Unidades
Tamanho mínimo de elementos	6,0890	mm
Tamanho máximo de elementos	30,445	mm
Número de elementos	55521	-
Número de nós	96956	-

### 3.3.5.2.2 Resultados da simulação

Os resultados obtidos na simulação efetuada para análise da solução final em termos de tensões equivalentes de von Mises, deslocamentos resultantes e coeficiente de segurança estão representados na Figura 51, Figura 52 e Figura 53, respetivamente.

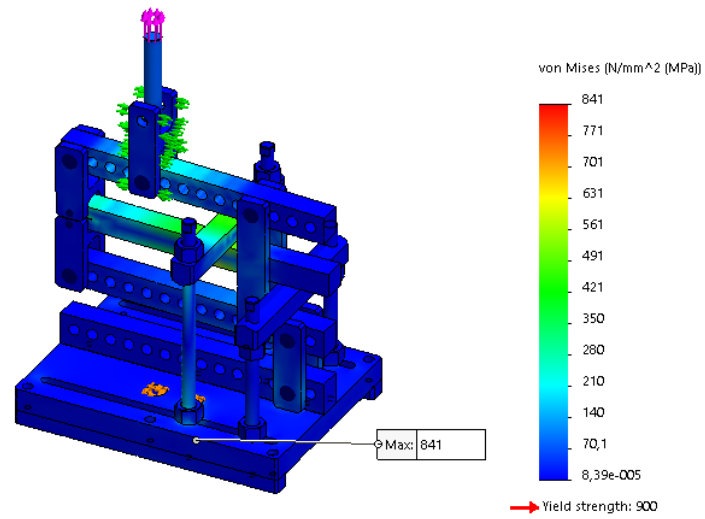


Figura 51 - Tensões equivalentes de von Mises da solução final

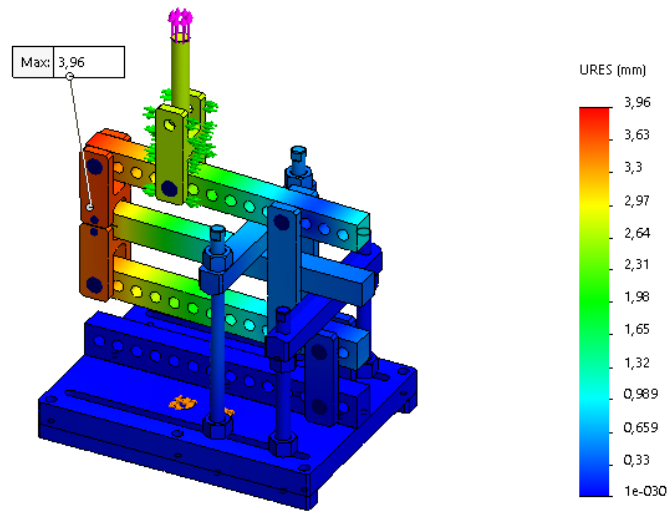


Figura 52 - Deslocamentos resultantes da solução final

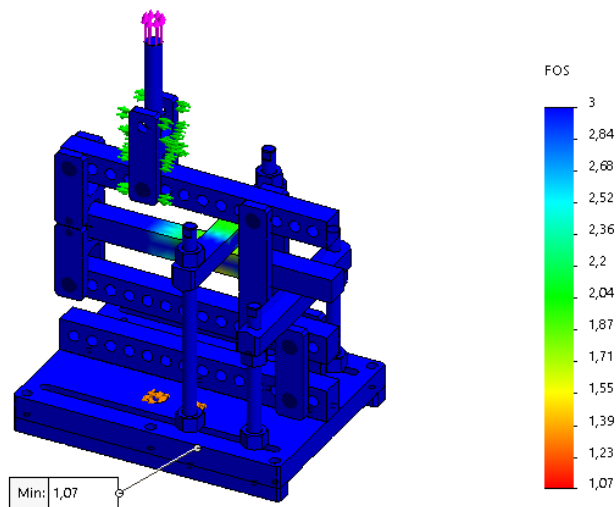


Figura 53 - Coeficiente de segurança da solução final

Os resultados obtidos nesta simulação indicam uma tensão máxima de von Mises de 841 MPa (Figura 51). No que se refere aos deslocamentos resultantes da solução final, o valor máximo obtido é 3,96 mm (Figura 52) e um coeficiente de segurança mínimo igual a 1,07 (Figura 53).

### 3.3.5.3 Análise dos resultados obtidos nas simulações

Para análise dos resultados obtidos, foi criada uma tabela de comparação (Tabela 20) entre as três simulações efetuadas nos Subcapítulos 3.2.1.2, 3.3.5.1 e 3.3.5.2. Deve-se salientar que foram estipulados os mesmos parâmetros para as três simulações, de modo a obter uma comparação mais real entre simulações. Para esta análise foram considerados todos os parâmetros e características do material aplicado (Tabela 15).

Tabela 20 - Análise dos resultados obtidos nas simulações

Parâmetro	Equipamento desenvolvido por Chaves [1]	Solução inicial	Solução final	Unidades
Tensão máxima de von Mises	972	1120	841	MPa
Deslocamento máximo	8,940	4,680	3,960	mm
Coeficiente de segurança mínimo	0,833	0,804	1,070	-
Massa	16,340	21,567	21,922	kg

Através da análise da Tabela 20 é possível observar que existe uma diminuição do valor máximo da tensão de von Mises da solução final relativamente à solução inicial e ao equipamento desenvolvido por Chaves [118]. Esta diminuição é satisfatória, uma vez que se conseguiu uma solução em que a tensão máxima de von Mises é inferior à tensão de cedência do material, sendo o melhor resultado obtido nestas simulações.

Como consequência da diminuição do valor máximo da tensão de von Mises, o coeficiente de segurança mínimo da solução final aumenta relativamente à solução inicial e ao equipamento desenvolvido por Chaves [118]. O valor do coeficiente de segurança mínimo é agora superior a um. Ainda que este não seja o valor ideal, é aceitável tendo em conta os resultados obtidos nestas simulações. Pode dizer-se que o coeficiente de segurança, dado para a razão tensão de cedência do material/tensão máxima de von Mises, aumenta com a diminuição do valor da tensão máxima. É importante salientar que a solicitação de 20 kN já se encontra majorada.

Ainda é possível observar que a solução final apresenta o menor valor do deslocamento máximo e a maior massa do que a solução inicial e o equipamento desenvolvido por Chaves [118], uma vez que é a solução que apresenta um equipamento mais robusto.

### 3.4 Fabrico do equipamento

O equipamento foi fabricado de acordo com o projeto do mesmo. Como tal, foi necessária a definição de todos os componentes a fabricar ou a adquirir e respetivo estudo de mercado para escolha de materiais e fornecedores. Todos os componentes a fabricar foram produzidos tendo em conta o processo de fabrico mais indicado para cada componente e sua aplicação.

#### 3.4.1 Definição dos componentes a fabricar e adquirir

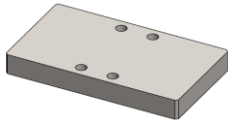
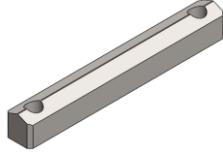





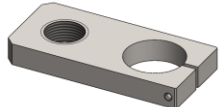
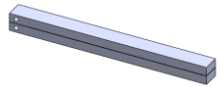
O equipamento MMB desenvolvido inclui vários componentes projetados a fabricar, bom como vários componentes normalizados a adquirir. As principais características destes são descritas de forma detalhada nos pontos seguintes.

##### 3.4.1.1 Componentes a fabricar

A Tabela 21 apresenta a lista dos componentes projetados a fabricar com uma breve descrição dos mesmos. Os desenhos de fabrico referentes aos componentes projetados encontram-se disponíveis no Anexo 6.2.

Tabela 21 - Lista dos componentes projetados a fabricar (numeração apresentada na Figura 42)

Designação componente	Ilustração	Quantidade	Material	Descrição e número do componente
EEMMB-001		1	Aço PM300	Base (1)
EEMMB-002		2	Aço PM300	Guias (2)
EEMMB-003		1	Aço PM300	Viga horizontal (3)
EEMMB-004		2	Aço PM300	Viga vertical (4)
EEMMB-005		2	Aço PM300	Vigas horizontais (5)
EEMMB-006		2	Aço PM300	Peças em forma de "H" (6)
EEMMB-007		2	Aço PM300	Elementos de ligação verticais (7)

Designação componente	Ilustração	Quantidade	Material	Descrição e número do componente
EEMMB-008		1	Aço PM300	Conetor para a parte inferior da MTS (8)
EEMMB-009		2	Aço PM300	Vigas de apoio e fixação do provete de ensaio (9)
EEMMB-010		2	Aço PM300	Veios roscados (10)
EEMMB-011		2	Aço PM300	Veios roscados (11)
EEMMB-012		1	Aço PM300	Conetor em forma de "H" para a parte superior da MTS (12)
EEMMB-013		1	Aço PM300	Veio de conexão para a parte superior da MTS (13)
EEMMB-014		2	Aço PM300	Veios roscados (14)
EEMMB-015		2	Aço PM300	Suportes LVDT (15)
PROVETE-DCB		10	Aço PM300	Substratos do provete de ensaio (26)

### 3.4.1.2 Componentes a adquirir

A Tabela 22 apresenta a lista de componentes normalizados a adquirir com uma breve descrição dos mesmos. As fichas técnicas referentes aos componentes normalizados encontram-se disponíveis no Anexo 6.3.

Tabela 22 - Lista de componentes normalizados a adquirir (numeração apresentada na Figura 42)

Designação componente	Ilustração	Quantidade	Descrição e número do componente
Parafuso M3x30 mm		2	Parafuso de cabeça cilíndrica ISO 4762 (19)

Designação componente	Ilustração	Quantidade	Descrição e número do componente
Parafuso M6x30 mm		6	Parafuso de cabeça cilíndrica ISO 4762 (20)
Parafuso M8x30 mm		3	Parafuso de cabeça cilíndrica ISO 4762 (21)
Parafuso M12x70 mm		1	Parafuso de cabeça cilíndrica ISO 4762 (22)
Parafuso M12x80 mm		4	Parafuso de cabeça cilíndrica ISO 4762 (23)
Porca M10		6	Porca hexagonal ISO 4034 (16)
Porca M12		1	Porca hexagonal ISO 4034 (17)
Porca M16		14	Porca hexagonal ISO 4034 (18)
Pino Ø6x45 mm		2	Pino calibrado EH 22380.0029 (24)
Pino Ø12x45 mm		7	Pino calibrado EH 22380.0069 (25)
Pino Ø6x100 mm		2	Pino calibrado EES-2C E250600100
LVDT		2	LVDT DCTH1000A de retorno por mola apropriado para aplicar quando não é possível conectar a armadura do LVDT ao componente móvel a medir.

### 3.4.1.3 Componentes a alterar após aquisição

Ao aplicar o sistema LVDT é importante garantir que a extremidade do LVDT esteja em estreito contacto com os pinos calibrados. Para tal, é necessário alterar a geometria do topo dos mesmos. Esta alteração consiste no facejamento do topo de modo a criar duas faces paralelas que garantam a perpendicularidade entre o topo dos pinos e o LVDT para assegurar o correto funcionamento deste último. A Figura 54 representa o facejamento a efetuar no topo dos dois pinos  $\varnothing 6 \times 100$  mm (Tabela 22). O desenho para alteração da geometria referente ao facejamento do topo destes pinos encontra-se disponível no Anexo 6.2. É importante salientar que este componente é fabricado em aço de alta liga com a designação 1.2344 (X 40 CrMoV5-1) e posteriormente nitrurado, pelo que apresenta um valor de dureza elevado (Superfície > 950 HV 0.3), sendo necessário um cuidado acrescentado na escolha da ferramenta adequada para a realização desta alteração.

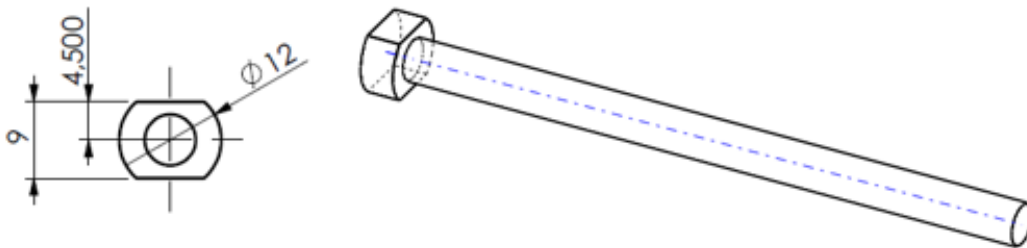


Figura 54 - Representação esquemática do facejamento do topo dos pinos  $\varnothing 6 \times 100$  mm

### 3.4.2 Escolha de fornecedores

Para o estudo de mercado conducente à escolha de fornecedores foram considerados os principais requisitos seguintes:

- características pretendidas para cada componente;
- relação qualidade/custo dos componentes;
- prazo de entrega estimado.

A Tabela 23 apresenta a lista de fornecedores selecionados para a aquisição dos materiais e componentes normalizados, de acordo com os requisitos mencionados.

Note-se que o material Aço PM300 foi adquirido tendo em conta as dimensões de cada componente não normalizado (Tabela 21), tendo sido considerado o ajuste das mesmas para dimensões padrão. Note-se ainda que as quantidades referentes a cada componente normalizado (Tabela 22) foram encomendadas em excesso de modo a suprimir eventuais problemas de manuseamento e a garantir *stock* durante a realização dos ensaios para que a substituição ocorra no menor tempo possível.

Os componentes LVDT (Tabela 22) não foram adquiridos devido ao seu elevado custo. Contudo, foram fabricados e adquiridos os componentes para os respetivos suportes de forma que o conceito do equipamento MMB desenvolvido se mantenha e que estes estejam disponíveis para utilização no futuro.

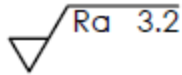
Tabela 23 - Lista de fornecedores selecionados

Fornecedor	Material/Componente	Quantidade Total	Custo Total (€)	Prazo de entrega
COFERAC	Pino calibrado EES-2C E250600100	6	17,84	1 semana
EUROFERRAMENTAS	Pino calibrado EH 22380.0029	6	360,49	10 dias úteis
	Pino calibrado EH 22380.0069	10		
MAQMAIS	Parafuso de cabeça cilíndrica ISO 4762 M3x30	4	29,73	2 a 3 semanas
	Parafuso de cabeça cilíndrica ISO 4762 M6x30	8		
	Parafuso de cabeça cilíndrica ISO 4762 M8x30	5		
	Parafuso de cabeça cilíndrica ISO 4762 M12x70	4		
	Parafuso de cabeça cilíndrica ISO 4762 M12x80	6		
	Porca hexagonal ISO 4034 M10	10		
	Porca hexagonal ISO 4034 M12	4		
	Porca hexagonal ISO 4034 M16	20		
	Varão Roscado M16 (Aço PM300)	3 m		
RAMADA AÇOS	Aço PM300	66 kg	256,89	5 dias

### 3.4.3 Criação dos desenhos de fabrico

Para o fabrico do equipamento foi necessário desenvolver desenhos de fabrico e especificar pormenores de conceção para o fabricante, de modo a cumprir os requisitos impostos e a promover um melhor funcionamento e um aumento da vida útil ao equipamento. A Tabela 24 apresenta os parâmetros definidos nas folhas de desenho.

Tabela 24 - Parâmetros dos desenhos de fabrico [142]

Parâmetro	Descrição	Explicação
Rugosidade superficial		Superfícies maquinadas que apresentam boas qualidades para contacto fixo. Superfícies alisadas em que as estrias das ferramentas já quase não são visíveis.
Tolerâncias gerais	IT12	Grau médio para exatidão grosseira em construção corrente.
Tolerâncias geométricas	H7	Ajustamento com pequena folga, que tem por limite uma folga nula, que permitem a montagem manual. Classe deslizante para movimentos guiados com exatidão.
Tipo de documento	Desenho de peça Desenho de conjunto	-
Tamanho da folha	A4/A3	-
Material	1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)	-

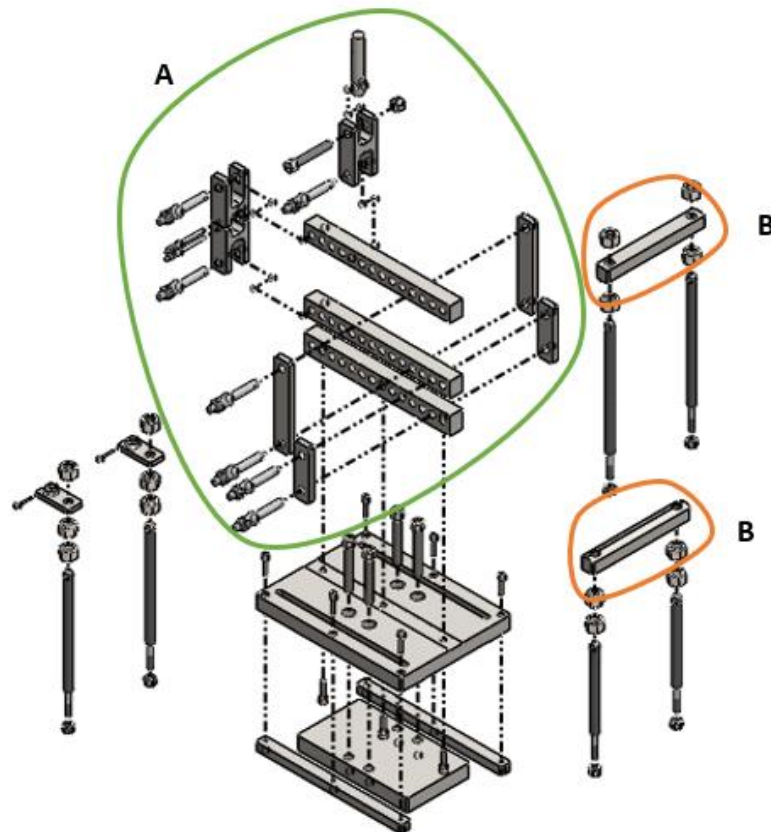


Figura 55 - Vista explodida do equipamento MMB desenvolvido

Através da análise da Figura 55, e com o apoio da informação contida na Tabela 24, é possível justificar as decisões tomadas para a criação dos desenhos de fabrico de cada componente. Todas as peças devem ser fabricadas de acordo com os parâmetros definidos e respetivos desenhos de fabrico (disponíveis no Anexo 6.2). Deste modo, o fabrico de todas as peças deve garantir um acabamento superficial aceitável, onde as superfícies apresentam boas qualidades para contacto fixo e as estrias das ferramentas já quase não são visíveis. Todas as peças com furação para contacto com os pinos calibrados (assinaladas na zona A da Figura 55) devem apresentar furos que permitam uma rápida e fácil montagem manual, com movimentos deslizantes guiados com exatidão de posicionamento garantida. Na Figura 56 encontra-se representado um exemplo do acabamento superficial pretendido (assinalado nas zonas B da Figura 55). Neste caso, os componentes EEMMB-009 não devem marcar o provete de ensaio.



Figura 56 - Fotografia do componente EEMMB-009 com pormenor de acabamento superficial

### 3.4.4 Fabrico dos componentes

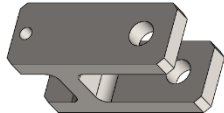
Neste trabalho, foi utilizada uma máquina CNC (*Computer Numerical Control*) da HAAS® (Figura 57), disponibilizada pelo DEM. Esta máquina é registada com o número de série 1083459 e modelo VF-2.



Figura 57 - Fotografia da máquina CNC VF-2

Devido à quantidade significativa de componentes a fabricar e da longa duração necessária para o fabrico de todos os componentes, apenas será explicado de forma detalhada o processo de fabrico de um componente, como exemplo para os demais. A Tabela 25 apresenta o componente selecionado e respetivas características. O desenho de fabrico referente a este componente encontra-se disponível no Anexo 6.2.

Tabela 25 - Características do componente EEMMB-006

Componente	Designação	Ilustração	Dimensões/Características
Peça em forma de "H"	EEMMB-006		Material: Aço PM300 Altura: 79,70 mm Largura: 45 mm Comprimento: 30 mm Furação: Ø6H7 e Ø12H7 Raios: 8 mm Chanfros: 3X45°

#### 3.4.4.1 Processo de fabrico do componente EEMMB-006

Inicialmente, foi desenvolvido o desenho de fabrico do componente, tendo em conta o projeto do equipamento, a função do componente e as informações necessárias para o fabricante. A definição das ferramentas adequadas para a maquinação deste componente são também apresentadas.

##### 3.4.4.1.1 Desenho de fabrico do componente

Na Figura 58 está representado o desenho de fabrico (Anexo 6.2) do componente EEMMB-006, que inclui as cotas necessárias para o fabrico do componente, segundo os pressupostos indicados no Subcapítulo 3.4.3.

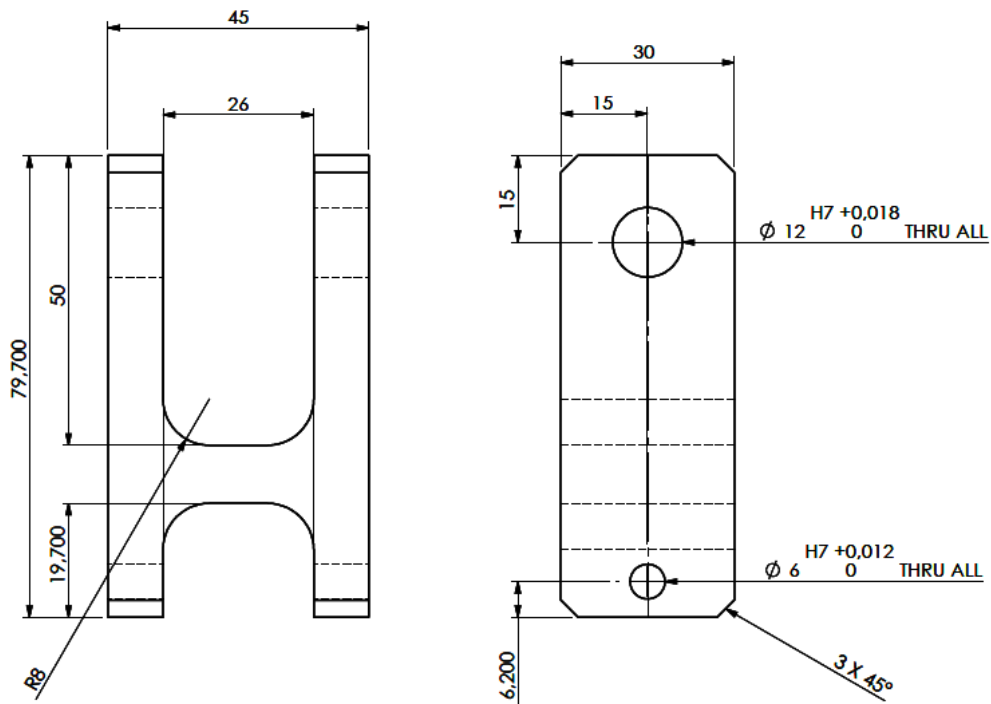


Figura 58 - Representação do desenho de fabrico do componente EEMMB-006

### 3.4.4.1.2 Definição das ferramentas

A Tabela 26 apresenta a lista de ferramentas que foram necessárias para o fabrico do componente EEMMB-006.

Tabela 26 - Lista de ferramentas para o fabrico do componente EEMMB-006

Designação	Ilustração	Descrição
Broca $\phi 6$ mm		Furação  Material: <i>High Speed Steel</i> com 5% de Cobalto
Broca $\phi 10$ mm		Furação  Material: <i>High Speed Steel</i> com 5% de Cobalto
Fresa <i>Bull nose</i>  R=0,5 mm $\phi 12$ mm		Acabamento superficial  Para aço duro

Designação	Ilustração	Descrição
<p>Fresa <i>Bull nose</i></p> <p>R=0,5 mm Ø16 mm</p>		<p>Acabamento superficial</p> <p>Para aço duro</p>
<p>Fresa <i>Countersink</i></p>		<p>Quebra de arestas</p>
<p>Fresa <i>Flat</i></p> <p>Ø10 mm</p>		<p>Acabamento superficial</p> <p>Para aço duro</p>
<p>Face mill Ø51 mm</p>		<p>Facejamento</p> <p>Para aço duro com 4 insertos</p>
<p>Sonda 40-2</p>		<p>Recolha de informação sobre o posicionamento dos blocos em relação à CNC</p>

#### 3.4.4.1.3 Descrição do processo de fabrico

O processo de fabrico do componente EEMMB-006 pode ser descrito através do diagrama sequencial apresentado na Figura 59. Neste diagrama são descritos os passos necessários para o fabrico deste componente, bem como as ferramentas utilizadas (Tabela 26). O diagrama é ainda ilustrado com várias fotografias tiradas durante o processo de fabrico e algumas imagens retiradas do *software* de programação CNC do mesmo.

**Montagem**  
das diferentes ferramentas  
na CNC

**PASSO**  
**01**



**PASSO**  
**02** **Medição**  
das ferramentas e verificação  
do seu posicionamento

**Posicionamento**  
do bloco nos mordentes:  
Aperto 1

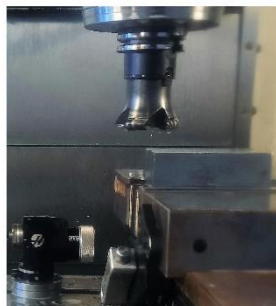
**PASSO**  
**03**



**PASSO**  
**04** **Recolha**  
de informação sobre o  
posicionamento dos  
blocos em relação à CNC  
através da sonda

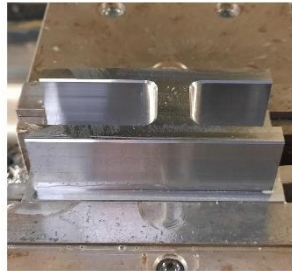
**Facejamento**  
da superfície superior

**PASSO**  
**05**



**Formação**  
da geometria em forma de  
"H"

**PASSO**  
**06**



**PASSO**  
**07**

**Contorno**  
das faces

**Posicionamento**  
do bloco nos mordentes:  
Aperto 2

**PASSO**  
**08**



**PASSO**  
**09**

**Recolha**  
de informação sobre o  
posicionamento dos  
blocos em relação à CNC  
através da sonda

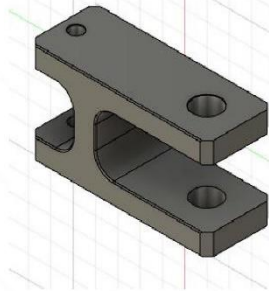
**Facejamento**  
da superfície inferior

**PASSO**  
**10**



Contorno  
das faces

PASSO  
**11**

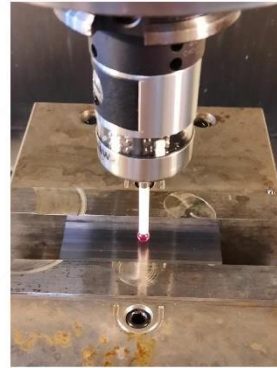


PASSO  
**12**

Posicionamento  
do bloco nos mordentes:  
Aperto 3

Recolha  
de informação sobre o  
posicionamento dos blocos  
em relação à CNC através  
da sonda

PASSO  
**13**



PASSO  
**14**

Furação

Quebra  
das arestas dos furos

PASSO  
**15**



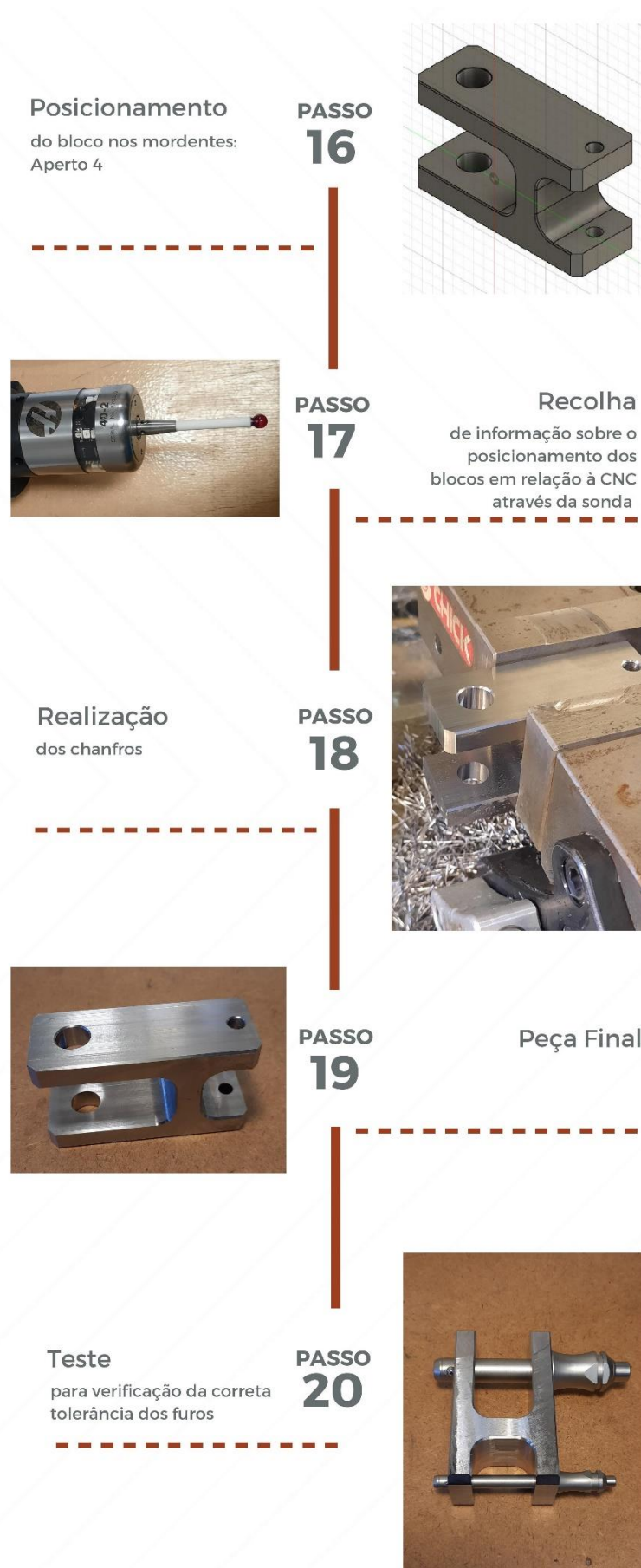


Figura 59 - Diagrama representativo da sequência do processo de fabrico do componente EEMMB-006

É importante referir que, pela aparência das aparas representada na Figura 60, estas são constantes e apresentam tamanhos idênticos, o que indica que os parâmetros para maquinação são bons e as ferramentas foram selecionadas corretamente.



Figura 60 - Fotografia das aparas: (a) e (b) aparas de raios diferentes e (c) apara de saída


#### 3.4.4.2 Registo fotográfico dos componentes fabricados e alterados após aquisição

A Tabela 27 apresenta a lista total dos componentes projetados fabricados.

Tabela 27 - Lista total dos componentes projetados fabricados

Designação componente	Fotografia
EEMMB-001	
EEMMB-002	
EEMMB-003	
EEMMB-004	

Designação componente	Fotografia
EEMMB-005	
EEMMB-006	
EEMMB-007	
EEMMB-008	
EEMMB-009	
EEMMB-010	
EEMMB-011	

Designação componente	Fotografia
EEMMB-012	
EEMMB-013	
EEMMB-014	
EEMMB-015	

Na Figura 61 encontra-se apresentada a alteração realizada nos componentes a alterar após aquisição, descrita no Subcapítulo 3.4.1.3. Esta alteração consistiu no facejamento do topo dos dois pinos  $\varnothing 6 \times 100$  mm (Tabela 22), tal como referido anteriormente na Figura 54. A ferramenta utilizada para a realização desta alteração consiste numa *face mill grade* IC908, com revestimento duro, o que permite um valor dureza mais elevado que o valor da dureza do material.



Figura 61 - Registo fotográfico do facejamento do topo dos pinos  $\varnothing 6 \times 100$  mm

Todos os componentes ilustrados na Tabela 27 foram sujeitos a um tratamento de superfície através do processo de zincagem a preto. Este tipo de tratamento estabiliza a superfície, pelo que promove a proteção do aço à ocorrência de ferrugem e o aumento da vida útil do equipamento. Desta forma, são ainda garantidos o bom acabamento superficial e, devido à cor final, o bom aspeto visual do equipamento.

### 3.4.5 Equipamento final

Na Figura 62 encontra-se apresentada a montagem final do equipamento MMB desenvolvido. A montagem deste equipamento respeita o desenho de conjunto (EEMMB-100) referente ao projeto do mesmo, disponível no Anexo 6.2.

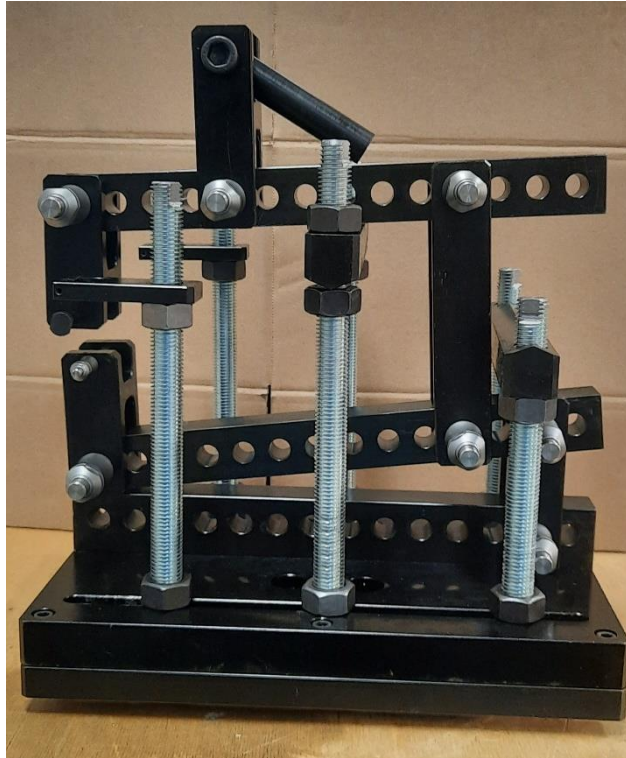


Figura 62 - Fotografia do equipamento MMB desenvolvido

## 3.5 Validação do funcionamento

Após o fabrico do equipamento projetado é necessário realizar diferentes ensaios experimentais e respetivo tratamento de dados para validação do funcionamento do mesmo, através da obtenção de várias combinações de modo misto, com recurso apenas ao próprio equipamento e ao mesmo tipo de provete de ensaio. Deste modo, foram definidos quais os materiais a utilizar e a geometria das juntas. O processo de fabrico dos provetes e a realização dos ensaios são descritos detalhadamente nos pontos seguintes. Os resultados obtidos durante os ensaios para validação final do equipamento são apresentados e analisados de forma crítica.

### 3.5.1 Materiais utilizados

As juntas adesivas são sempre fabricadas com base em dois materiais principais, os aderentes e o adesivo, que apresentam propriedades diferentes, cada um com funções diferentes no desempenho geral da junta adesiva, seja para diferentes ambientes ou condições de carga. Os diferentes materiais utilizados são descritos de forma detalhada nos pontos seguintes, tendo em conta os aspetos considerados mais relevantes para este estudo.

### 3.5.1.1 Substratos em Aço PM300

Os substratos foram fabricados com o mesmo material que os restantes componentes do equipamento: Aço PM300. As propriedades e características do Aço PM300 estão apresentadas na Tabela 15, representada no Subcapítulo 3.3.5. A Tabela 28 apresenta as características dos substratos do componente PROVETE-DCB.

Tabela 28 - Características dos substratos do componente PROVETE-DCB

Componente	Ilustração	Dimensões/Características
Substratos do componente PROVETE-DCB		Material: Aço PM300 Altura: 12,70±0,130 mm Largura: 25 mm Comprimento: 300 mm Furação: Ø6,35±0,050 mm Quantidade: 2 substratos por provete

### 3.5.1.2 Adesivo Araldite® AV 138/HV 998

O adesivo Araldite® AV 138/HV 998 destaca-se pela sua tixotropia, que promove o preenchimento de defeitos, excelente resistência química e resistência à temperatura de 140°C. O processo de cura deste adesivo ocorre à temperatura ambiente pela combinação de dois componentes de alta resistência: Araldite® AV 138M-1 e Hardener HV 998-1. Após o término do tempo de cura, este adesivo oferece um excelente desempenho a altas temperaturas. Este adesivo é adequado para a união adesiva de uma ampla variedade de metais, cerâmicas, vidro, borrachas e plásticos rígidos, por exemplo. As propriedades do adesivo Araldite® AV 138/HV 998 estão apresentadas na Tabela 29. A ficha técnica referente a este adesivo encontra-se disponível no Anexo 6.1.

Tabela 29 - Propriedades e características do adesivo Araldite® AV 138/HV 998

Propriedades	Araldite® AV 138M-1	Hardener HV 998-1	Araldite® AV 138/HV 998
Cor	Bege	Cinzento	Cinzento
Peso específico	ca. 1.7	ca. 1.6	ca. 1.7
Viscosidade	<i>Thixotropic</i>	<i>Thixotropic</i>	<i>Thixotropic</i>
Resistência ao corte a 25°C	-	-	> 11 MPa
<i>Pot life</i> (100g a 25°C)	-	-	30 min

### 3.5.2 Geometria das juntas

A geometria das juntas (Figura 63) foi definida de acordo com as características do provete de ensaio DCB (Figura 11), referidas no Subcapítulo 2.3.1.1. Esta geometria é idêntica à configuração utilizada no ensaio MMB (Figura 21), pelo que a explicação referenciada no Capítulo 2.4 confirma a utilização direta da configuração do provete de ensaio DCB no ensaio MMB. Neste trabalho, considerou-se o valor de  $\alpha_0$  aproximadamente igual a 50 mm.

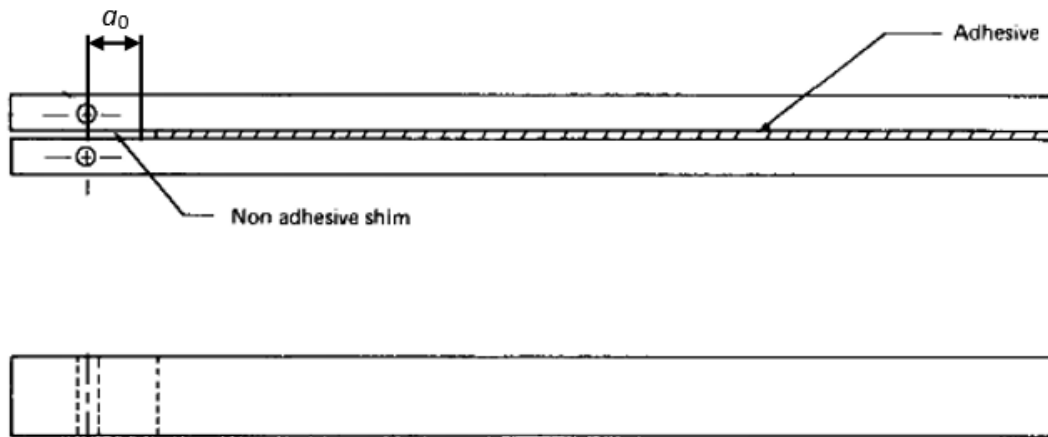


Figura 63 - Representação esquemática do provete de ensaio DCB (adaptado de [68])

### 3.5.3 Processo de fabrico

O processo de fabrico das juntas adesivas selecionadas para este trabalho pode ser dividido em três etapas necessárias. Estas consistem no fabrico dos substratos por maquinagem, a preparação do adesivo, e por fim o fabrico dos provetes de ensaio, que inclui a preparação para ensaio dos mesmos.

#### 3.5.3.1 Substratos

Inicialmente, foi desenvolvido o desenho de fabrico do componente PROVETE-DCB e dos respetivos substratos, tendo em conta a função do componente e as informações necessárias para o fabricante. A definição das ferramentas adequadas para a maquinagem deste componente é também apresentada.

##### 3.5.3.1.1 Desenho de fabrico dos substratos

Na Figura 64 está representado o desenho de fabrico (Anexo 6.2) dos substratos do componente PROVETE-DCB, que inclui as cotas necessárias para o fabrico do componente, segundo os pressupostos indicados no Subcapítulo 3.4.3.

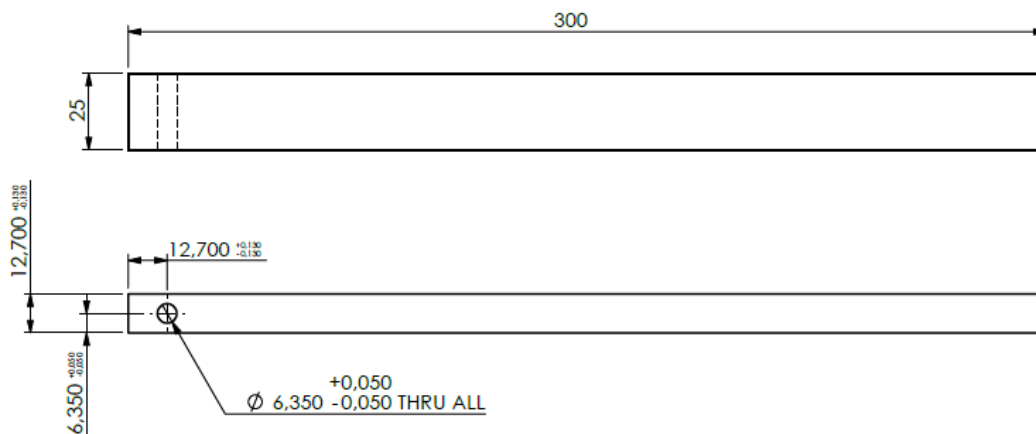
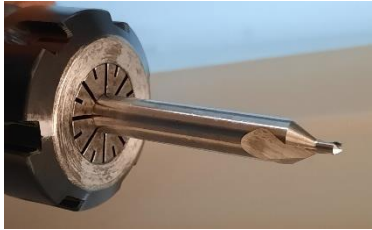
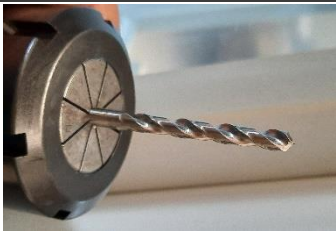



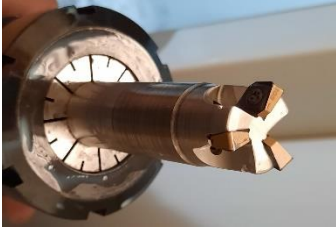





Figura 64 - Representação do desenho de fabrico dos substratos do componente PROVETE-DCB

### 3.5.3.1.2 Definição das ferramentas

A Tabela 30 apresenta a lista de ferramentas que foram necessárias para o fabrico dos substratos do componente PROVETE-DCB.

Tabela 30 - Lista de ferramentas para o fabrico dos substratos do componente PROVETE-DCB

Designação	Ilustração	Descrição/Função
Broca de ponto		Marcação da furação Material: <i>High Speed Steel</i>
Broca $\varnothing 5,5$ mm		Furação Material: <i>High Speed Steel</i> com 5% de Cobalto
Broca $\varnothing 6,3$ mm		Furação Material: <i>High Speed Steel</i> com 5% de Cobalto
Fresa <i>Countersink</i>		Quebra de arestas
Face mill $\varnothing 12$ mm		Retificação das faces Para aço duro com 3 insertos
Face mill $\varnothing 20$ mm AC		Acabamento superficial Para aço duro com 3 insertos

Designação	Ilustração	Descrição/Função
Face mill $\varnothing 20$ mm DB		Desbaste  Para aço duro com 3 inserts
Face mill $\varnothing 72$ mm		Facejamento  Para aço duro com 5 inserts
Sonda 40-2		Recolha de informação sobre o posicionamento dos blocos em relação à CNC

### 3.5.3.1.3 Descrição do processo de fabrico

O processo de fabrico dos provetes de ensaio substratos do componente PROVETE-DCB pode ser descrito através do diagrama sequencial apresentado na Figura 65. Neste diagrama são descritos os passos necessários para o fabrico deste componente, bem como as ferramentas utilizadas (Tabela 30). O diagrama é ainda ilustrado com várias fotografias tiradas durante o processo de fabrico.



Facejamento  
da superfície superior

PASSO  
**03**



PASSO  
**04**

Contorno  
das faces

Furação

PASSO  
**05**



Quebra  
das arestas

PASSO  
**06**



PASSO  
**07**

Posicionamento  
do bloco nos mordentes:  
Aperto 2

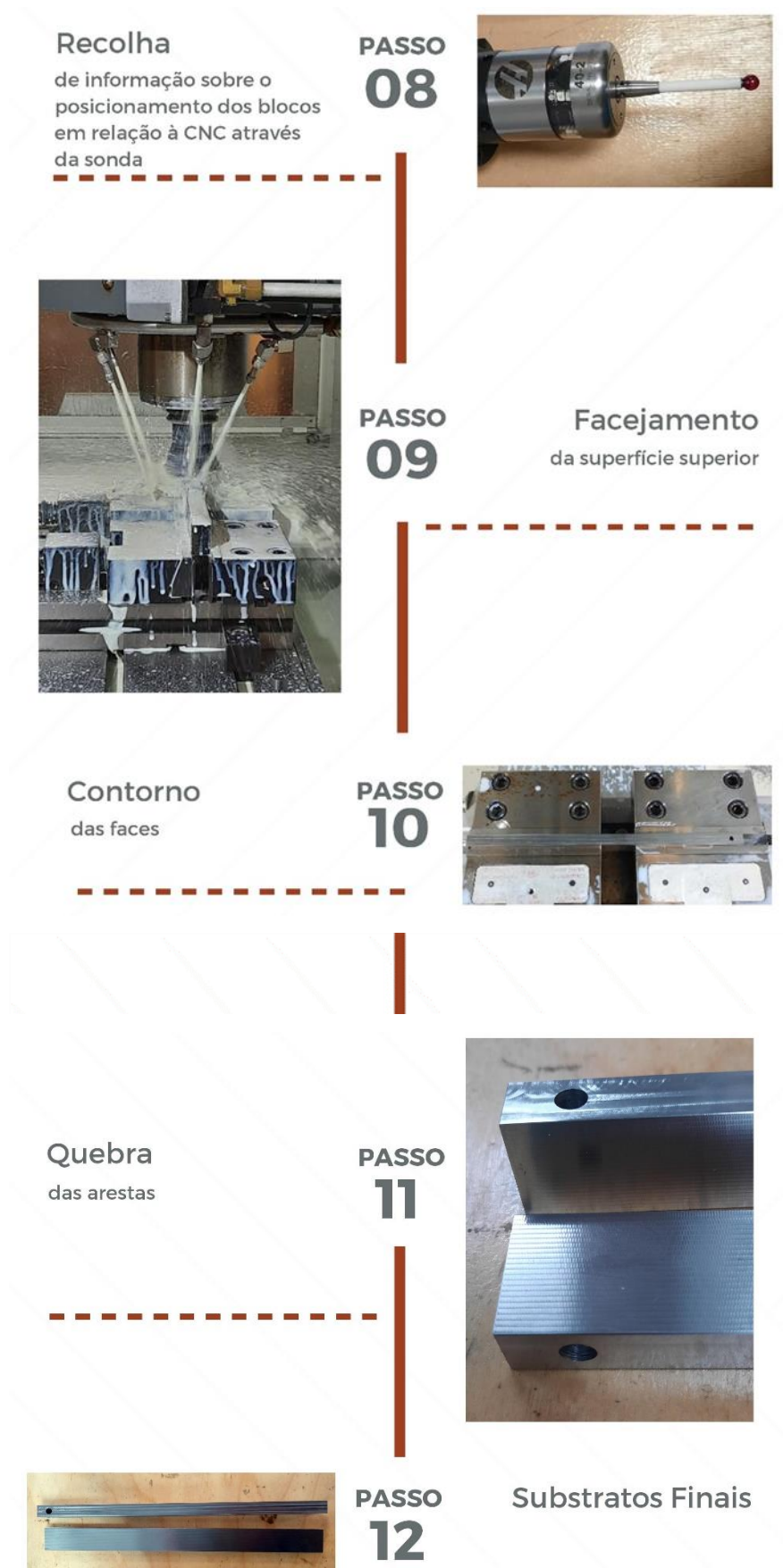


Figura 65 - Diagrama representativo da sequência do processo de fabrico dos substratos do componente PROVETE-DCB

### 3.5.3.2 Adesivo

A proporção da mistura entre a resina AV 138M-1 e o endurecedor HV 998-1 é definida pelo fornecedor e encontra-se representada na Tabela 31.

Tabela 31 - Proporção da mistura do adesivo Araldite® AV 138/HV 998

Proporção da mistura	Designação	Parts by weight	Parts by volume
Araldite® AV 138M-1	Resina	100	100
Hardener HV 998-1	Endurecedor	40	40

Através da análise da Tabela 31 e ao considerar previamente uma quantidade de resina igual a 120 g, é possível determinar a quantidade necessária de endurecedor, para produzir o adesivo pretendido:

$$\begin{aligned}
 m_{adesivo} &= m_{resina} + m_{endurecedor} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow m_{adesivo} &= m_{resina} + \left( \frac{40}{100} \times m_{resina} \right) \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow m_{adesivo} &= 120 + \left( \frac{40}{100} \times 120 \right) \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow m_{adesivo} &= 168 \text{ g,}
 \end{aligned}$$

onde

$$m_{endurecedor} = \left( \frac{40}{100} \times 120 \right) = 48 \text{ g.}$$

É importante referir que a resina e o endurecedor devem ser misturados num recipiente limpo até formarem uma mistura homogénea e que, posteriormente, este adesivo deve ser aplicado manualmente nas superfícies dos substratos, através de uma espátula devidamente limpa. As quantidades calculadas para a resina e o endurecedor foram pesadas numa balança digital com precisão de 0,5 g. Estas foram misturadas manualmente num recipiente limpo com o auxílio de uma espátula.

### 3.5.3.3 Provetes de ensaio

O fabrico dos provetes de ensaio obedece à geometria da junta representada na Figura 63, onde foram utilizados os substratos e o adesivo, previamente preparados. A quantidade de provetes de ensaio definida para este estudo é igual a oito.

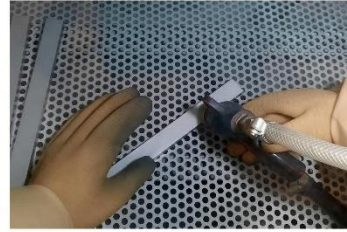
#### 3.5.3.3.1 Descrição do processo de fabrico

O processo de fabrico do componente PROVETE-DCB pode ser descrito através do diagrama sequencial apresentado na Figura 66. Neste diagrama são descritos os passos necessários para o fabrico deste componente, sendo ilustrado com várias fotografias tiradas durante o processo de fabrico.

## Preparação

das superfícies a colar de cada substrato, através do processo de granalhagem

### PASSO 01



### PASSO 02

Verificação do correto processo de granalhagem

## Limpeza

das superfícies granalhadas com acetona

### PASSO 03



### PASSO 04

Colocação das chapas para garantir a espessura de adesivo e a pré-fenda pretendidas

## Aplicação

do adesivo sob a superfície granalhada do substrato inferior, através de uma espátula

### PASSO 05



**Posicionamento**  
do substrato superior com a  
superfície granalhada  
voltada para o adesivo

**PASSO**  
**06**



**PASSO**  
**07**

**Verificação**  
do correto posicionamento  
dos substratos



**Remoção**  
do adesivo em excesso

**PASSO**  
**08**



**PASSO**  
**09**

**Verificação**  
da correta remoção do adesivo  
em excesso e da distância de  
pré-fenda



**Aplicação**  
de tinta branca numa  
superfície lateral do provete  
para melhorar a visibilidade  
da propagação da fenda

**PASSO**  
**10**





Figura 66 - Diagrama representativo da sequência do processo de fabrico do componente PROVETE-DCB

### 3.5.4 Ensaio das juntas

Os ensaios das juntas foram realizados em oito provetes de ensaio, sendo utilizados dois provetes para cada configuração de ensaio. Após o tempo necessário para a cura do adesivo, todos os provetes foram tracionados até à rotura de modo a se obterem as diferentes curvas  $P-\delta$ . As condições de ensaio e as diferentes configurações de ensaio selecionadas para este trabalho são apresentadas nos pontos seguintes. O procedimento de ensaio é semelhante para cada configuração, uma vez que o equipamento MMB desenvolvido permite uma fácil montagem e configuração do mesmo.

#### 3.5.4.1 Condições de ensaio

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente na MTS apresentada na Figura 43, disponibilizada pelo DEM, com ligação a um computador que efetua o processamento dos ensaios, onde a gravação dos respetivos dados  $P$  e  $\delta$  de cada ensaio foi registada durante a duração dos mesmos, como uma função do tempo decorrido desde o início de cada ensaio. Para posterior medição do valor de  $\alpha$ , a face lateral do provete foi registada através de uma sequência de fotografias, com cinco segundos de intervalo, através do uso de uma máquina fotográfica digital (Figura 67) com distância focal fixa de 100 mm à face lateral do provete, aproximadamente. A velocidade de ensaio indicada para o adesivo Araldite® AV 138/HV 998 é cerca de 0,5 mm/min, pelo que foi definida para todos os ensaios.







Figura 67 - Fotografia representativa do posicionamento da máquina fotográfica durante os ensaios

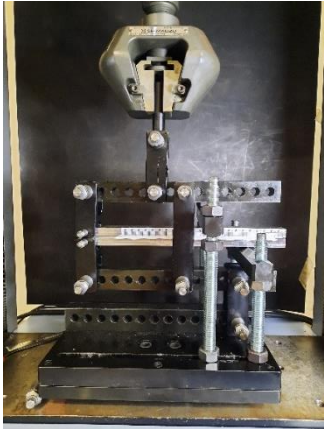

### 3.5.4.2 Configurações de ensaio

Na Tabela 32 encontram-se apresentadas as diferentes configurações de ensaio selecionadas para este trabalho. As configurações DCB\_01 e DCB\_02 remetem ao carregamento em modo puro I, enquanto as ENF\_01 e ENF\_02 ao carregamento ao modo puro II. Por outro lado, as configurações P2\_01, P2\_02, P3\_01 e P3\_02 representam duas combinações de carregamento em modo misto.

Tabela 32 - Diferentes configurações usadas para os ensaios

Configuração	Fotografia	S <sub>1</sub> [mm]	S <sub>2</sub> [mm]	S <sub>3</sub> [mm]	S <sub>4</sub> [mm]	L <sub>1</sub> [mm]	2L [mm]
DCB_01		80	60	80	-60	-	-
DCB_02		80	60	80	-60	-	-

Configuração	Fotografia	$S_1$ [mm]	$S_2$ [mm]	$S_3$ [mm]	$S_4$ [mm]	$L_1$ [mm]	$2L$ [mm]
P2_01		120	40	160	-120	200	260
P2_02		120	40	160	-120	200	260
P3_01		60	100	160	40	130	230
P3_02		60	100	160	40	130	230

Configuração	Fotografia	$S_1$ [mm]	$S_2$ [mm]	$S_3$ [mm]	$S_4$ [mm]	$L_1$ [mm]	$2L$ [mm]
ENF_01		100	40	140	80	200	230
ENF_02		100	40	140	80	200	230

### 3.5.4.3 Procedimento de ensaio

O equipamento MMB desenvolvido foi fixado na MTS de acordo com o tipo de ligação definido no Subcapítulo 3.3.3. O posicionamento de cada provete na respectiva configuração de ensaio consiste na fixação do mesmo ao equipamento MMB desenvolvido, através dos pinos calibrados pertencentes aos componentes do equipamento em estudo. Os provetes devem permanecer nivelados horizontalmente (Figura 68) até ao início de cada ensaio, independentemente da configuração de ensaio.



Figura 68 - Fotografia representativa do processo de nivelamento do provete

Cada ensaio é iniciado através do computador, ligado à MTS, e simultaneamente é acionado o cronometro para auxílio do registo fotográfico durante o ensaio. Após se verificar que  $a < L/2$  ou caso ocorra a rotura total do adesivo precocemente, o ensaio dá-se por terminado. Na Figura 69 encontra-se representado o aspeto final de um provete de ensaio após o término do mesmo.

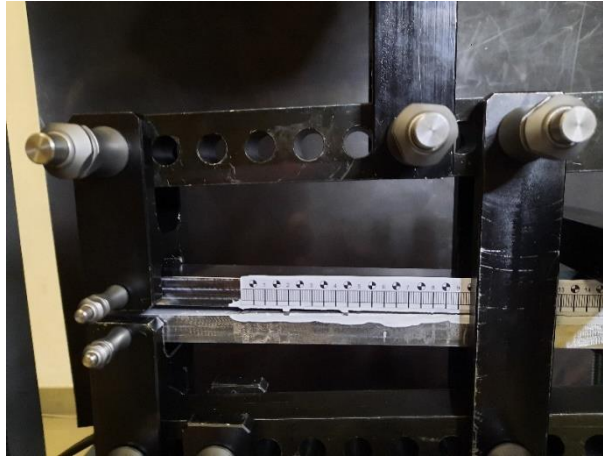


Figura 69 - Fotografia representativa de um ensaio finalizado

### 3.5.5 Resultados obtidos

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais são apresentados na forma de curvas  $P-\delta$  de cada provete de ensaio referente à respetiva configuração de ensaio. Os resultados são ainda apresentados na forma de curvas- $R$  de cada provete e nos respetivos envelopes de fratura. Neste capítulo é também efetuada uma análise crítica dos resultados obtidos e justificação dos modos de rotura.

#### 3.5.5.1 Modos de rotura

Na Figura 70 encontram-se apresentados dois exemplos dos modos de rotura ocorridos nos ensaios efetuados, onde se pode verificar que em ambos ocorreu uma rotura coesiva no adesivo, uma vez que ambas as superfícies de rotura estão cobertas por adesivo. Este modo de rotura ocorre quando a ligação entre o adesivo e o aderente é mais forte do que a resistência interna do adesivo, o que é justificado pela fragilidade típica do adesivo Araldite® AV 138/HV 998.



Figura 70 - Fotografia representativa do modo de rotura ocorrido nos ensaios

### 3.5.5.2 Curvas $P-\delta$

Estas curvas foram construídas com os valores de  $P$  em função dos valores de  $\delta$ , registados durante os ensaios. A Tabela 33 apresenta as curvas  $P-\delta$  referentes a cada configuração de ensaio.

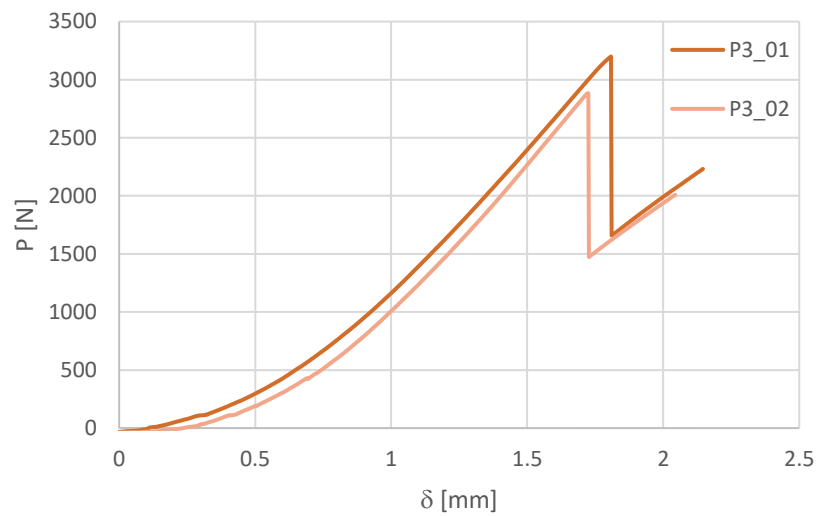
Tabela 33 - Curvas  $P-\delta$  para cada configuração

Configuração	Curvas $P-\delta$
DCB_01/02	
P2_01/02	

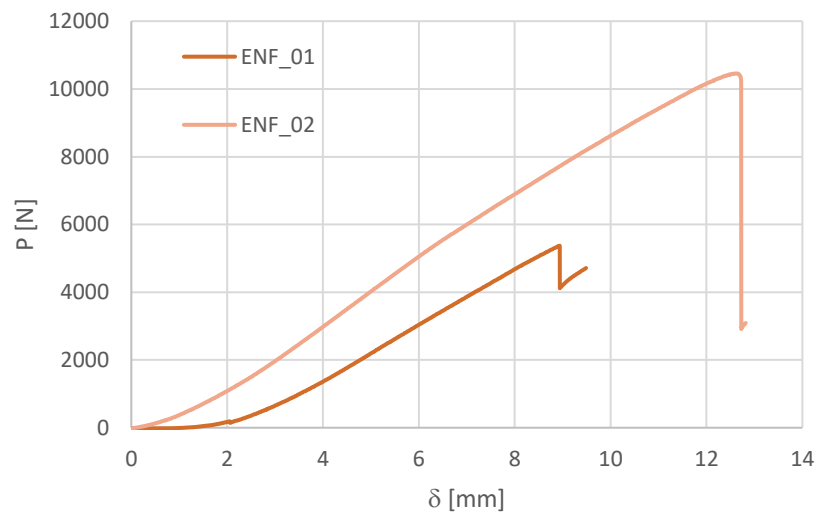
## Configuração

Curvas  $P-\delta$ 

P3\_01/02



ENF\_01/02



Através da análise das curvas  $P-\delta$  apresentadas na Tabela 33 é possível verificar que nas configurações DCB\_01 e DCB\_02, as curvas apresentam vários picos seguidos de zonas de propagação instável, que representam as roturas do adesivo ao longo dos ensaios. Os valores dos picos são semelhantes, com exceção dos valores dos picos máximos. Relativamente às configurações P2\_01, P2\_02, P3\_01 e P3\_02, as curvas estão praticamente sobrepostas, onde se verificam valores mais elevados para as cargas máximas, quando comparadas com as curvas DCB\_01 e DCB\_02. Por outro lado, as configurações ENF\_01 e ENF\_02, as curvas são lineares até à carga máxima, o que está de acordo com a natureza frágil do adesivo Araldite® AV 138/HV 998. Neste caso verifica-se um notável esfasamento entre as duas curvas, o que pode ser justificado por uma causa experimental, ocorrida no provete ENF\_01 como por exemplo mau fabrico do mesmo.

É importante salientar que a quase sobreposição das curvas, confirma a repetibilidade dos ensaios, principalmente nas configurações P2\_01, P2\_02, P3\_01 e P3\_02.



# CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Propostas de trabalhos futuros



## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 Conclusões

O aumento da utilização das juntas adesivas, verificado nas últimas décadas, originou uma evolução notória no estudo das ligações adesivas. Esta evolução promoveu uma ampla gama de aplicações diversificadas, metodologias de fabrico sofisticadas e diferentes tipos de ensaio para caracterização à fratura de estruturas adesivas. Portanto, para aumentar a confiança no projeto de estruturas adesivas, é importante prever com precisão a sua resistência mecânica.

A caracterização à fratura de juntas adesivas em modo I encontra-se bem fundamentada na literatura, pelo que existem várias normas para gerir a sua aplicação. Por outro lado, para o modo II e o modo misto I+II, é notória a escassez de literatura de caracterização à fratura de juntas adesivas e de normas disponíveis. Além disso, em aplicações reais, as juntas adesivas são submetidas a solicitações de modo misto I+II, o que aumenta significativamente a complexidade da previsão de resistência das juntas adesivas. Desta forma, foram desenvolvidos vários ensaios de modo misto para a caracterização à fratura em modo misto I+II.

O ensaio MMB destaca-se dos restantes ensaios de modo misto I+II, devido à sua capacidade de permitir a variação do rácio de modo misto praticamente sem limitações e, desta forma, permite analisar a influência do rácio de modo misto na resistência à fratura da junta. Um estudo mais aprofundado sobre a configuração MMB representa uma oportunidade para aprimorar o conhecimento da mecânica da fratura em condições de carregamento em modo misto I+II.

Neste sentido, o desafio proposto para esta dissertação consistiu em projetar, modelar numericamente e validar experimentalmente um equipamento de ensaio MMB, para a realização de ensaios de adesivos estruturais. No trabalho experimental, foi desenvolvido um equipamento com uma configuração mais simples e versátil, que permite medir a tenacidade de juntas adesivas em vários rácios de modo misto, baseado unicamente na curva  $P-\delta$ .

Este equipamento foi projetado e fabricado para realização de ensaios e tratamento de dados conducente à validação do funcionamento do equipamento para ensaio de adesivos, que consistiu na obtenção dos envelopes de fratura de adesivos e comparação com resultados da literatura. No trabalho numérico, a geometria do equipamento foi criada em *software* e foram realizadas as respetivas simulações, de modo a otimizar a geometria do equipamento projetado.

O projeto e fabrico de um equipamento deverá assentar numa cuidada análise dos requisitos do mesmo, que foram estipulados no Subcapítulo 3.1.2, de acordo com os objetivos definidos para este trabalho nos Capítulos 1.2 e Subcapítulo 3.1.1. A Tabela 34 traduz a análise ao cumprimento dos objetivos e requisitos propostos neste trabalho.

Tabela 34 - Análise ao cumprimento dos objetivos e requisitos propostos

Objetivo/Requisito	Conclusões	Análise
Compatibilidade com a MTS e fácil fixação à mesma	Durante o processo de fixação do equipamento na MTS, verificou-se que as soluções projetadas para a ligação à MTS foram as ideais para o modelo da MTS utilizada neste trabalho. Este processo de fixação à MTS é simples e relativamente rápido.	✓
Configuração simples e compacta	Durante o processo de montagem e manuseamento do equipamento, verificou-se que num modo geral este cumpre os objetivos propostos neste aspeto.	✓
Versátil, prático e intuitivo		
Fácil montagem e configuração do equipamento		
Bom acabamento superficial e promover o aumento da vida útil do equipamento	O processo de fabrico dos diferentes componentes promoveu um bom acabamento superficial dos mesmos. O tratamento de superfície estabilizou a mesma e promoveu a proteção do aço à ocorrência de ferrugem e o aumento da vida útil do equipamento. A cuidada geometria de cada componente não normalizado, através da criação de chanfros e raios, não permite a danificação dos provetes de ensaio durante a realização de ensaios.	✓
O equipamento não deverá marcar o provete de ensaio durante os ensaios		
Criação de superfícies com raio de curvatura superior nas duas vigas de suporte/bloqueio do provete de ensaio		
Utilização de pinos calibrados para eliminar o atrito	Os pinos calibrados seleccionados durante o projeto deste equipamento, permitiram minimizar o atrito durante a montagem e desmontagem dos mesmos. A utilização destes pinos permitiu uma fixação rápida e fácil, ainda que se tenha verificado alguma dificuldade no manuseamento dos mesmos, devido a possíveis falhas na tolerância dos furos nos quais os pinos são inseridos.	✓
Utilização de pinos que promovam a rápida montagem e desmontagem		
Aplicação de pinos calibrados de bloqueio com esferas de autobloqueio		
Peças fabricadas em aço de alto limite elástico para garantir elevada resistência	O aço PM300 apresenta excelentes propriedades que garantem a elevada resistência dos componentes fabricados e, conseqüentemente, do equipamento.	✓
Componentes de ligação, fixação ou orientação com elevada resistência	Os componentes normalizados, tais como pinos calibrados, parafusos e porcas, apresentam propriedades que garantem a elevada resistência dos mesmos.	✓
Medição do valor de $P$ aplicado	Durante cada ensaio foi registada a medição do valor de $P$ aplicado, através de um computador ligado à MTS. Esta medição permite ainda obter os valores de $P_I$ e $P_{II}$ , após aplicação do modelo de redução de dados utilizado neste trabalho.	✓

Objetivo/Requisito	Conclusões	Análise
Dimensionamento do equipamento por MEF para otimização da rigidez	A evolução da solução inicial até à solução final do projeto do equipamento mostra que, através do dimensionamento e otimização por MEF, foi possível obter uma solução em que a tensão máxima de von Mises é inferior à tensão de cedência do material, o que confirma a otimização da rigidez. Durante as simulações por MEF, verificou-se a capacidade para uma carga máxima de 20 kN, ainda que majorada. Deste modo, pode-se afirmar que este equipamento é adequado para provetes de ensaio de elevada rigidez.	✓
Permitir uma carga máxima de 20 kN		
Adequado para provetes de ensaio de elevada rigidez		
Carregamentos em modo puro I, puro II e misto I+II	Devido à configuração simples e compacta do equipamento, este permite efetuar carregamentos em modo puro I, puro II e diferentes combinações do modo misto I+II. Apesar de ter sido efetuado um número relativamente reduzido de ensaios, verificou-se a possibilidade de uma fácil variação do rácio de modo misto, durante a realização dos mesmos.	✓
Variação do rácio de modo misto sem limitações numa ampla gama do envelope de fratura		
Medição dos valores de $\delta$ de cada aderente do provete de ensaio, sem a necessidade de medição do valor de $\alpha$	Neste trabalho não foi possível estudar a viabilidade destes requisitos, uma vez que o sistema LVDT não foi adquirido. Deste modo, os ensaios foram realizados com o apoio de ferramentas que permitiram a medição do valor de $\alpha$ , e apenas com recurso aos pinos calibrados de bloqueio.	✗
Medição dos valores de $\delta$ através do sistema LVDT		
Utilização de extratores de cabeça cilíndrica facejada		
Melhoria dos suportes LVDT	A principal alteração efetuada para a melhoria dos suportes LVDT, consistiu no fabrico dos suportes em aço PM300, o que permitiu uma maior resistência e estabilidade dos mesmos.	✓
Realização de ensaios com aderentes em aço, diferentes adesivos e espessuras	Apesar de ter sido efetuado um número relativamente reduzido de ensaios, estes tiveram foco na utilização de aderentes em aço e de um adesivo frágil, o que ainda não tinha sido considerado em estudos anteriores.	✓
Aumento do comprimento da viga horizontal superior com catorze furos	Esta alteração promove o uso de diferentes dimensões dos provetes de ensaio, embora se tenha verificado que este comprimento pode dificultar o manuseamento do equipamento durante a montagem das diferentes configurações de ensaio.	✓
Determinação do valor de $G_c$ em diversas combinações de modo misto	Neste trabalho não foi possível efetuar a determinação do valor de $G_c$ , uma vez que os resultados obtidos não indicam valores exequíveis.	✗

Neste trabalho pode-se admitir que os objetivos referentes ao projeto, modelação numérica e fabrico do equipamento foram concluídos com sucesso. Por outro lado, os objetivos referentes à validação experimental do equipamento não tiveram o sucesso pretendido. Os ensaios foram realizados e posteriormente foi efetuado um tratamento de dados que não indicaram valores favoráveis, pelo não se conseguiu obter resultados exequíveis para apresentação sob a forma de curvas- $R$  e envelopes de fratura.

O equipamento desenvolvido apresenta um fácil manuseamento durante a realização de ensaios e características melhoradas ao nível da sua geometria, apesar de robusta. Este equipamento é adequado para provetes de ensaio de elevada rigidez, pelo que permite uma carga máxima de 20 kN. De um modo geral, pode-se considerar que o equipamento MMB desenvolvido neste trabalho representa uma melhoria do equipamento de base de estudo, desenvolvido por Chaves [1].

## 4.2 Propostas de trabalhos futuros

Como propostas de trabalhos futuros apresentam-se as seguintes:



**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] Chaves, F.J.P., *Fracture mechanics applied to the design of adhesively bonded joints*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Mecânica, FEUP, 2013.
- [2] Da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media.
- [3] Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005: Elsevier.
- [4] Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2007: McGraw-Hill Education.
- [5] da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, e M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Vol. Edições Técnicas. 2007, Porto: Publindústria.
- [6] Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Mecânica, FEUP, 2007.
- [7] De Moura, M.F.S.F., A.G. De Magalhães, e A.B. De Moraes, *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Vol. Edições Técnicas. 2005, Porto: Publindústria.
- [8] Packham, D., *In Handbook of adhesion second edition*. 2005: Wiley Online Library.
- [9] Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
- [10] Harris, J.A. e R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
- [11] Curiel Sosa, J.L. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
- [12] Ramalho, L., R. Campilho, J. Belinha, e L. da Silva, *Static strength prediction of adhesive joints: A review*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **96**: p. 102451.
- [13] Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
- [14] Campilho, R.D., *Strength prediction of adhesively-bonded joints*. 2017: CRC Press.
- [15] Zhao, B., Z.-H. Lu, e Y.-N. Lu, *Two-dimensional analytical solution of elastic stresses for balanced single-lap joints—Variational method*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2014. **49**: p. 115-126.

- [16] Yousefsani, S.A. e M. Tahani, *Accurate determination of stress distributions in adhesively bonded homogeneous and heterogeneous double-lap joints*. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2013. **39**: p. 197-208.
- [17] Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
- [18] Panigrahi, S.K. e B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2007. **26**(2): p. 183-201.
- [19] Ozel, A., B. Yazici, S. Akpınar, M.D. Aydın, e Ş. Temiz, *A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends*. *Composites Part B: Engineering*, 2014. **62**: p. 167-174.
- [20] Gültekin, K., S. Akpınar, A. Özel, e G.A. Öner, *Effects of unbalance on the adhesively bonded composites-aluminium joints*. *The Journal of Adhesion*, 2017. **93**(9): p. 674-687.
- [21] Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
- [22] Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1991. **11**(4): p. 221-227.
- [23] Doitrand, A. e D. Leguillon, *Comparison between 2D and 3D applications of the coupled criterion to crack initiation prediction in scarf adhesive joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018. **85**: p. 69-76.
- [24] Le Pavic, J., G. Stamoulis, T. Bonnemains, D. Da Silva, e D. Thévenet, *Fast failure prediction of adhesively bonded structures using a coupled stress-energetic failure criterion*. *Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures*, 2019. **42**(3): p. 627-639.
- [25] Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1959. **23**(3): p. 622-636.
- [26] Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960. **8**(2): p. 100-104.
- [27] Duan, K., X. Hu, e Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2004. **18**(1): p. 39-53.
- [28] da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.
- [29] Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, e S.-S. Pang, *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. *International Journal of Solids and Structures*, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
- [30] Turon, A., J. Costa, P.P. Camanho, e C.G. Dávila, *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.

- [31] Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
- [32] Yang, Q.D. e M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
- [33] Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, e R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
- [34] Stuparu, F.A., D.A. Apostol, D.M. Constantinescu, C.R. Picu, M. Sandu, e S. Sorohan, *Local evaluation of adhesive failure in similar and dissimilar single-lap joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2017. **183**: p. 39-52.
- [35] Floros, I., K. Tserpes, e T. Löbel, *Mode-I, mode-II and mixed-mode I+ II fracture behavior of composite bonded joints: Experimental characterization and numerical simulation*. Composites Part B: Engineering, 2015. **78**: p. 459-468.
- [36] Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
- [37] Alfano, G. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
- [38] Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
- [39] Chen, J., *Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
- [40] Pinto, A.M.G., A.G. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, e A.P.M. Baptista, *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
- [41] Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
- [42] Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
- [43] de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10-11): p. 2224-2230.
- [44] de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.

- [45] Carlberger, T. e U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
- [46] Jung Lee, M., T. Min Cho, W. Seock Kim, B. Chai Lee, e J. Ju Lee, *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
- [47] Zhu, Y., K.M. Liechti, e K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
- [48] Pandya, K.C. e J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
- [49] Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, A.M.G. Pinto, J.J.L. Morais, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
- [50] Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1–4): p. 547-555.
- [51] Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, e I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
- [52] Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
- [53] Raghavan, P. e S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
- [54] Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, e S.J. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
- [55] Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, e M. Kimoto, *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
- [56] Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, e A.D. Crocombe, *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
- [57] Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
- [58] Kim, M.-H. e H.-S. Hong, *An adaptation of mixed-mode I+ II continuum damage model for prediction of fracture characteristics in adhesively bonded joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018. **80**: p. 87-103.
- [59] Riccio, A., R. Ricchiuto, F. Di Caprio, A. Sellitto, e A. Raimondo, *Numerical investigation of constitutive material models on bonded joints in scarf repaired composite laminates*. Engineering Fracture Mechanics, 2017. **173**: p. 91-106.

- [60] Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.
- [61] Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
- [62] Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
- [63] Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, e L.F.M.d. Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
- [64] Fernandes, T.A., R.D. Campilho, M.D. Banea, e L.F. da Silva, *Adhesive selection for single lap bonded joints: experimentation and advanced techniques for strength prediction*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**(10-11): p. 841-862.
- [65] Stein, N., S. Dölling, K. Chalkiadaki, W. Becker, e P. Weißgraeber, *Enhanced XFEM for crack deflection in multi-material joints*. International Journal of Fracture, 2017. **207**(2): p. 193-210.
- [66] Dillard, D.A., A.V. Pocius, e M. Chaudhury, *Adhesion science and engineering*. 2002: Elsevier.
- [67] Da Silva, L.F., D.A. Dillard, B. Blackman, e R.D. Adams, *Testing adhesive joints: best practices*. 2012: John Wiley & Sons.
- [68] ASTM D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [69] ISO 25217-09, *Adhesives — Determination of the mode 1 adhesive fracture energy of structural adhesive joints using double cantilever beam and tapered double cantilever beam specimens*. 2009: ISO, 2009.
- [70] Gustafson, P.A. e A.M. Waas, *The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(10): p. 2201-2215.
- [71] Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13-14): p. 2065-2077.
- [72] Da Silva, L., V. Esteves, e F. Chaves, *Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings*. Wiley, 2011. **42**(5): p. 460-470.
- [73] Xiao, F., C.-Y. Hui, e E. Kramer, *Analysis of a mixed mode fracture specimen: the asymmetric double cantilever beam*. Journal of Materials Science, 1993. **28**(20): p. 5620-5629.
- [74] Creton, C., E.J. Kramer, C.Y. Hui, e H.R. Brown, *Failure mechanisms of polymer interfaces reinforced with block copolymers*. Macromolecules, 1992. **25**(12): p. 3075-3088.
- [75] Kanninen, M., *An augmented double cantilever beam model for studying crack propagation and arrest*. International Journal of Fracture, 1973. **9**(1): p. 83-92.

- [76] Park, S. e D.A. Dillard, *Development of a simple mixed-mode fracture test and the resulting fracture energy envelope for an adhesive bond*. International Journal of Fracture, 2007. **148**(3): p. 261-271.
- [77] Williams, J., *On the calculation of energy release rates for cracked laminates*. International Journal of Fracture, 1988. **36**(2): p. 101-119.
- [78] Kinloch, A., Y. Wang, J. Williams, e P. Yayla, *The mixed-mode delamination of fibre composite materials*. Composites Science and Technology, 1993. **47**(3): p. 225-237.
- [79] Hong, C.S. e S. Yoon, *Modified end notched flexure specimen for mixed mode interlaminar fracture in laminated composites*. International Journal of Fracture, 1990. **43**: p. R3-R9.
- [80] Szekrényes, A. e J. Uj, *Beam and finite element analysis of quasi-unidirectional composite SLB and ELS specimens*. Composites Science and Technology, 2004. **64**(15): p. 2393-2406.
- [81] Crews Jr, J.H. e J.R. Reeder, *A mixed-mode bending apparatus for delamination testing*. Vol. Langley Research Center. 1988, Hampton, Virginia: National Aeronautics and Space Administration.
- [82] Reeder, J.R. e J.H. Crews Jr, *Mixed-mode bending method for delamination testing*. AIAA Journal, 1990. **28**(7): p. 1270-1276.
- [83] Reeder, J.R., *Refinements to the mixed-mode bending test for delamination toughness*. Journal of Composites, Technology and Research, 2003. **25**(4): p. 1-5.
- [84] Ducept, F., D. Gamby, e P. Davies, *A mixed-mode failure criterion derived from tests on symmetric and asymmetric specimens*. Composites Science and Technology, 1999. **59**(4): p. 609-619.
- [85] Naghipour, P., J. Schneider, M. Bartsch, J. Hausmann, e H. Voggenreiter, *Fracture simulation of CFRP laminates in mixed mode bending*. Engineering Fracture Mechanics, 2009. **76**(18): p. 2821-2833.
- [86] Shahverdi, M., A.P. Vassilopoulos, e T. Keller, *Mixed-Mode I/II fracture behavior of asymmetric adhesively-bonded pultruded composite joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2014. **115**: p. 43-59.
- [87] Plagianakos, T.S., K. Muñoz, G. Guillamet, V. Prentzias, A. Quintanas-Corominas, M. Jimenez, e E. Karachalios, *Assessment of CNT-doping and hot-wet storage aging effects on Mode I, II and I/II interlaminar fracture toughness of a UD Graphite/Epoxy material system*. Engineering Fracture Mechanics, 2020. **224**: p. 106761.
- [88] Daneshjoo, Z., M.M. Shokrieh, M. Fakoor, R. Alderliesten, e D. Zarouchas, *Physics of delamination onset in unidirectional composite laminates under mixed-mode I/II loading*. Engineering Fracture Mechanics, 2019. **211**: p. 82-98.
- [89] Ducept, F., P. Davies, e D. Gamby, *Mixed mode failure criteria for a glass/epoxy composite and an adhesively bonded composite/composite joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2000. **20**(3): p. 233-244.
- [90] Ducept, F., P. Davies, e D. Gamby, *An experimental study to validate tests used to determine mixed mode failure criteria of glass/epoxy composites*. Composites Part A: Applied Science Manufacturing, 1997. **28**(8): p. 719-729.

- [91] Benzeggagh, M.L. e M. Kenane, *Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus*. Composites science technology, 1996. **56**(4): p. 439-449.
- [92] Kim, B.W. e A.H. Mayer, *Influence of fiber direction and mixed-mode ratio on delamination fracture toughness of carbon/epoxy laminates*. Composites Science Technology, 2003. **63**(5): p. 695-713.
- [93] Dharmawan, F., G. Simpson, I. Herszberg, e S. John, *Mixed mode fracture toughness of GFRP composites*. Composite Structures, 2006. **75**(1-4): p. 328-338.
- [94] Salem, N.B., J. Jumel, M. Budzik, M. Shanahan, e F. Lavelle, *Analytical and experimental investigations of crack propagation in adhesively bonded joints with the Mixed Mode Bending (MMB) test Part II: Investigation of cohesive stresses distribution with backface strain monitoring*. Theoretical Applied Fracture Mechanics, 2014. **74**: p. 222-232.
- [95] Salem, N.B., J. Jumel, M.K. Budzik, M. Shanahan, e F. Lavelle, *Analytical and experimental investigations of crack propagation in adhesively bonded joints with the Mixed Mode Bending (MMB) test Part I: Macroscopic analysis & Digital Image Correlation measurements*. Theoretical Applied Fracture Mechanics, 2014. **74**: p. 209-221.
- [96] Akterskaia, M., P.P. Camanho, E. Jansen, A. Arteiro, e R. Rolfes, *Progressive delamination analysis through two-way global-local coupling approach preserving energy dissipation for single-mode and mixed-mode loading*. Composite Structures, 2019. **223**: p. 110892.
- [97] Gong, Y., B. Zhang, L. Zhao, J. Zhang, N. Hu, e C. Zhang, *R-curve behaviour of the mixed-mode I/II delamination in carbon/epoxy laminates with unidirectional and multidirectional interfaces*. Composite Structures, 2019. **223**: p. 110949.
- [98] Gong, Y., L. Zhao, J. Zhang, N. Hu, e C. Zhang, *Development of a standardized test procedure and an improved data reduction method for the mixed-mode I/II delamination in composite laminates*. Composites Science Technology, 2021. **201**: p. 108488.
- [99] Ozdil, F. e L. Carlsson, *Beam analysis of angle-ply laminate mixed-mode bending specimens*. Composites Science Technology, 1999. **59**(6): p. 937-945.
- [100] Shindo, Y., D. Shinohe, S. Kumagai, e K. Horiguchi, *Analysis and testing of mixed-mode interlaminar fracture behavior of glass-cloth/epoxy laminates at cryogenic temperatures*. JOURNAL OF ENGINEERING MATERIALS AND TECHNOLOGY, 2005. **127**.
- [101] Pereira, A. e A. De Morais, *Mixed mode I+ II interlaminar fracture of glass/epoxy multidirectional laminates—Part 2: Experiments*. Composites science technology, 2006. **66**(13): p. 1896-1902.
- [102] De Morais, A. e A. Pereira, *Mixed mode I+ II interlaminar fracture of glass/epoxy multidirectional laminates—Part 1: Analysis*. Composites science technology, 2006. **66**(13): p. 1889-1895.
- [103] Anh, P.N., M. Stéphane, C. Myriam, e C. Jean-Luc, *R-curve on fracture criteria for mixed-mode in crack propagation in quasi-brittle material: application for wood*. Procedia Materials Science, 2014. **3**: p. 973-978.

- [104] De Moura, M., J. Oliveira, J. Morais, e J. Xavier, *Mixed-mode I/II wood fracture characterization using the mixed-mode bending test*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(1): p. 144-152.
- [105] De Moura, M., J. Oliveira, J. Morais, e N. Dourado, *Mixed-mode (I+ II) fracture characterization of wood bonded joints*. Construction Building Materials, 2011. **25**(4): p. 1956-1962.
- [106] Droubi, M.G., J. McAfee, R.C. Horne, S. Walker, C. Klaassen, A. Crawford, A.K. Prathuru, e N.H. Faisal, *Mixed-mode fracture characteristics of metal-to-metal adhesively bonded joints: experimental and simulation methods*. Procedia Structural Integrity, 2017. **5**: p. 40-47.
- [107] Liu, Z., R. Gibson, e G. Newaz, *The use of a modified mixed mode bending test for characterization of mixed-mode fracture behavior of adhesively bonded metal joints*. The Journal of Adhesion, 2002. **78**(3): p. 223-244.
- [108] Quispitupa, A., C. Berggreen, e L.A. Carlsson, *On the analysis of a mixed mode bending sandwich specimen for debond fracture characterization*. Engineering Fracture Mechanics, 2009. **76**(4): p. 594-613.
- [109] Arouche, M.M., W. Wang, S. Teixeira de Freitas, e S. de Barros, *Strain-based methodology for mixed-mode I+ II fracture: A new partitioning method for bi-material adhesively bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2019. **95**(5-7): p. 385-404.
- [110] Arouche, M.M., S.T. de Freitas, e S. de Barros, *On the influence of glass fiber mat on the mixed-mode fracture of composite-to-metal bonded joints*. Composite Structures, 2021. **256**: p. 113109.
- [111] Stamoulis, G. e N. Carrere, *Investigating the influence of material non-linearity in the fracture properties of ductile adhesives submitted to mixed-mode loading*. Engineering Fracture Mechanics, 2017. **179**: p. 260-271.
- [112] Stamoulis, G. e N. Carrère, *Linear elastic analysis of the loading rate dependency of the fracture properties of structural adhesives in the mixed mode I+ II plane*. Engineering Fracture Mechanics, 2020. **225**: p. 106840.
- [113] Pereira, F., M. de Moura, N. Dourado, J. Morais, F. Silva, e M. Dias, *Bone fracture characterization under mixed-mode I+ II loading using the MMB test*. Engineering Fracture Mechanics, 2016. **166**: p. 151-163.
- [114] ASTM D6671/D6671M-06, *Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites*. 2006: ASTM International, West Conshohocken, 2006.
- [115] Reeder, J.R. e J. Crews Jr, *Nonlinear analysis and redesign of the mixed-mode bending delamination test*. Vol. NASA TECHNICAL MEMORANDUM. 1991, Hampton, Virginia: National Aeronautics and Space Administration.
- [116] Reeder, J., *An evaluation of mixed-mode delamination failure criteria*. Vol. Langley Research Center. 1992, Hampton, Virginia: National Aeronautics and Space Administration.
- [117] Fernlund, G. e J. Spelt, *Mixed-mode fracture characterization of adhesive joints*. Composites science technology, 1994. **50**(4): p. 441-449.

- [118] Chen, J., R. Sernow, E. Schulz, e G. Hinrichsen, *A modification of the mixed-mode bending test apparatus*. Composites Part A: applied science manufacturing, 1999. **30**(7): p. 871-877.
- [119] Bhashyam, S. e B.D. Davidson, *Evaluation of Data Reduction Methods*. AIAA journal, 1997. **35**(3): p. 546-552.
- [120] Martin, R.H. e P.L. Hansen, *Experimental compliance calibration for the mixed-mode bending (MMB) specimen*, in *Composite Materials: Fatigue and Fracture (Sixth Volume)*. 1997, ASTM International.
- [121] Oliveira, J., M. De Moura, M. Silva, e J. Morais, *Numerical analysis of the MMB test for mixed-mode I/II wood fracture*. Composites science technology, 2007. **67**(9): p. 1764-1771.
- [122] Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
- [123] Campilho, R.D.S.G., D.C. Moura, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.
- [124] Li, G., G. Ji, e O. Zhenyu, *Adhesively bonded healable composite joint*. International journal of adhesion and adhesives, 2012. **35**: p. 59-67.
- [125] Dias, G., M. De Moura, J. Chousal, e J. Xavier, *Cohesive laws of composite bonded joints under mode I loading*. Composite Structures, 2013. **106**: p. 646-652.
- [126] Campilho, R.D.S.G., D.C. Moura, D.J.S. Gonçalves, J.F.M.G. da Silva, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites*. Composites Part B: Engineering, 2013. **50**: p. 120-126.
- [127] Stigh, U., K.S. Alfredsson, e A. Biel. *Measurement of cohesive laws and related problems*. in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2009.
- [128] Alfredsson, K.S., *On the determination of constitutive properties of adhesive layers loaded in shear—an inverse solution*. International Journal of Fracture, 2003. **123**(1): p. 49-62.
- [129] Alfredsson, K.S., *On the instantaneous energy release rate of the end-notch flexure adhesive joint specimen*. International Journal of Solids Structures, 2004. **41**(16-17): p. 4787-4807.
- [130] Leffler, K., K.S. Alfredsson, e U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(2): p. 530-545.
- [131] Högberg, J.L. e K. Salomonsson. *Simulation of an adhesive layer using a novel mixed mode cohesive law*. in *Conference on Damage in Composite Materials 2006 18th-19th of September 2006 in Stuttgart, Germany*. 2006. Citeseer.
- [132] Sørensen, B.F., K. Jørgensen, T.K. Jacobsen, e R.C. Østergaard, *DCB-specimen loaded with uneven bending moments*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 163-176.

- [133] Högberg, J.L., B.F. Sørensen, e U. Stigh, *Constitutive behaviour of mixed mode loaded adhesive layer*. International Journal of Solids Structures, 2007. **44**(25-26): p. 8335-8354.
- [134] Alfredsson, K. e J.L. Högberg, *Energy release rate and mode-mixity of adhesive joint specimens*. International Journal of Fracture, 2007. **144**(4): p. 267-283.
- [135] Lélias, G., E. Paroissien, F. Lachaud, e J. Morlier, *Experimental characterization of cohesive zone models for thin adhesive layers loaded in mode I, mode II, and mixed-mode I/II by the use of a direct method*. International Journal of Solids Structures, 2019. **158**: p. 90-115.
- [136] Sarrado, C., A. Turon, J. Renart, e J. Costa, *An experimental data reduction method for the Mixed Mode Bending test based on the J-integral approach*. Composites Science Technology, 2015. **117**: p. 85-91.
- [137] Shindo, Y., F. Narita, S. Takahashi, T. Sato, e T. Takeda, *Analysis of mixed-mode interlaminar fracture and damage behavior of GFRP woven laminates at cryogenic temperatures*. Cryogenics, 2009. **49**(2): p. 80-83.
- [138] Sarrado, C., A. Turon, J. Renart, e I. Urresti, *Assessment of energy dissipation during mixed-mode delamination growth using cohesive zone models*. Composites Part A: Applied Science Manufacturing, 2012. **43**(11): p. 2128-2136.
- [139] Pérez-Galmés, M., J. Renart, C. Sarrado, A. Brunner, e A. Rodríguez-Bellido, *Towards a consensus on mode II adhesive fracture testing: Experimental study*. Theoretical Applied Fracture Mechanics, 2018. **98**: p. 210-219.
- [140] Sadeghi, M., J. Zimmermann, A. Gabener, e K. Schröder, *On the bondline thickness effect in mixed-mode fracture characterisation of an epoxy adhesive*. The Journal of Adhesion, 2021. **97**(3): p. 282-304.
- [141] Höwer, D., K.C. Jois, B. Stier, B.A. Bednarczyk, E.J. Pineda, S. Reese, e J.-W. Simon, *Experimental and numerical investigation of the mixed mode delamination of monolithic laminates exhibiting severe fiber bridging*. Composite Structures, 2020. **242**: p. 112035.
- [142] Morais, J.S., *Desenho Técnico Básico - 3*. 2012: PORTO EDITORA.

# ANEXOS

6.1 ANEXO1

6.2 ANEXO2

6.3 ANEXO3



## 6 ANEXOS

### 6.1 ANEXO1

FICHA TÉCNICA DO AÇO PM300

FICHA TÉCNICA DO ADESIVO ARALDITE® AV 138/HV 998

### 6.2 ANEXO2

DESENHOS DO EQUIPAMENTO

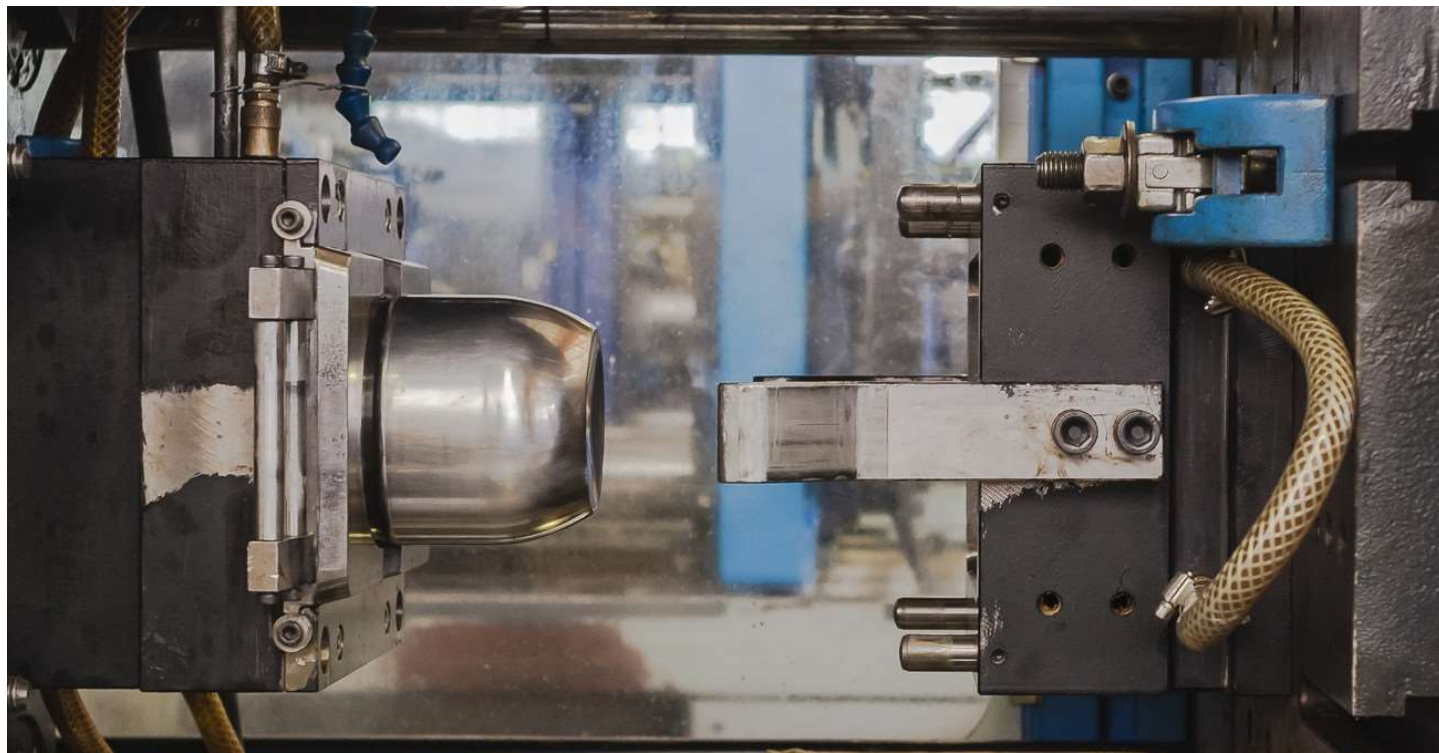
DESENHOS DE FABRICO DOS COMPONENTES PROJETADOS

OUTROS DESENHOS DE FABRICO

### 6.3 ANEXO3

FICHAS TÉCNICAS DOS COMPONENTES NORMALIZADOS

# PM300 - Uddeholm Impax Supreme



## DESCRIÇÃO

Aço superior, pré-tratado para moldes de injeção de plásticos, com boa capacidade de polimento e texturização. Com uma extensa gama de dimensões, possui uma homogeneidade de durezas mesmo nas dimensões maiores.

## ESTADO DE FORNECIMENTO

Tratado

## APLICAÇÕES PRINCIPAIS

Moldes para Injeção de plásticos  
 Moldes de sopro de plásticos  
 Matrizes para extrusão de plásticos  
 Peças de estrutura  
 Componentes de Máquinas

## DUREZA DE FORNECIMENTO

MIN: 290 HB  
 MED: -  
 MAX: 330 HB

COMPOSIÇÃO

SERVIÇOS

TRATAMENTOS TÉRMICOS

DOWNLOAD

## NORMAS

W.NR.: (1.2738)

FORNECIMENTO: EN ISO 4957

EN: (40 CrMnNiMo 8-6-4)

## PERFIS DISPONÍVEIS

	Espeçura	Tolerância
Redondo	20,5 - 700 mm	
Rectangular	Sob Consulta	.

AISI: (P20)

**COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) 1**

	Min	Med	Max
<b>C</b>	<b>0,35</b>		<b>0,45</b>
<b>Si</b>	<b>0,20</b>		<b>0,40</b>
<b>Mn</b>	<b>1,25</b>		<b>1,60</b>
<b>P</b>			<b>0,030</b>
<b>S</b>			<b>0,010</b>
<b>Cr</b>	<b>1,80</b>		<b>2,10</b>
<b>Mo</b>	<b>0,10</b>		<b>0,33</b>
<b>Ni</b>	<b>0,85</b>		<b>1,20</b>

**PROPRIEDADES FÍSICAS**

Densidade : 7,80

Coeficiente de Dilatação Térmica, 10<sup>-6</sup>m/mK

20 a 100 °C	20 a 200 °C	20 a 300 °C	20 a 400 °C	20 a 500 °C	20 a 600 °C	20 a 700 °C
---	12,7	---	---	---	---	---

Condutibilidade Térmica, W/mK

20 °C	200 °C	300 °C	350 °C	400 °C	600°C	700 °C
28	---	---	---	---	---	---

## Módulo de Elasticidade, GPa

-100 °C	0 °C	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
---	---	205	---	200	---	---	---	---

## PROPRIEDADES MECÂNICAS

Estado	Ø	Espessura	Propriedades Mecânicas						
			Dureza	Rm	Rp0,2	ReH	A	Z	RC
Temperado e Revenido	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Estirado (+C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Torneado (+SH)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N/A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Temperado e Revenido	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Estirado (+C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Torneado (+SH)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N/A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Temperado e Revenido	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Estirado (+C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Torneado (+SH)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N/A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Temperado e Revenido	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<b>Estirado (+C)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Torneado (+SH)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>N/A</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Temperado e Revenido</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Estirado (+C)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Torneado (+SH)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>N/A</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Temperado e Revenido</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Estirado (+C)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Torneado (+SH)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>N/A</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**NOTAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

O valor da Dureza faz parte da especificação do material.

Atualizado em: 11.12.2017



## UDDEHOLM IMPAX SUPREME

Uddeholm Impax Supreme is a premium prehardened mould steel with very good polishing and texturing properties.

Uddeholm Impax Supreme is available in a very wide dimensional range, where even the largest dimensions show a very uniform hardness profile all through the cross section.

The delivery hardness of ~310 HB, makes the steel suitable for a many different applications like:

- Moulds for plastic injection moulding
- Moulds for blow moulding
- Dies for plastic extrusion
- General constructional parts, like machine components requiring improved fatigue strength and reliability

This information is based on our present state of knowledge and is intended to provide general notes on our products and their uses. It should not therefore be construed as a warranty of specific properties of the products described or a warranty for fitness for a particular purpose.

Classified according to EU Directive 1999/45/EC  
For further information see our "Material Safety Data Sheets".

Edition 7, 09.2011

The latest revised edition of this brochure is the English version, which is always published on our web site [www.uddeholm.com](http://www.uddeholm.com)



SS-EN ISO 9001  
SS-EN ISO 14001

## General

Uddeholm Impax Supreme is a premium-quality vacuum-degassed Cr-Ni-Mo-alloyed steel which is supplied in the hardened and tempered condition, offering the following benefits:

- No hardening risks
- No hardening costs
- Time saving, e.g. no waiting for heat treatment
- Lower tool cost (e.g. no distortion to rectify)
- Modifications easily carried out
- Can be subsequently nitrided to increase surface wear resistance or locally flame hardened to reduce surface damage

Uddeholm Impax Supreme is manufactured to consistently high quality standards with a very low sulphur content, giving a steel with the following characteristics:

- Good polishing and photo-etching properties
- Good machinability
- High purity and good homogeneity
- Uniform hardness

*Note: Uddeholm Impax Supreme is 100% ultrasonic tested.*

Heavier sections are supplied premachined which offers the following advantages compared with un-machined material:

- Saving of weight
- Non-decarburized surface
- Exact nominal size (plus tolerance)
- Less machining
- Absence of scale minimizes machine and tool wear

Approx. analysis %	C 0.37	Si 0.3	Mn 1.4	Cr 2.0	Ni 1.0	Mo 0.2
Standard spec.	AISI P20 modified					
Delivery condition	Hardened and tempered to 290–330 HB					
Colour code	Yellow/green					

## Applications

- Injection moulds for thermoplastics
- Extrusion dies for thermoplastics
- Blow moulds
- Forming tools, press-brake dies (possibly flame hardened or nitrided)
- Aluminium die casting prototype dies
- Structural components, shafts

## Properties

### Physical data

Hardened and tempered to 310 HB.

Temperature	20°C (68°F)	200°C (390°F)
Density, kg/m <sup>3</sup> lbs/in <sup>3</sup>	7 800 0.282	7 750 0.280
Coefficient of thermal expansion per °C from 20° per °F from 68°F	– –	12.7 × 10 <sup>-6</sup> 7.0 × 10 <sup>-6</sup>
Thermal conductivity W/m °C Btu in/ft <sup>2</sup> h °F	–	28 194
Modulus of elasticity N/mm <sup>2</sup> tsi psi	205 000 13 280 29.7 × 10 <sup>6</sup>	200 000 12 960 29.0 × 10 <sup>6</sup>
Specific heat capacity J/kg °C Btu/lb °F	460 0.110	– –

### Mechanical properties

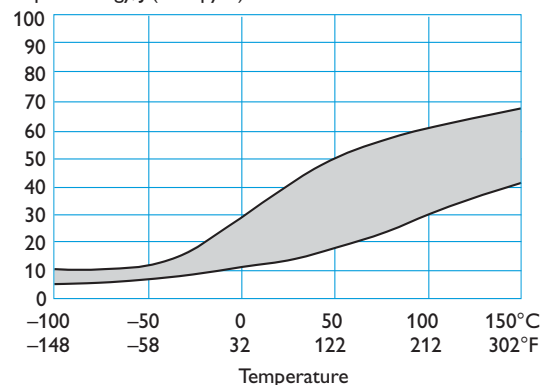
Impact strength, tensile strength and the compressive strength depends on the hardness in the delivered condition.

#### IMPACT STRENGTH

The energy absorption at impact testing depends on the test material (bar size and delivered hardness), testing temperature and the specimen (type, location, and orientation in the bar).

The graph below shows how the impact energy changes as a function of the test temperature and hardness variation within the delivery hardness range.

Impact energy, J (Charpy V)



## TENSILE STRENGTH

Approx. values. Samples were taken from a flat bar, 90 x 300 mm (3.5" x 11.8").

Hardness: 325 HB.

Testing temperature	20°C (68°F)	200°C (390°F)
Ultimate tensile strength $R_m$ N/mm <sup>2</sup>	1020	930
Yield strength $R_{p0.2}$ N/mm <sup>2</sup>	900	800

## COMPRESSIVE STRENGTH

Compressive yield strength $R_{c0.2}$ N/mm <sup>2</sup>	850–1000
---	----------

## Heat treatment

Uddeholm Impax Supreme is intended for use in the hardened and tempered condition, i.e. the delivery condition.

When, however, the steel is to be heat treated to a higher hardness or case hardened, the following instructions may be helpful.

### Soft annealing

Protect the steel and heat through to 700°C (1300°F). Then cool in the furnace at 10°C (50°F) per hour to 600°C (1110°F), then freely in air.

### Stress relieving

After rough machining the tool should be heated through to 550°C (1020°F), holding time 2 hours. Cool slowly to room temperature.

### Hardening

*Note:* The steel should be fully soft annealed before hardening.

*Preheating temperature:* 500–600°C (930–1110°F).

*Austenitizing temperature:* 850°C (1560°F).

The steel should be heated through to the austenitizing temperature and held at temperature for 30 minutes.

*Protect the tool against decarburization and oxidation during the hardening process.*

## Quenching media

- High speed gas/circulating atmosphere (Only suitable for small dimensions)
- Oil (60–80°C/140–175°F)
- Martempering bath 300°C (570°F) max. 4 minutes, then air

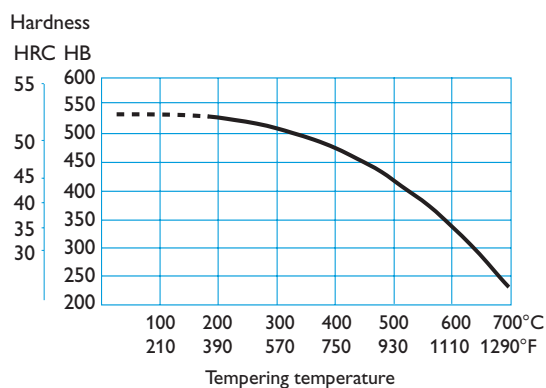
*Note:* Temper immediately tool reaches 50–70°C (120–160°F).

## Tempering

Choose the tempering temperature according to the hardness required by reference to the tempering graph. Temper twice with intermediate cooling to room temperature. Lowest tempering temperature 180°C (360°F) for small inserts, but preferred minimum is 250°C (480°F). Holding time at temperature minimum 2 hours.

### TEMPERING GRAPH

The diagram is valid for small samples 15 x 15 x 40 mm (0.6 x 0.6 x 1.6 in.) austenitized 30 min. at 850°C (1560°F), quenched in air and tempered 2 + 2 hours.



## Flame and induction hardening

Uddeholm Impax Supreme can be flame or induction hardened to a hardness of approx. 50 HRC. Cooling in air is preferable.

Further information can be obtained from the Uddeholm Technical Services Report "Flame hardening of Uddeholm Impax Supreme".

## Nitriding and nitrocarburizing

Nitriding gives a hard surface which is very resistant to wear and erosion. A nitrided surface also increases the corrosion resistance. For best result the following steps should be followed:

1. Rough machining
2. Stress tempering at 550°C (1020°F)
3. Grinding
4. Nitriding

Following surface hardness and nitriding depths will be achieved after nitriding:

	Temperature		Time h	Surface hardness HV <sub>1</sub>	Depth of case	
	°C	°F			mm	inch
Gas nitriding	525	977	20	650	0.30	0.012
	525	977	30	650	0.35	0.013
Ion-nitriding	480	896	24	700	0.30	0.012
	480	896	48	700	0.40	0.016
Nitrocarburizing	570	1058	2	700	0.10	0.004

## Cutting data recommendations

The cutting data below are to be considered as guiding values which must be adapted to existing local conditions.

More information can be found in our technical information “Cutting data recommendations”.

### Turning

Cutting data parameters	Turning with carbide		Turning with high speed steel
	Rough turning	Fine turning	Fine turning
Cutting speed, (v <sub>c</sub> ) m/min f.p.m.	120–170 394–558	170–220 558–722	15–20 49–66
Feed, (f) mm/r i.p.r.	0.2–0.4 0.008–0.016	0.05–0.2 0.002–0.008	0.05–0.3 0.002–0.012
Depth of cut, (a <sub>p</sub> ) mm inch	2–4 0.08–0.16	0.5–2 0.02–0.08	0.5–3 0.02–0.12
Carbide designation, ISO	P20–P30 Coated carbide	P10 Coated carbide or Cermet	–

## Drilling

### HIGH SPEED STEEL TWIST DRILL

Drill diameter		Cutting speed, (v <sub>c</sub> )		Feed, (f)	
mm	inch	m/min	f.p.m.	mm/r	i.p.r.
–5	–3/16	14–16*	46–52	0.08–0.15	0.003–0.006
5–10	3/16–3/8	14–16*	46–52	0.15–0.25	0.006–0.010
10–15	3/8–5/8	14–16*	46–52	0.25–0.30	0.010–0.012
15–20	5/8–3/4	14–16*	46–52	0.30–0.35	0.012–0.014

\* For coated high speed steel drill v<sub>c</sub> = 24–26 m/min (79–85 f.p.m.)

### CARBIDE DRILL

Cutting data parameters	Type of drill		
	Indexable insert	Solid carbide	Carbide tip <sup>1)</sup>
Cutting speed, (v <sub>c</sub> ) m/min f.p.m.	180–200 600–656	120–150 394–492	60–80 197–262
Feed, (f) mm/r i.p.r.	0.05–0.15 <sup>2)</sup> 0.002–0.006 <sup>2)</sup>	0.08–0.20 <sup>3)</sup> 0.003–0.008 <sup>3)</sup>	0.15–0.25 <sup>4)</sup> 0.006–0.01 <sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Drill with replaceable or brazed carbide tip

<sup>2)</sup> Feed rate for drill diameter 20–40 mm (0.8”–1.6”)

<sup>3)</sup> Feed rate for drill diameter 5–20 mm (0.2”–0.8”)

<sup>4)</sup> Feed rate for drill diameter 10–20 mm (0.4”–0.8”)

## Milling

### FACE AND SQUARE SHOULDER MILLING

Cutting data parameters	Milling with carbide	
	Rough milling	Fine milling
Cutting speed, (v <sub>c</sub> ) m/min f.p.m.	80–150 265–492	150–190 492–623
Feed, (f <sub>z</sub> ) mm/tooth inch/tooth	0.2–0.4 0.008–0.016	0.1–0.2 0.004–0.008
Depth of cut, (a <sub>p</sub> ) mm inch	2–4 0.08–0.16	–2 –0.08
Carbide designation ISO	P20–P40 Coated carbide	P10–P20 Coated carbide or Cermet

## END MILLING

Cutting data parameters	Milling cutter		
	Solid carbide	Carbide indexable insert	High speed steel
Cutting speed, ( $v_c$ ) m/min f.p.m.	70–110 230–361	80–120 262–394	15–20 <sup>1)</sup> 49–66 <sup>1)</sup>
Feed, ( $f_z$ ) mm/tooth inch/tooth	0.03–0.20 <sup>2)</sup> 0.001–0.008 <sup>2)</sup>	0.08–0.20 <sup>2)</sup> 0.003–0.008 <sup>2)</sup>	0.05–0.35 <sup>2)</sup> 0.002–0.014 <sup>2)</sup>
Carbide designation, ISO	–	P20–P40	–

<sup>1)</sup> For coated high speed steel end mill  $v_c = 35\text{--}40$  m/min (115–131 f.p.m.)

<sup>2)</sup> Depending on radial depth of cut and cutter diameter

## Grinding

A general grinding wheel recommendation is given below. More information can be found in the Uddeholm brochure “Grinding of Tool Steel”.

Type of grinding	Wheel recommendation
Face grinding straight wheel	A 46 HV
Face grinding segments	A 24 GV
Cylindrical grinding	A 60 KV
Internal grinding	A 46 JV
Profile grinding	A 100 KV

## Welding

Good results when welding tool steel can be achieved if proper precautions are taken during welding (elevated working temperature, joint preparation, choice of consumables and welding procedure). If the tool is to be polished or photo-etched, it is necessary to work with an electrode type of matching composition.

Welding method	TIG	MMA (SMAW)
Working temperature	200–250°C (390–480°F)	200–250°C (390–480°F)
Consumables	IMPAX TIG-WELD	IMPAX WELD
Hardness after welding	300–330 HB	300–330 HB

Further information is given in the Uddeholm brochures “Welding of Tool Steel” and “Uddeholm Impax Weld/TIG-Weld”.

## Electrical-discharge machining

If spark-erosion, EDM, is performed in the as delivered condition, the tool should then be given an additional temper at approx. 550°C (1020°F). If the steel has been rehardened, the additional tempering temperature should be 25°C (50°F) lower than the last tempering temperature used.

Further information can be obtained from the Uddeholm brochure “EDM of tool steel”.

## Hard-chromium-plating

After hard-chromium-plating, the tool should be tempered for approx. 4 hours at 180°C (350°F) within 4 hours of plating in order to avoid hydrogen embrittlement.

## Photo-etching

Uddeholm Impax Supreme is particularly suitable for texturing by the photo-etching process. Its very low sulphur content ensures accurate and consistent pattern reproduction.

For heavy sections an extra tempering at 550°C (1020°F) before photo-etching is recommended.

## Polishing

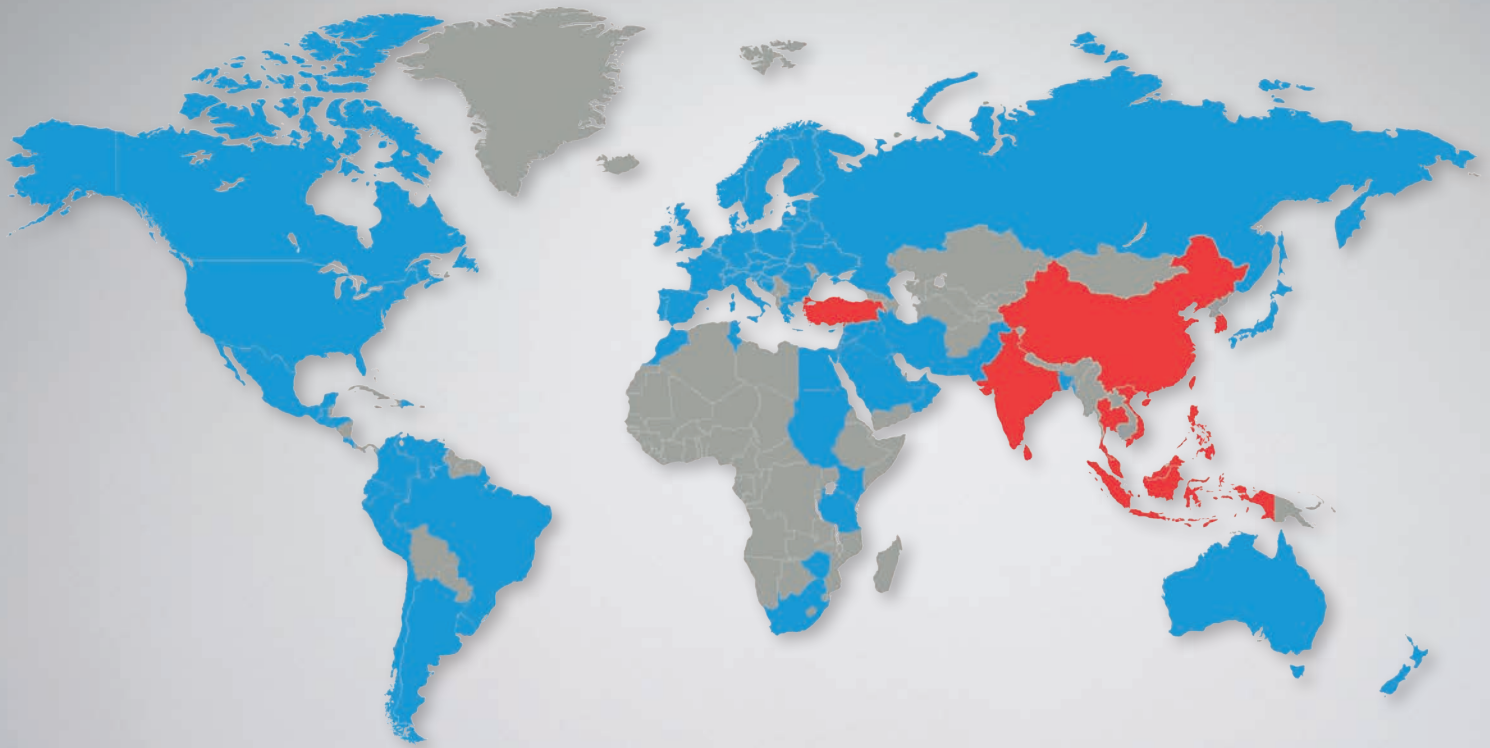
Uddeholm Impax Supreme has good polishability in the hardened and tempered condition. After grinding, polishing is undertaken with aluminium oxide or diamond paste.

*Note:* Each steel grade has an optimum polishing time which largely depends on hardness and polishing technique. Overpolishing can lead to a poor surface finish (e.g. an “orange peel” effect).

Further information is given in the Uddeholm publication “Polishing of mould steel”.

## Further information

Contact your local Uddeholm office for further information on the selection, heat treatment, application and availability of Uddeholm tool steels, including the publication “Steels for moulds”.



## Network of excellence

UDDEHOLM is present on every continent. This ensures you high-quality Swedish tool steel and local support wherever you are. ASSAB is our wholly-owned subsidiary and exclusive sales channel, representing Uddeholm in the Asia Pacific area. Together we secure our position as the world's leading supplier of tooling materials.

UDDEHOLM is the world's leading supplier of tooling materials. This is a position we have reached by improving our customers' everyday business. Long tradition combined with research and product development equips Uddeholm to solve any tooling problem that may arise. It is a challenging process, but the goal is clear – to be your number one partner and tool steel provider.

Our presence on every continent guarantees you the same high quality wherever you are. ASSAB is our wholly-owned subsidiary and exclusive sales channel, representing Uddeholm in the Asia Pacific area. Together we secure our position as the world's leading supplier of tooling materials. We act worldwide, so there is always an Uddeholm or ASSAB representative close at hand to give local advice and support. For us it is all a matter of trust – in long-term partnerships as well as in developing new products. Trust is something you earn, every day.

For more information, please visit [www.uddeholm.com](http://www.uddeholm.com), [www.assab.com](http://www.assab.com) or your local website.

UD  
WOR  
RUST IS SOM  
TRUST IS I  
AUTOMOTIVE  
KINDING SU  
TOUGHNESS ST  
MATERIALS I  
EDDING WATER  
BYSTANDIN  
RESULTS. M  
CUSTOMER B  
BILITY TRUST IS  
AUTOMOTIVE  
LEADING SU  
INNOVATION  
STRENGTH INNOVATION  
WORLDWIDE PRE  
SOMETHING YO  
PROBLEM  
THE WORL  
NOMY THE  
DUCTILITY TO  
COMMITMENT PART  
KNOWLEDGE UN  
KNOWLEDGE  
RELIABILITY  
OF EXCEL  
AUTOMOTIVE A  
ECONOMY THE  
TOTAL ECONOMY  
DUCTILITY TOUGHNE  
HARDNESS WORLDW  
TRUST IS SOMETH  
UNDERSTANDING MACHIN  
RESULTS SOLVING PROB  
ECONOMY THE WORL  
STRENGTH IN  
TOUGHNESS STRENGTH I  
MATERIALS PARTN  
UNDERSTANDING MACHIN  
BILITY RELIABILITY RESU  
LASTING TOOLS TOTAL  
YOU EARN, EVERY DAY. LO  
OF THINKING HIGH PE  
OFTOOLING MATERIALS C  
INNOVATION KNOWLEDGE  
STRENGTH INNOVATION KNOW  
EXPERIENCE LONG DURABILITY  
TRUST IS SOMETHING YOU EARN,  
PROBLEMS AUTOMOTIVE

**Advanced Materials****Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998-1****Structural Adhesives**

## TECHNICAL DATASHEET

**Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998-1****Two component epoxy adhesive****Key properties**

- Excellent chemical resistance
- Temperature resistant to 140°C
- Thixotropic, gap filling paste

**Description**

Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998-1 is a two component, room temperature curing paste adhesive of high strength. When fully cured the adhesive will have excellent performance at elevated temperatures and has high chemical resistance. It is suitable for bonding a wide variety of metals, ceramics, glass, rubbers, rigid plastics and other materials, and is widely used in many industrial applications where resistance to aggressive or warm environments are required.

**Typical product data**

Property	Araldite® AV 138M-1	Hardener HV 998-1	Mix
Colour - visual (A112)*	beige	grey	grey
Specific gravity	ca. 1.7	ca. 1.6	ca. 1.7
Viscosity (Pas)	thixotropic	thixotropic	thixotropic
Lap shear strength at 25 °C (A501)*	-	-	> 11 MPa
Pot Life (100 gm at 25°C)	-	-	30 min

\* Specified data are on a regular basis analysed. Data which is described in this document as 'typical' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

**Processing****Pretreatment**

The strength and durability of a bonded joint are dependant on proper treatment of the surfaces to be bonded.

At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt.

Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used.

The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite® AV 138M-1	100	100
Hardener HV 998-1	40	40

Resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix.

### Application of adhesive

The resin/hardener mix is applied with a spatula, to the pretreated and dry joint surfaces.

A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint.

The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. An even contact pressure throughout the joint area will ensure optimum cure.

### Mechanical processing

Specialist firms have developed metering, mixing and spreading equipment that enables the bulk processing of adhesive. We will be pleased to advise customers on the choice of equipment for their particular needs.

### Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

### Typical times to minimum shear strength

Temperature	°C	10	15	23	40	60	100
Time to reach a LSS of 1 MPa	hours	14	8	4			
	minutes				75	20	4
Time to reach a LSS of 10 MPa	hours	22	15	6			
	minutes				120	30	5

LSS = Lap shear strength.

### Typical cured properties

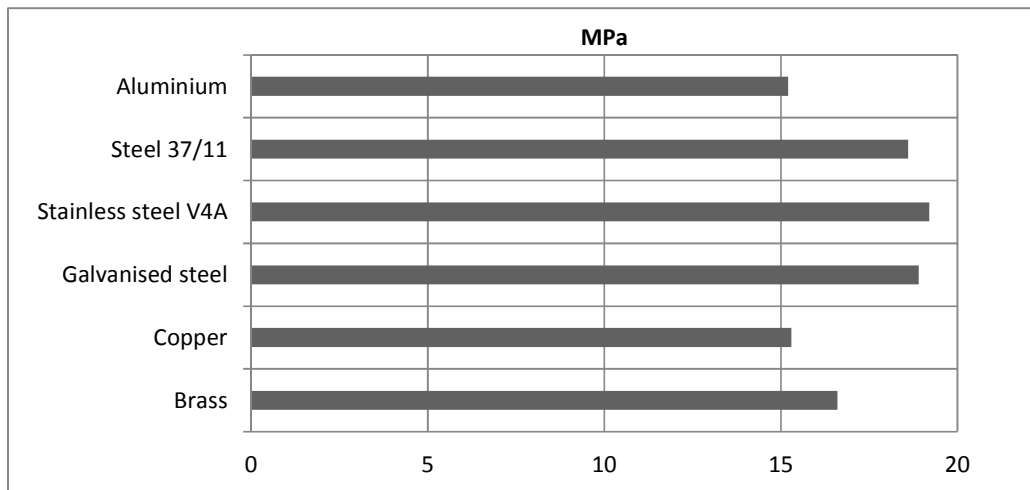
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

### Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587) (typical average values)

Cure: 16 hours at 40°C and tested at 23°C

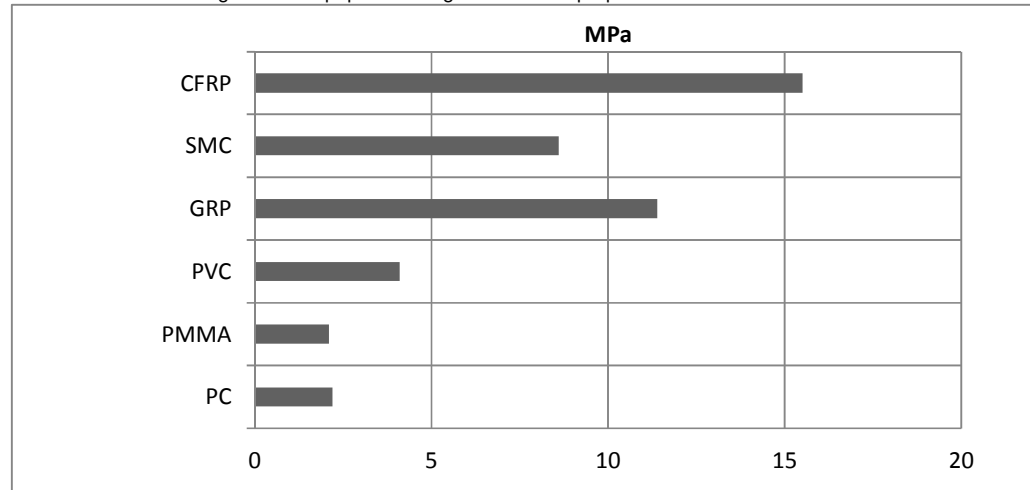
Pretreatment - Sand blasting



### Average lap shear strengths of typical plastic-to-plastic joints (ISO 4587) (typical average values)

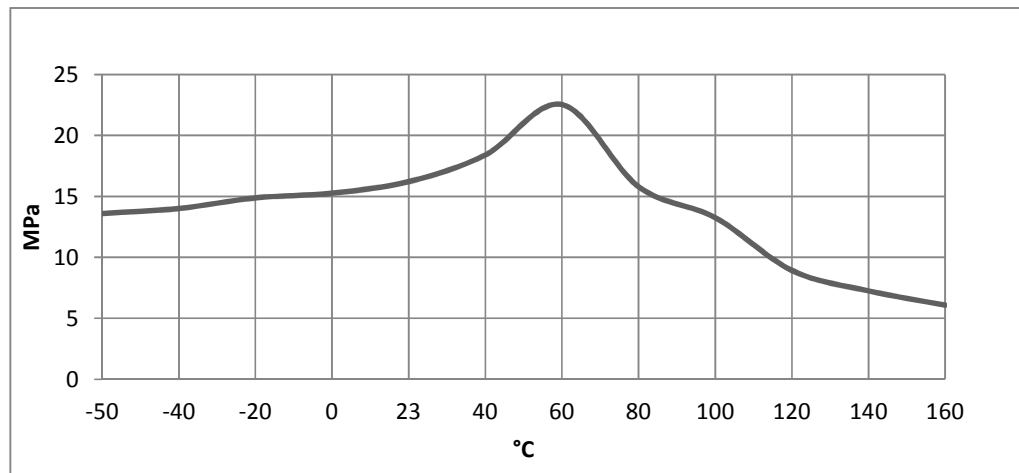
Cure: 16 hours at 40°C and tested at 23°C

Pretreatment – abrading with sand paper and degrease with isopropanol



### Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)

Cure: 16 hours at 40°C



Shore hardness

D86

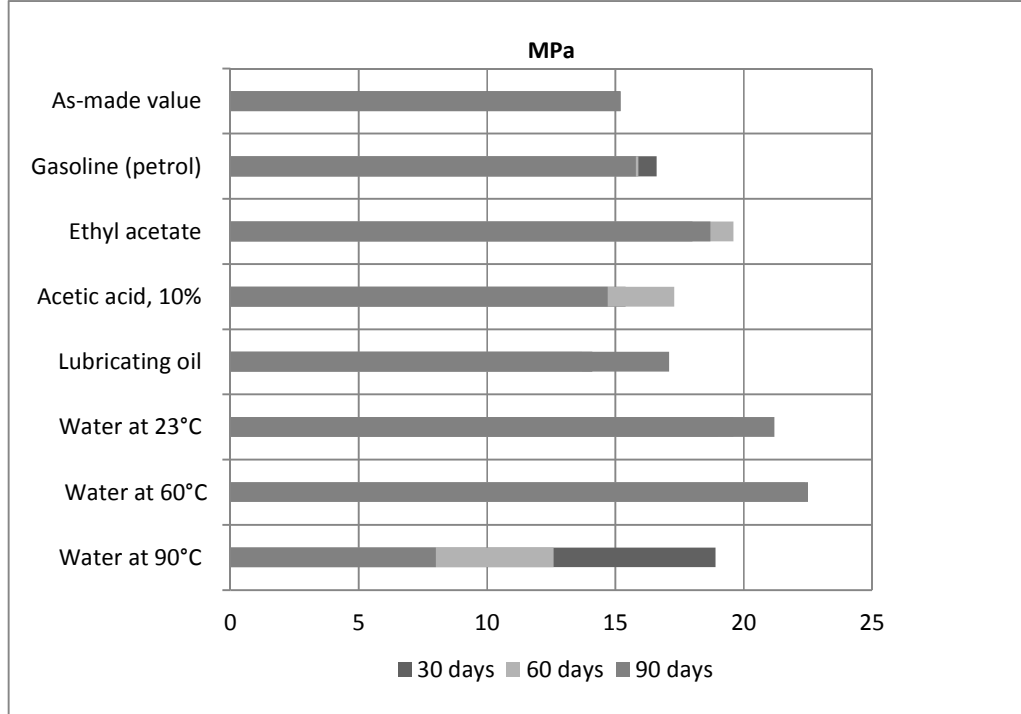
### Tensile Properties (ISO 527) (typical average values)

Cure 16 hours/ 40°C , tested at 23°C

Tensile strength	29 MPa
Tensile modulus	4.2 GPa
Elongation at break	0.8%

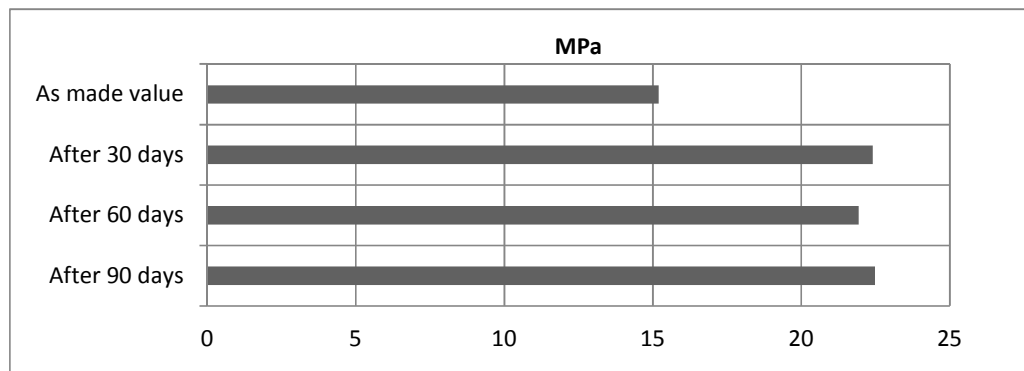
### Lap shear strength versus immersion in various media (ISO 4587) (typical average values)

Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 30, 60 and 90 days at 23°C. Cure 16 hours at 40°C



### Lap shear strength versus tropical weathering (ISO 4587) (typical average values)

(40°C/ 92% RH), on aluminium, cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment - Sand blasting



**Storage**

Araldite® AV 138M-1 and Hardener HV 998-1 must be stored at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

**Handling  
Precautions****Caution**

Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.

**Huntsman Advanced Materials  
(Switzerland) GmbH**

Klybeckstrasse 200  
CH - 4057 Basel  
Switzerland

Tel: +41 (0)61 299 11 11  
Fax: +41 (0)61 299 11 12

[www.aralditeadhesives.com](http://www.aralditeadhesives.com)

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the user. Specified data are analysed on a regular basis. Data which is described in this document as 'typical' or 'guideline' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication. While all the information and recommendations in this publication are, to the best of Huntsman Advanced Material's knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, nothing herein is to be construed as a warranty, whether express or implied, including but without limitation, as to merchantability or fitness for a particular purpose. In all cases, it is the responsibility of the user to determine the applicability of such information and recommendations and the suitability of any product for its own particular purpose.

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

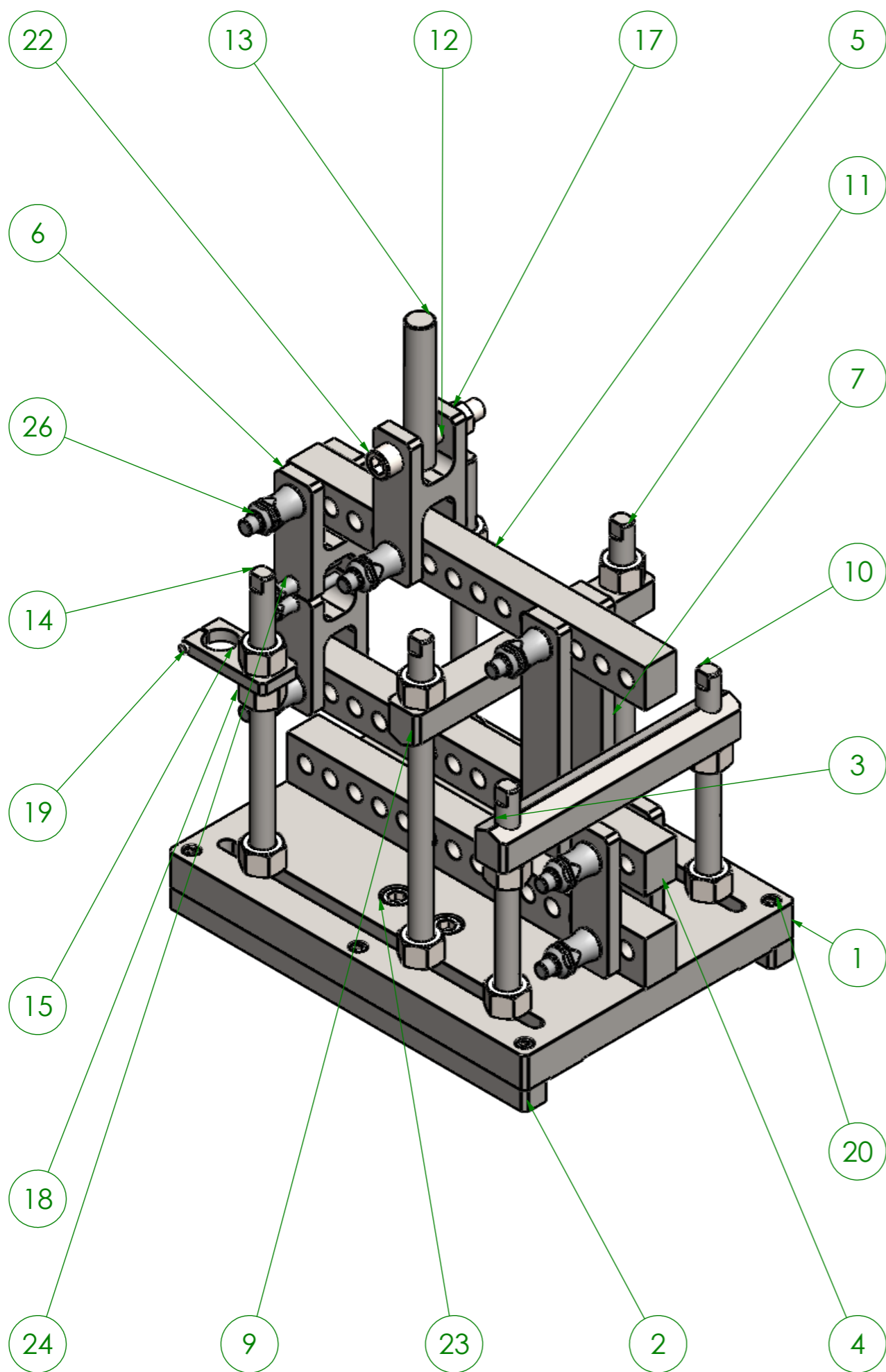
Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., Huntsman Advanced Materials (UAE) FZE, Huntsman Advanced Materials (Guangdong) Company Limited, and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

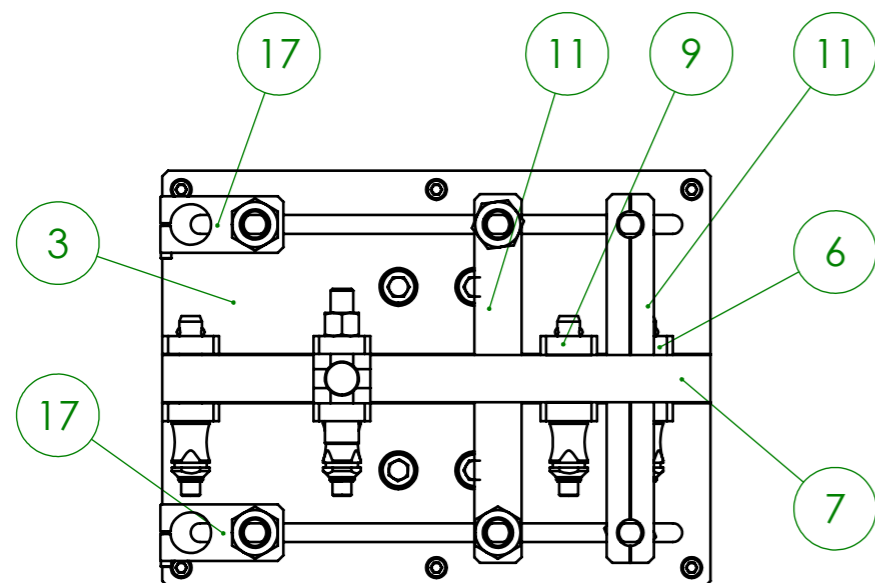
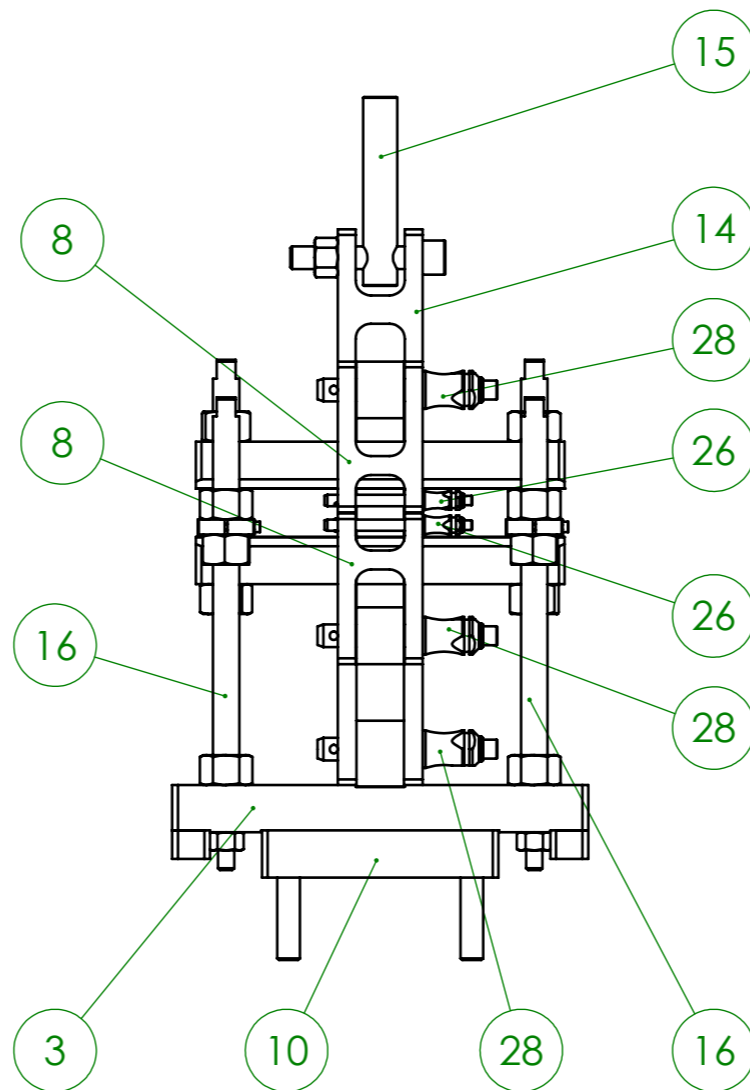
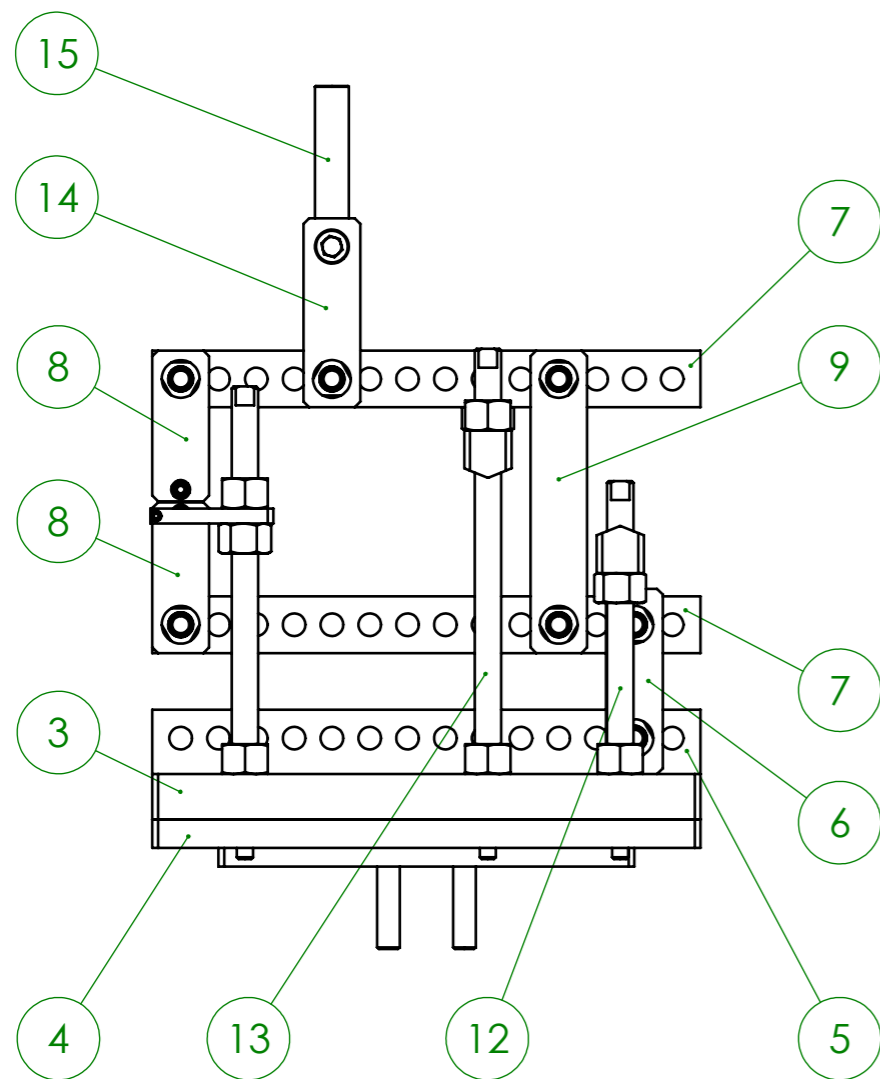
All trademarks mentioned are either property of or licensed to Huntsman Corporation or an affiliate thereof in one or more, but not all, countries.

Copyright © 2017 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.



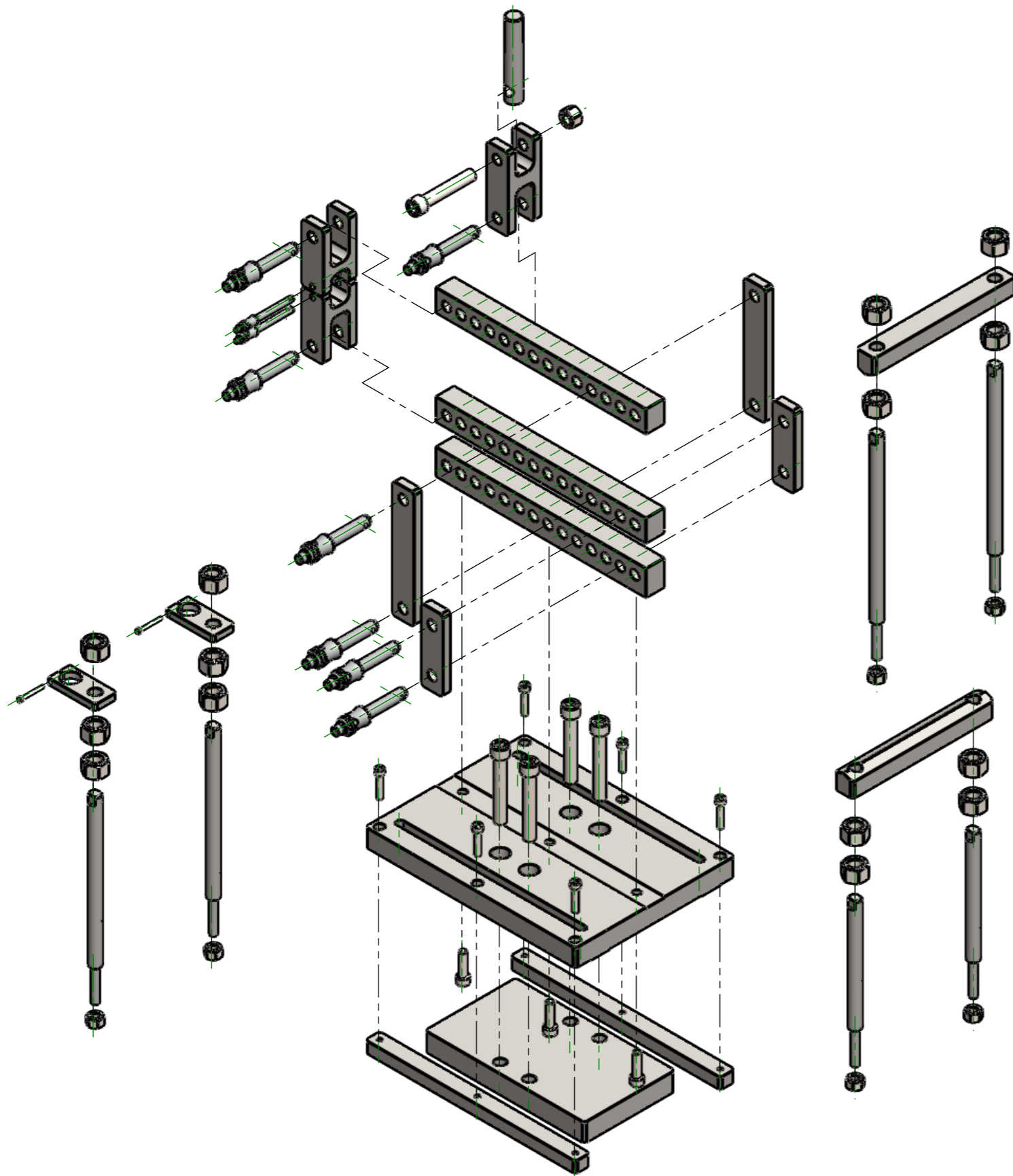
Nº POS.	REFERÊNCIA	DIMENSÕES	QNTD.
1	EEMMB-001	290X220X25	1
2	EEMMB-002	290X20X15	2
3	EEMMB-003	290X25X35	1
4	EEMMB-004	98X10X30	2
5	EEMMB-005	290X25X30	2
6	EEMMB-006	30X45X79,70	2
7	EEMMB-007	30X10X160	2
8	EEMMB-008	220X125X25	1
9	EEMMB-009	25X195X25	2
10	EEMMB-010	ØM16X200	2
11	EEMMB-011	ØM16X270	2
12	EEMMB-012	30X45X100	1
13	EEMMB-013	Ø18X100	1
14	EEMMB-014	ØM16X250	2
15	EEMMB-015	65X30X8	2
16	ISO - 4034 - M10 - N		6
17	ISO - 4034 - M12 - N		1
18	ISO - 4034 - M16 - N		14
19	ISO 4762 M3 x 30 - 30C		2
20	ISO 4762 M6 x 30 - 30C		6
21	ISO 4762 M8 x 30 - 30C		3
22	ISO 4762 M12 x 70 - 70C		1
23	ISO 4762 M12 x 80 - 80C		4
24	EH 22380.0029		2
25	EES-2C E250600100		2
26	EH 22380.0069		7

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de conjunto		Estado do documento Publicado		Escala 1:3	
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-100		Tolerâncias gerais -		Quantidade 1	
Material -			Revisão A	Data de edição 2021/06/07	Língua PT	Folha A3 1/3		

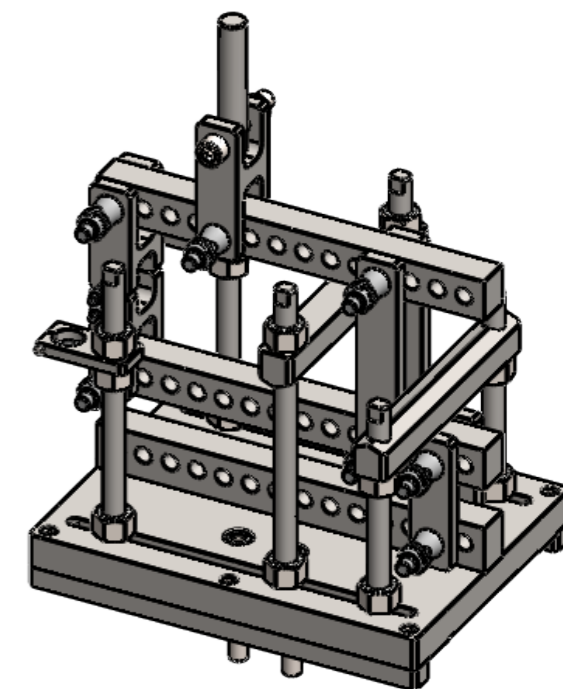


Nº POS.	REFERÊNCIA	QNTD.
1	EEMMB-001	1
2	EEMMB-002	2
3	EEMMB-003	1
4	EEMMB-004	2
5	EEMMB-005	2
6	EEMMB-006	2
7	EEMMB-007	2
8	EEMMB-008	1
9	EEMMB-009	2
10	EEMMB-010	2
11	EEMMB-011	2
12	EEMMB-012	1
13	EEMMB-013	1
14	EEMMB-014	2
15	EEMMB-015	2
16	ISO - 4034 - M10 - N	6
17	ISO - 4034 - M12 - N	1
18	ISO - 4034 - M16 - N	14
19	ISO 4762 M3 x 30 - 30C	2
20	ISO 4762 M6 x 30 - 30C	6
21	ISO 4762 M8 x 30 - 30C	3
22	ISO 4762 M12 x 70 - 70C	1
23	ISO 4762 M12 x 80 - 80C	4
24	EH 22380.0029	2
25	EES-2C E250600100	2
26	EH 22380.0069	7

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de conjunto		Estado do documento Publicado		Escala 1:4	
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-100		Tolerâncias gerais -		Quantidade 1	
Material -			Revisão A	Data de edição 2021/06/07	Língua PT	Folha A3 2/3		

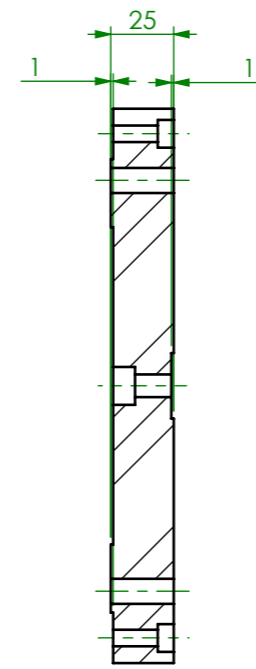
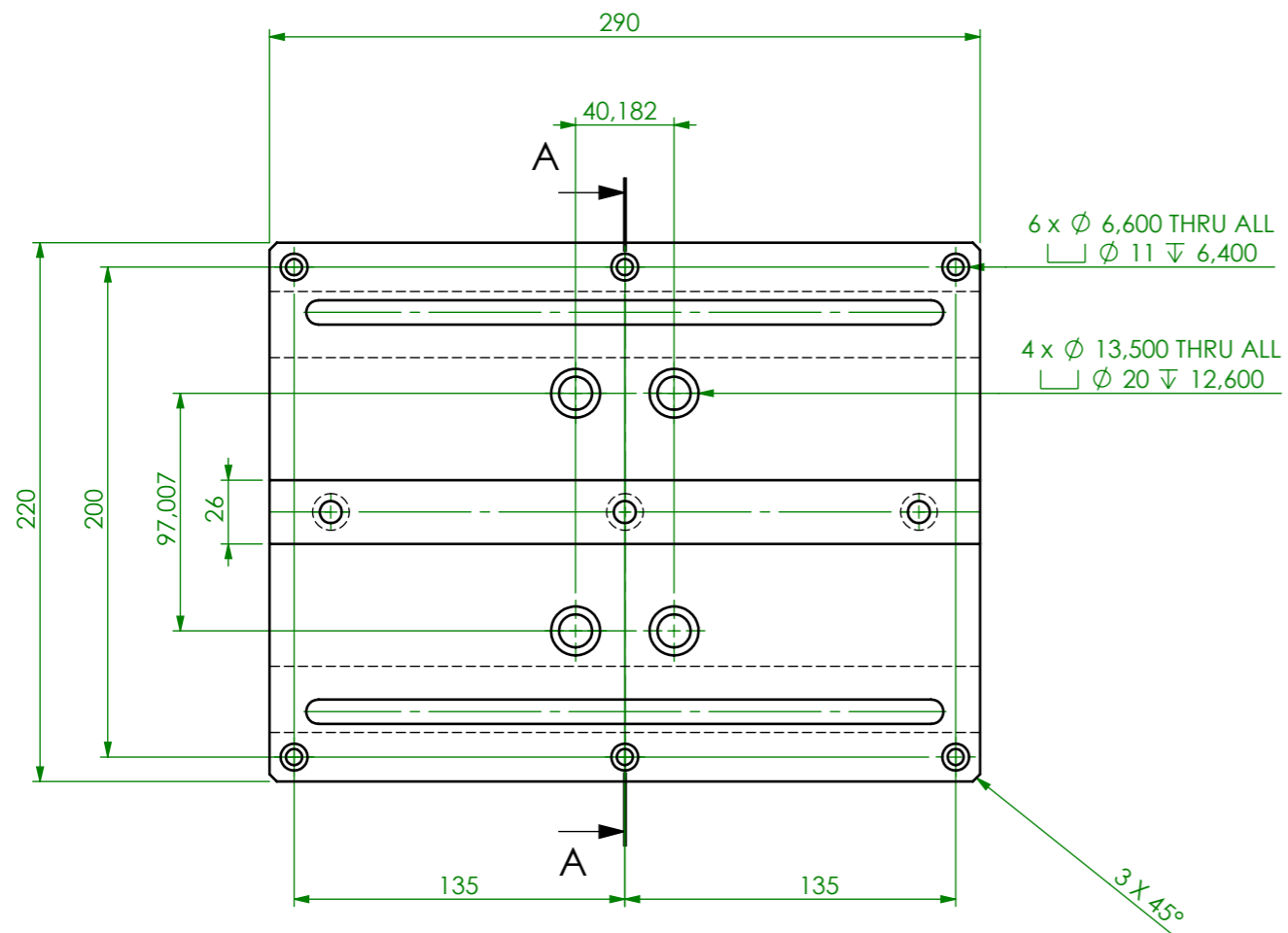


VISTA EXPLODIDA

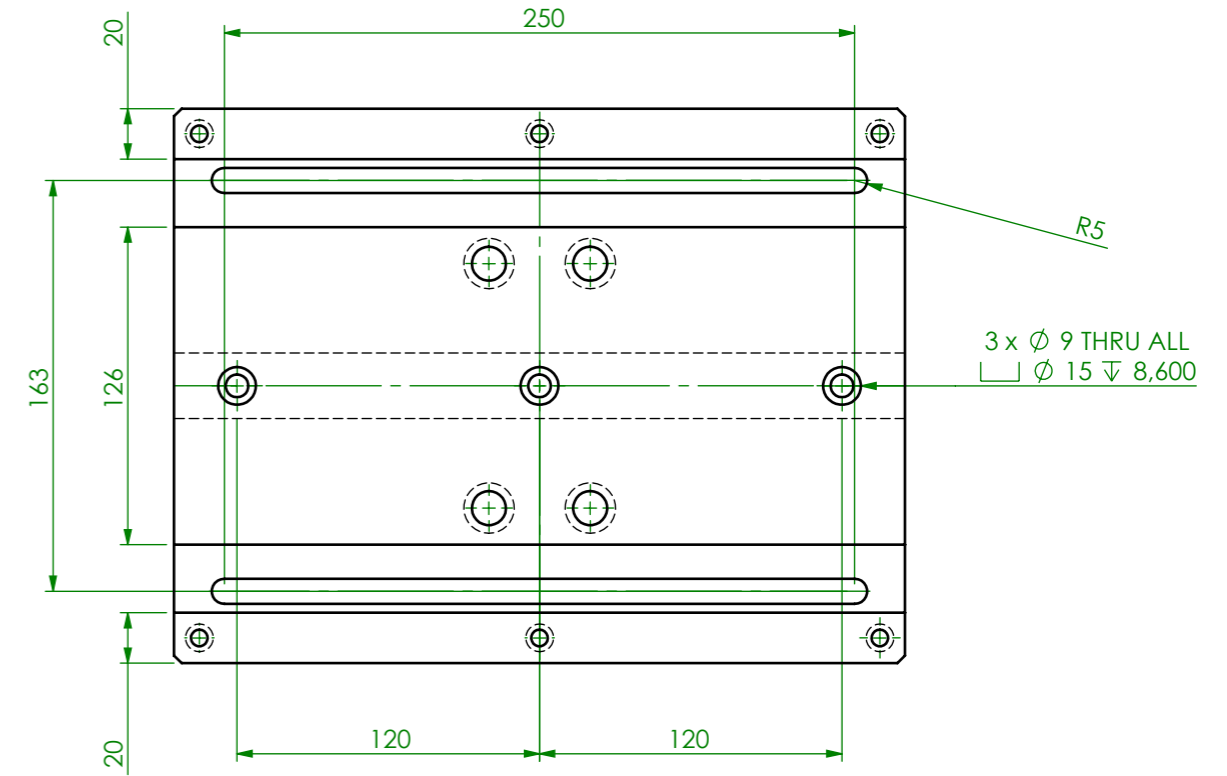


VISTA COLAPSADA

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de conjunto	Estado do documento Publicado	Escala 1:5
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-100	Tolerâncias gerais -	Quantidade 1
Material -		Revisão A	Data de edição 2021/06/07	Língua PT	Folha A3 3/3

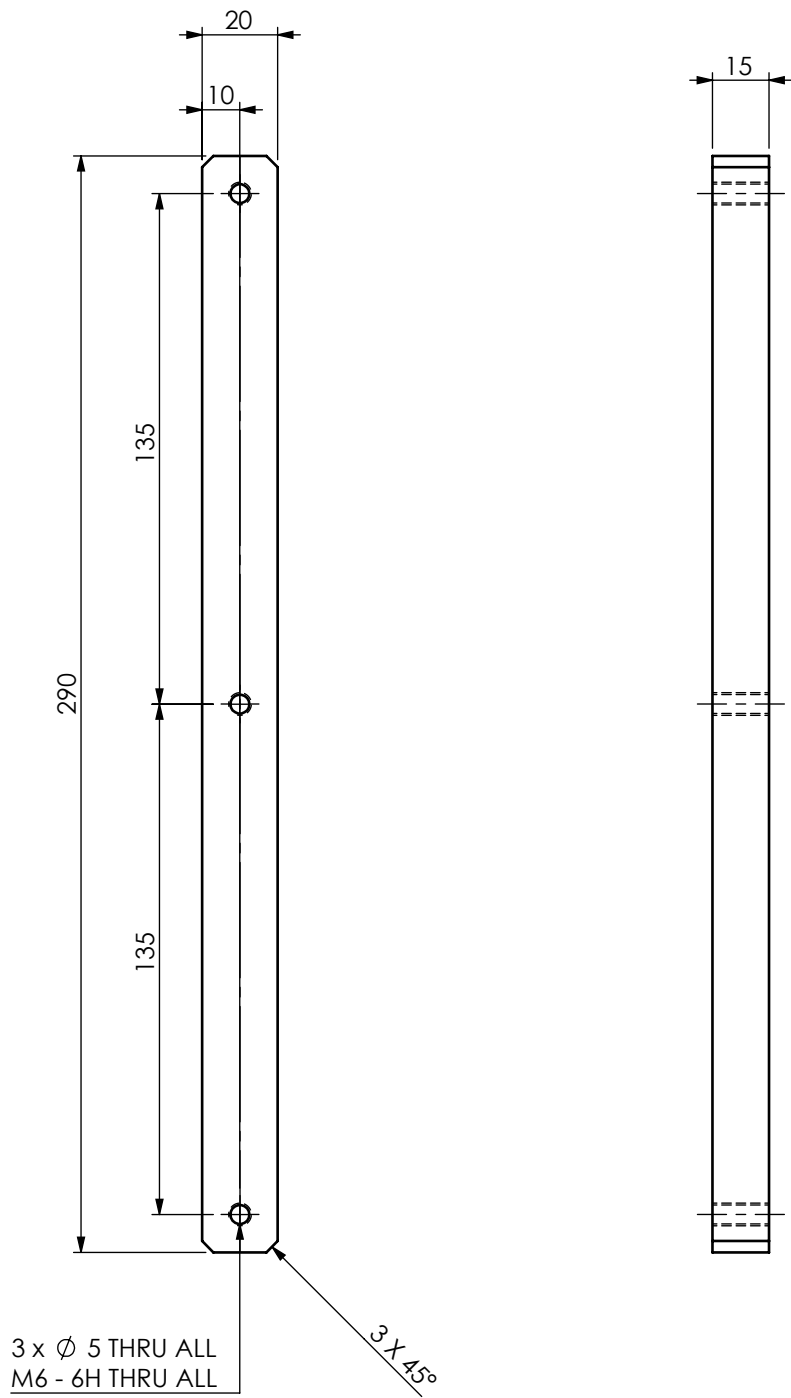


SECTION A-A

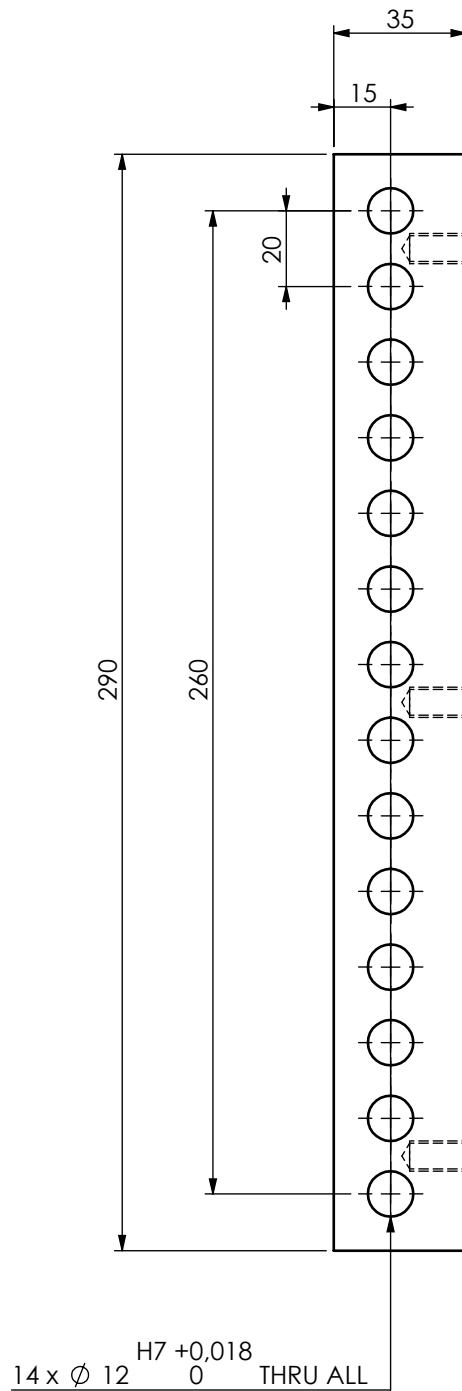
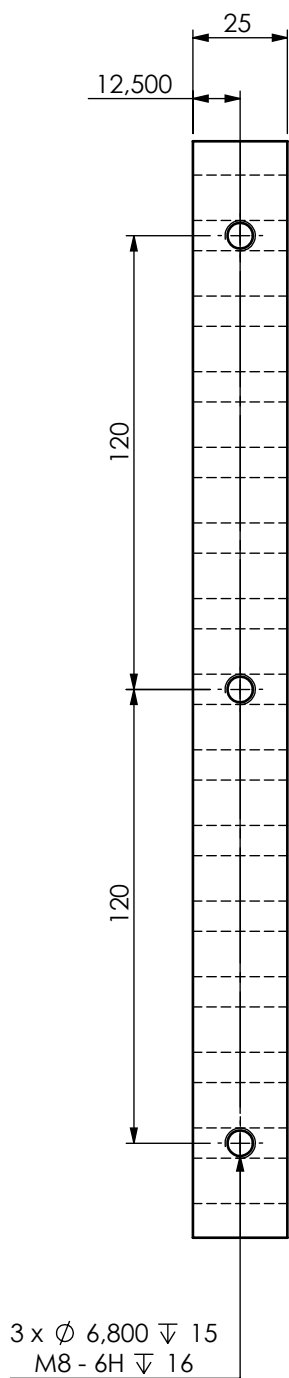


$\sqrt{Ra}$  3.2

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:3
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-001	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 1
Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)		Revisão A	Data de edição 2021/06/07	Língua PT	Folha A3 1/1

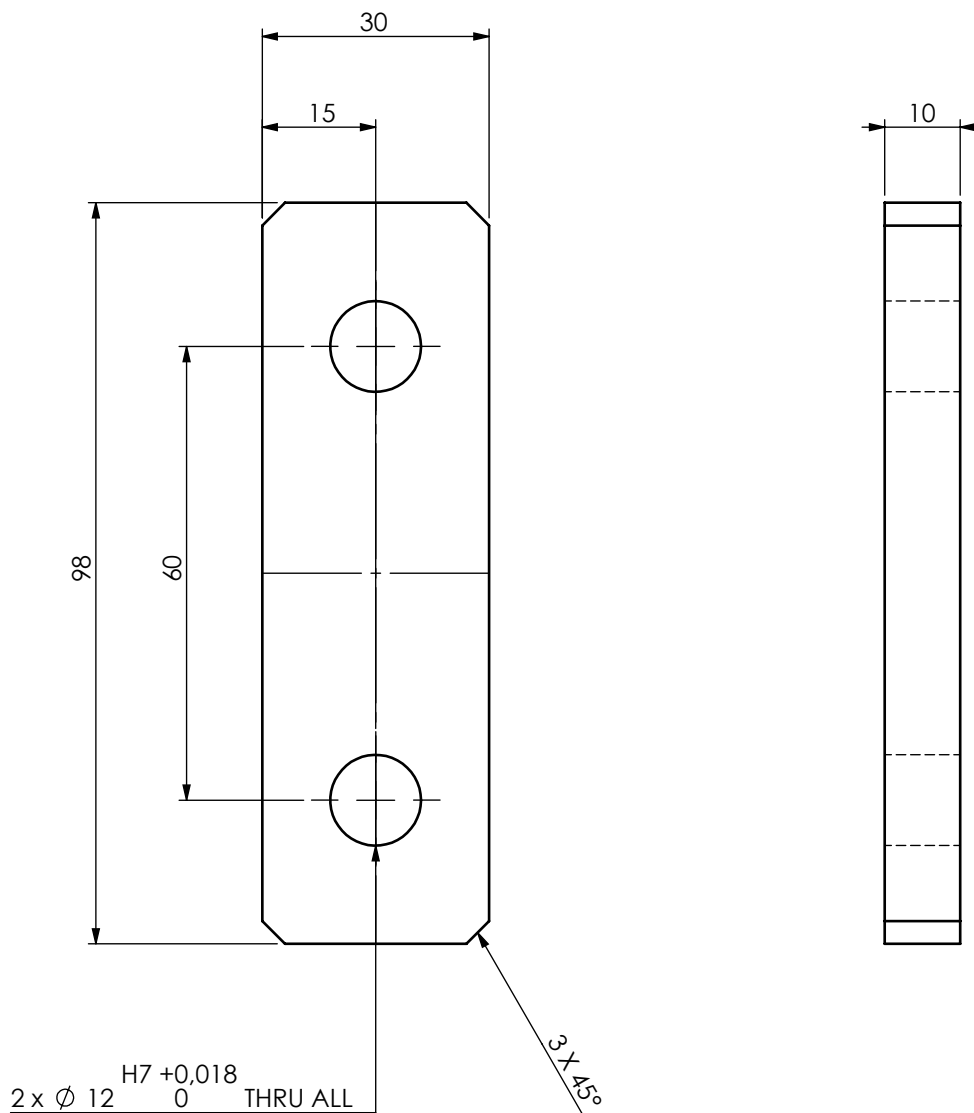


Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:2
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-002	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 2
Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)			Revisão A	Data de edição 2021/06/07	Língua PT
					Folha A4 1/1



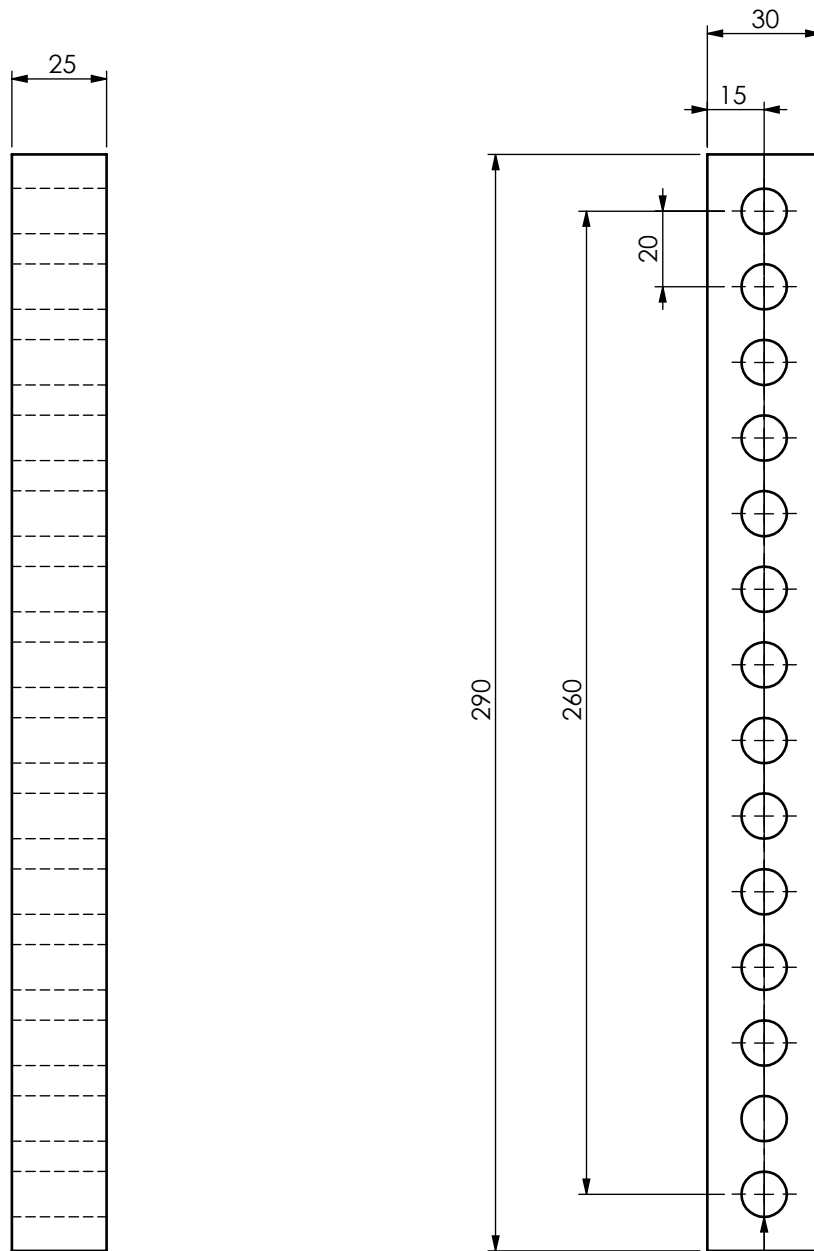
√ Ra 3.2

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:2
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-003	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 1
Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)			Revisão A	Data de edição 2021/06/07	Língua PT
					Folha A4 1/1



√ Ra 3.2

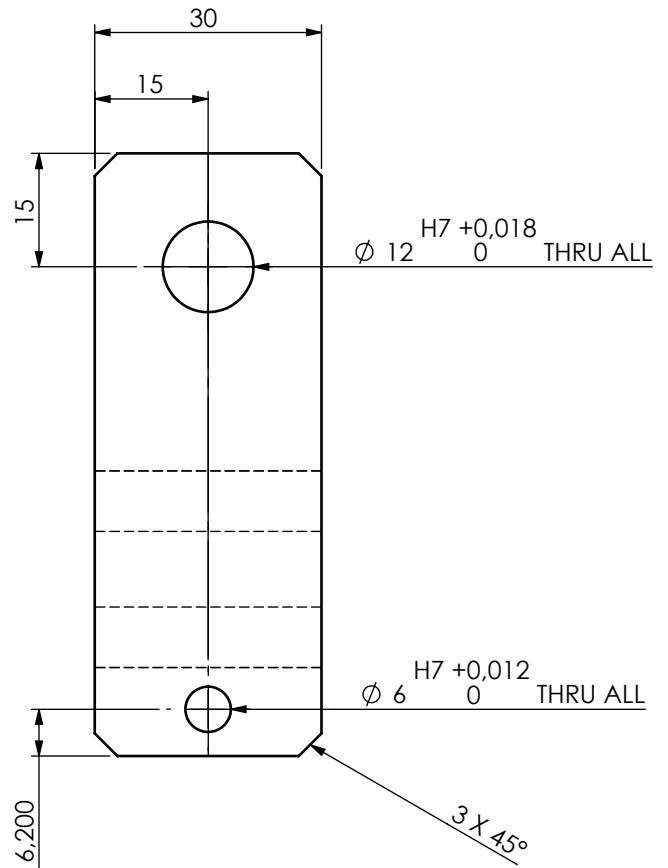
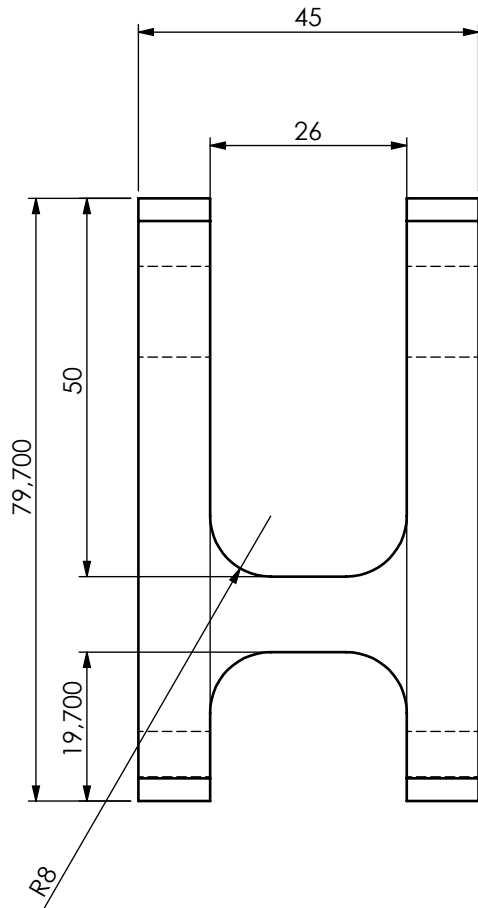
Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:1
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-004	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 2
			Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)	Revisão A	Data de edição 2021/06/07
				Língua PT	Folha A4 1/1



14 x  $\varnothing$  12  $\begin{matrix} H7 +0,018 \\ 0 \end{matrix}$  THRU ALL

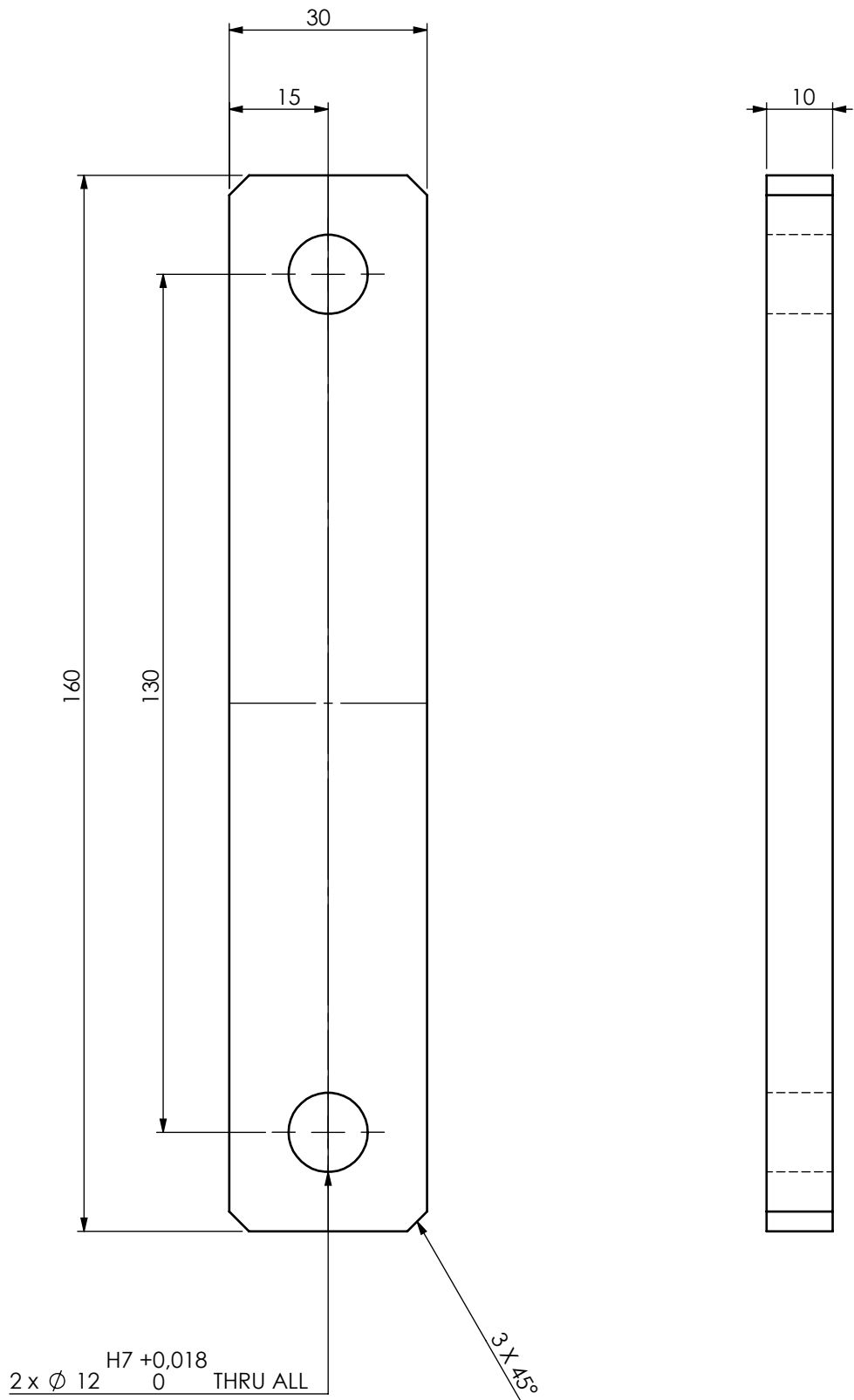
$\sqrt{Ra}$  3.2

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:2
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-005	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 2
			Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)	Revisão A	Data de edição 2021/06/07
				Língua PT	Folha A4 1/1



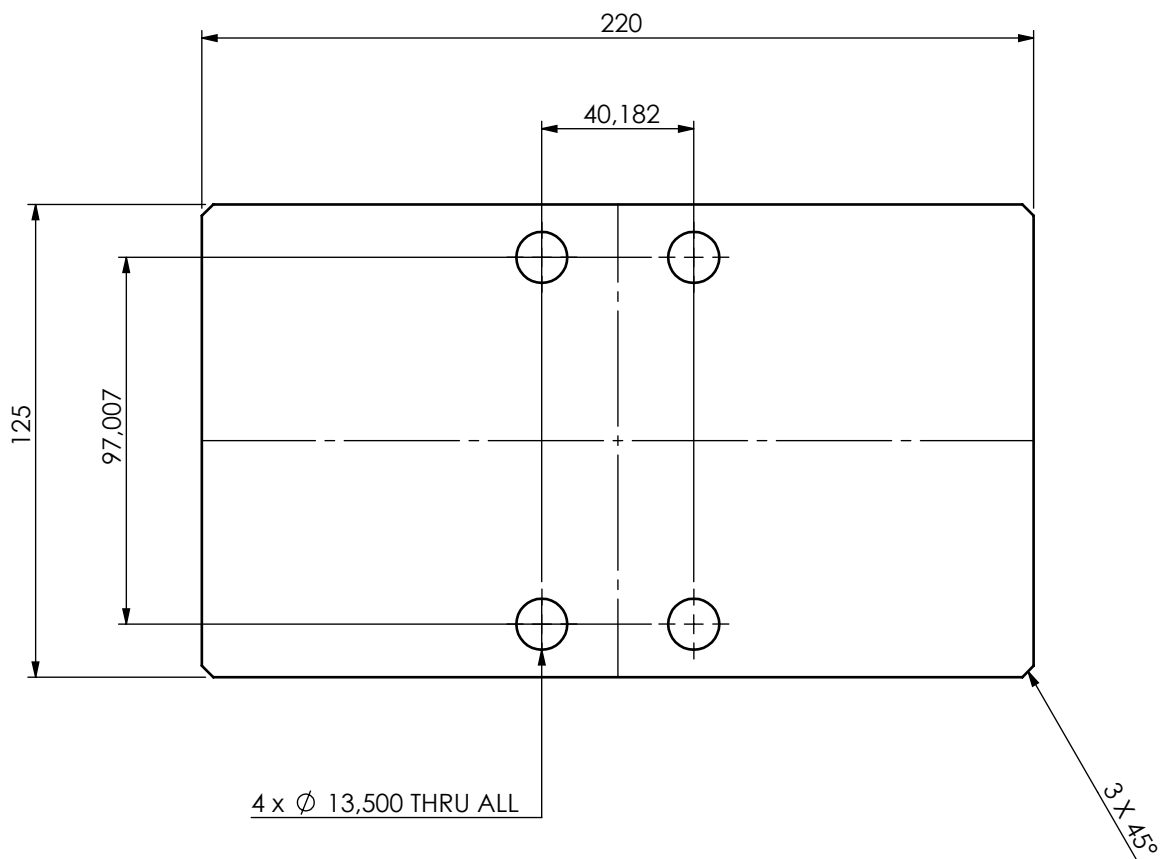
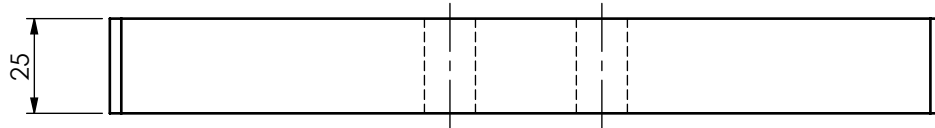
√ Ra 3.2

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:1
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-006	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 2
Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)			Revisão A	Data de edição 2021/06/07	Língua PT
					Folha A4 1/1



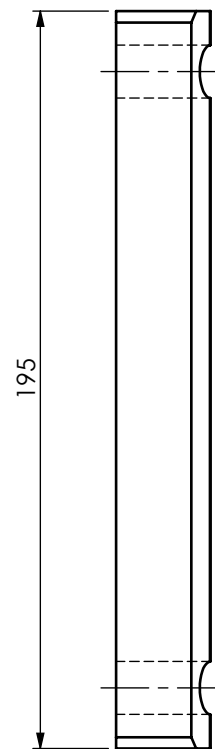
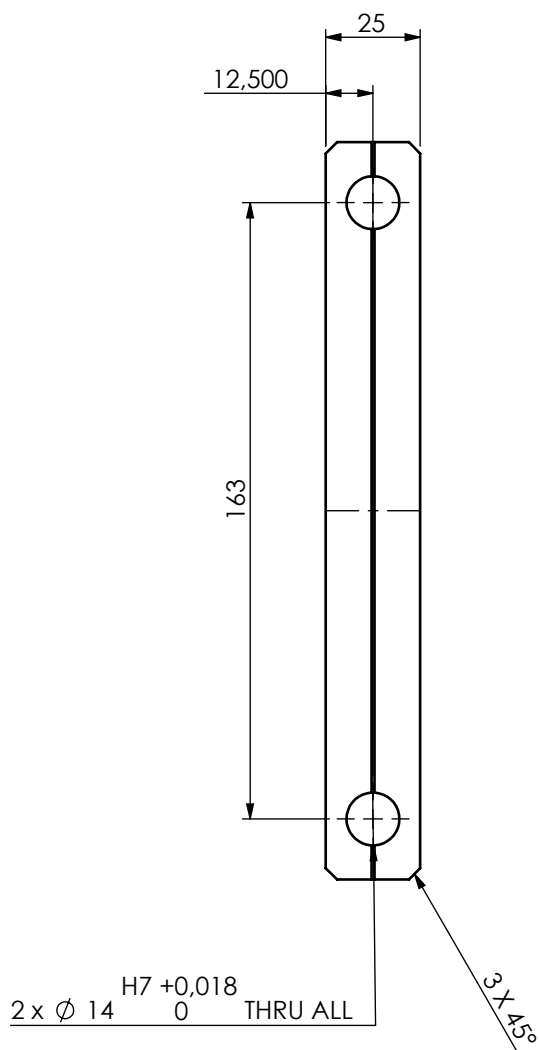
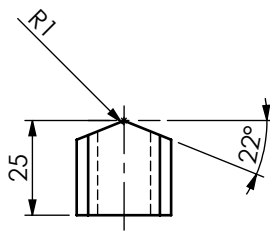
$\sqrt{\text{Ra}} 3,2$

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:1
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-007	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 2
Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)			Revisão A	Data de edição 2021/06/07	Língua PT
					Folha A4 1/1



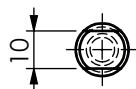
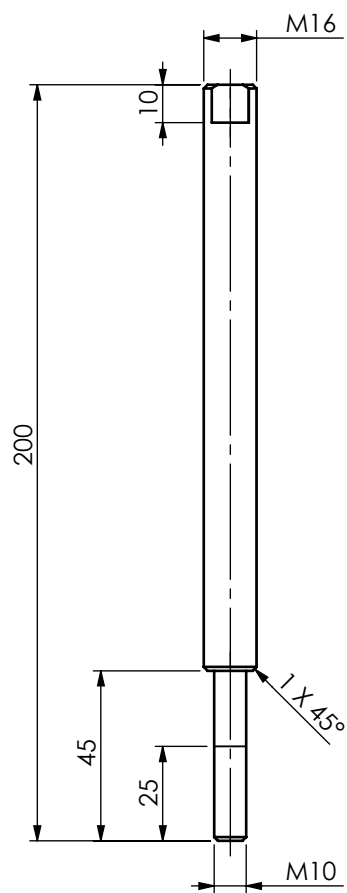
√ Ra 3.2

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:2
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-008	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 1
			Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)	Revisão A	Data de edição 2021/06/07
				Língua PT	Folha A4 1/1



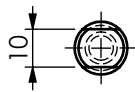
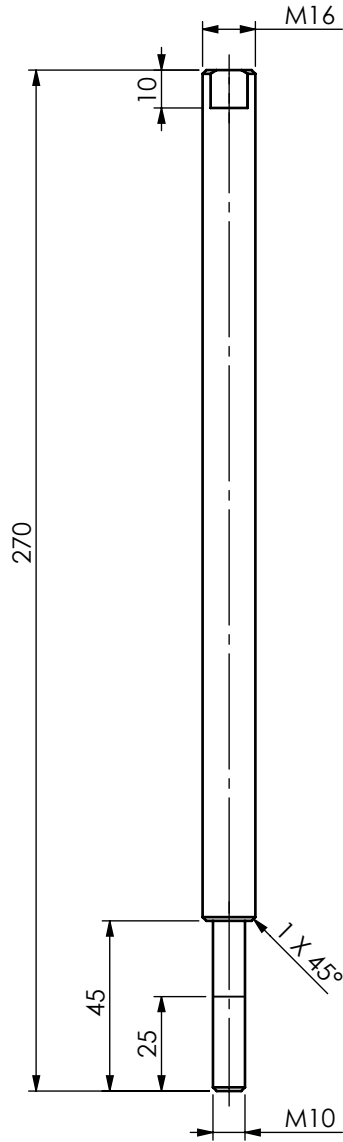
√ Ra 3.2

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:2
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-009	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 2
			Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)	Revisão A	Data de edição 2021/06/07
				Língua PT	Folha A4 1/1



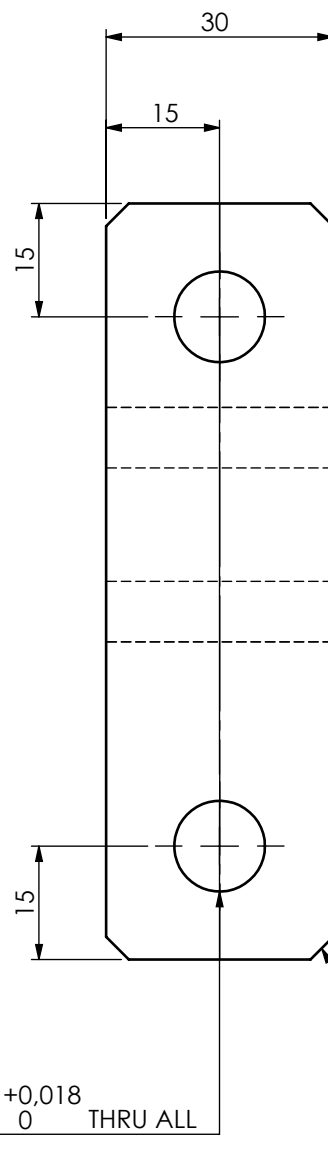
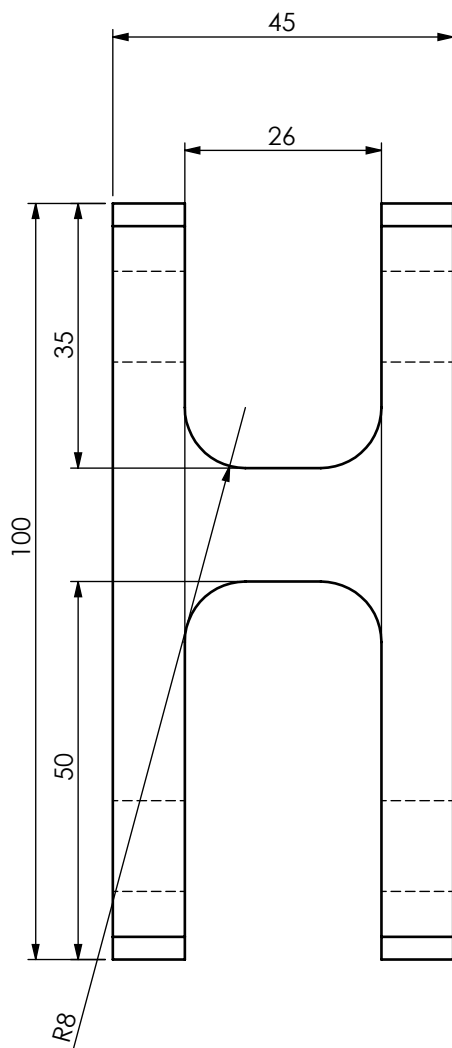
√ Ra 3.2

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:2
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-010	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 2
			Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)	Revisão A	Data de edição 2021/06/07
				Língua PT	Folha A4 1/1



√Ra 3.2

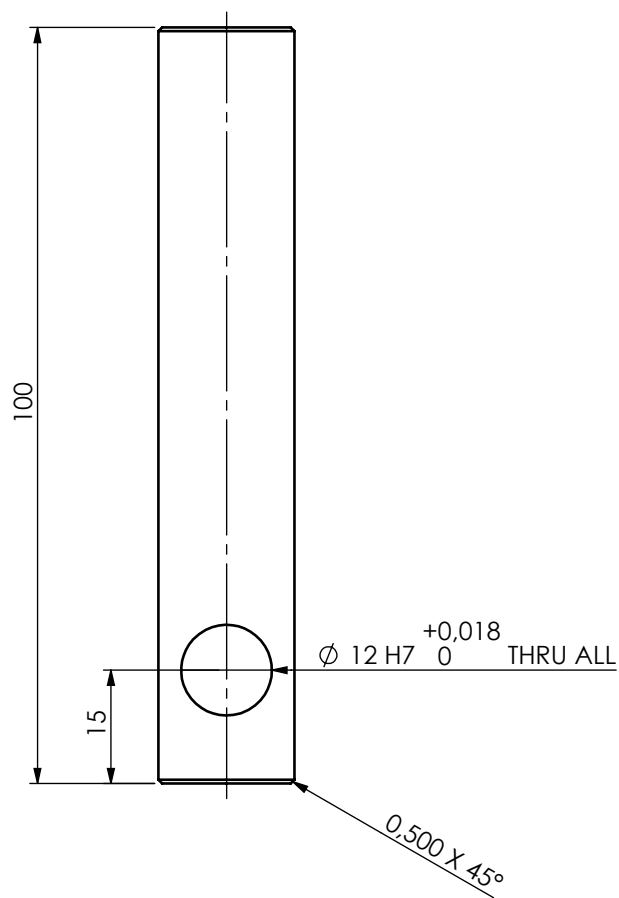
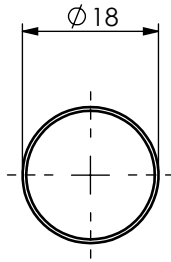
Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:2
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-011	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 2
			Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)	Revisão A	Data de edição 2021/06/07
				Língua PT	Folha A4 1/1



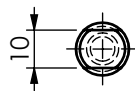
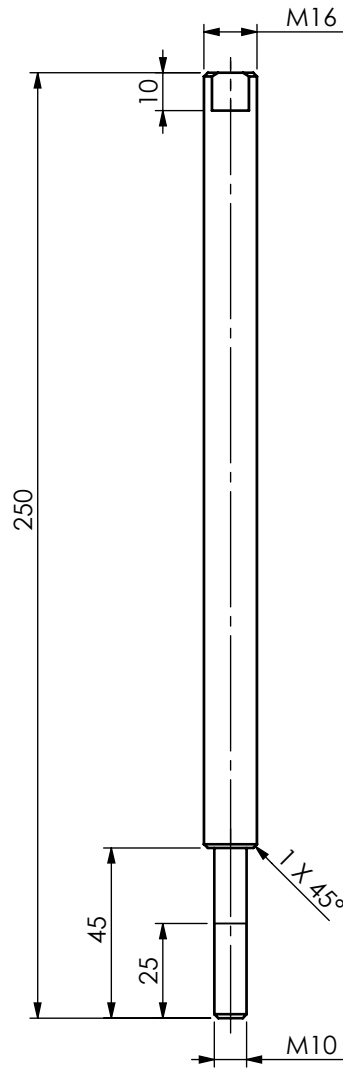
$2 \times \varnothing 12 \text{ H7 } \begin{matrix} +0,018 \\ 0 \end{matrix} \text{ THRU ALL}$

$\sqrt{\text{Ra } 3,2}$

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:1
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-012	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 1
Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)			Revisão A	Data de edição 2021/06/07	Língua PT
					Folha A4 1/1

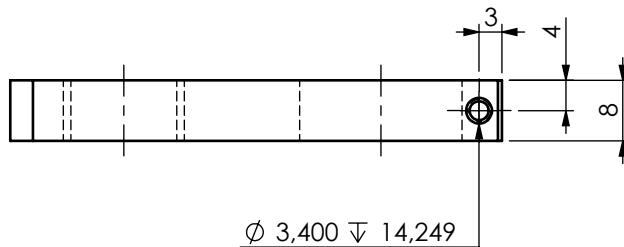
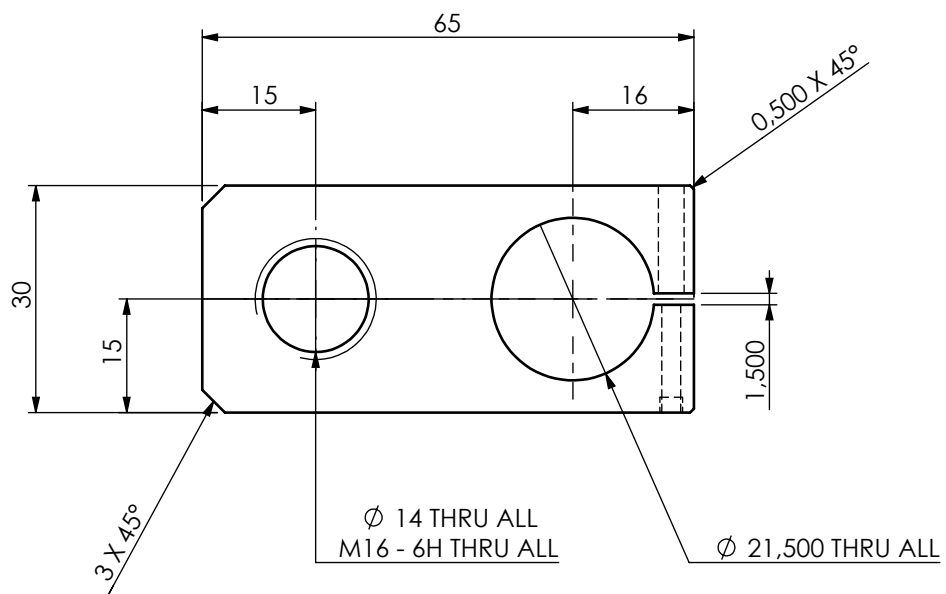
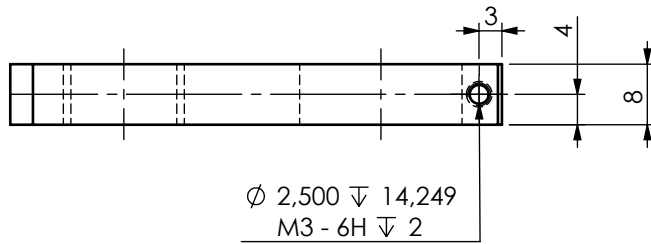


Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:1
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-013	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 1
			Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)	Revisão A	Data de edição 2021/06/07
				Língua PT	Folha A4 1/1



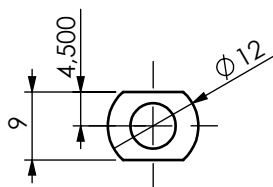
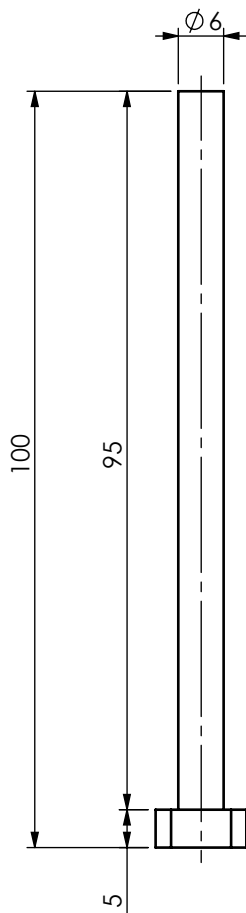
√Ra 3.2

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:2
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-014	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 2
			Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)	Revisão A	Data de edição 2021/06/07
				Língua PT	Folha A4 1/1



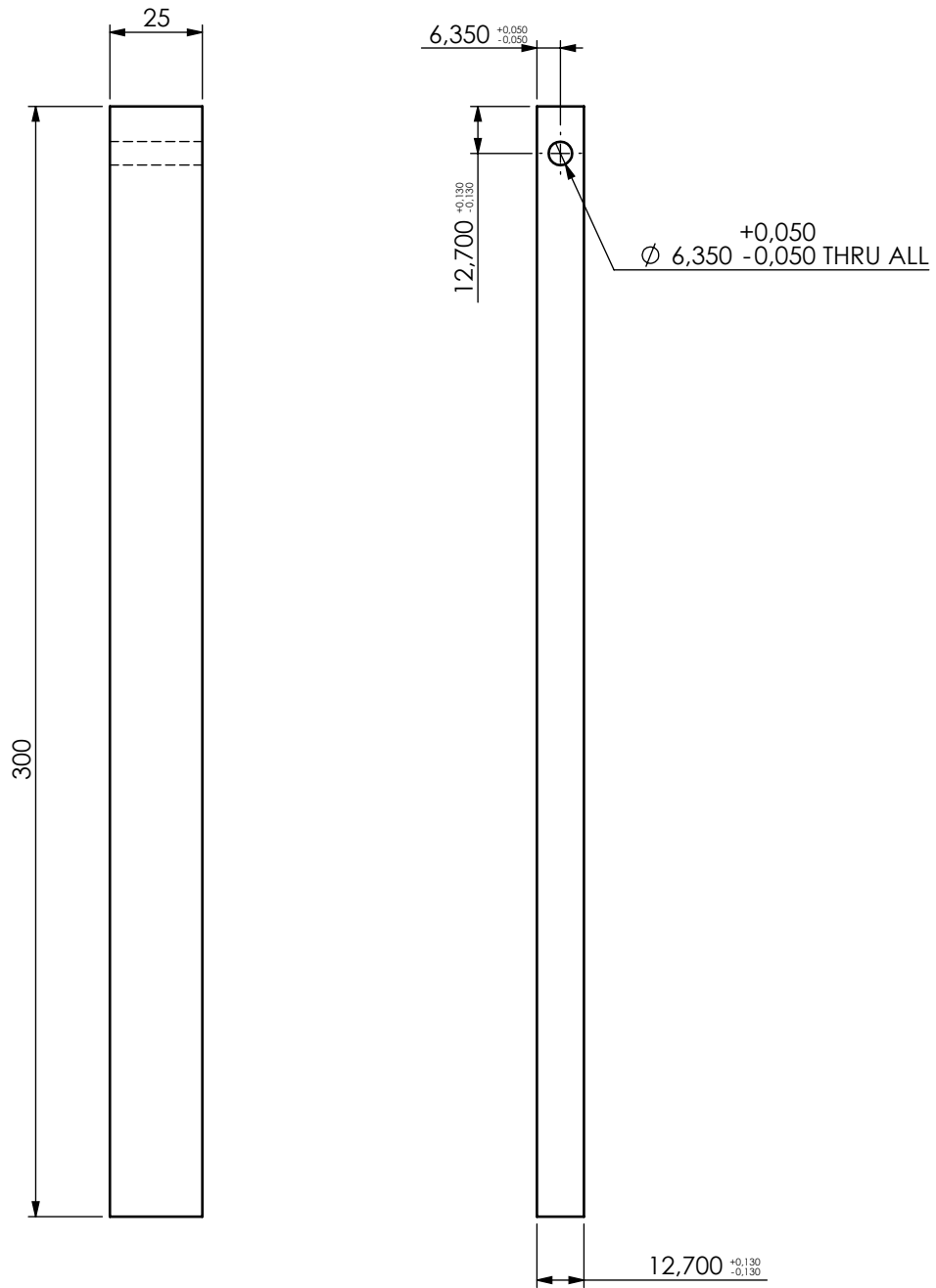
$\sqrt{Ra}$  3.2

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:1
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EEMMB-015	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 2
Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)			Revisão A	Data de edição 2021/06/07	Língua PT
					Folha A4 1/1



√ Ra 3,2

Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça de mercado	Estado do documento Publicado	Escala 1:1
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título EES-2C E250600100	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 2
			Material 1.2344 (X 40 CrMoV5-1)	Revisão A	Data de edição 2021/06/07
				Língua PT	Folha A4 1/1



Pessoa responsável Alice Soares	Número 1120204	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho de peça	Estado do documento Publicado	Escala 1:2
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto			Título PROVETE-DCB	Tolerâncias gerais IT12	Quantidade 1
Material 1.2738 (40 CrMnNiMo 8-6-4)			Revisão A	Data de edição 2021/06/07	Língua PT
					Folha A4 1/1

## DCTH Series DC to DC LVDT Displacement Transducer

- High cycle life
- Stainless steel
- High accuracy
- High resolution
- Voltage / 4-20mA output



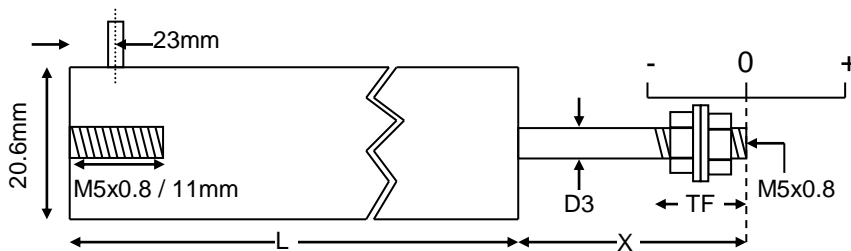
These transducers are for displacement / position measurement. They make an accurate position measurement of the movement of the armature (the sliding part) relative to the body of the displacement transducer.

This transducer uses the Linear Variable Differential Transformer (LVDT) principle which means that it is probably the most robust and reliable position sensor type available. The strength of the LVDT sensor's principle is that there is no electrical contact across the transducer position sensing element which for the user of the sensor means clean data, infinite resolution and a very long life.

Our DC to DC LVDT transducer has all of the benefits of the LVDT sensor principle with the added convenience of built-in LVDT electronics enabling a dc supply and dc output. As an option we can offer a 4-20mA 2 wire connection to the transducer on some models.

This series of displacement transducer is available as either an unguided, captive or spring return version.

### Captive guided version.

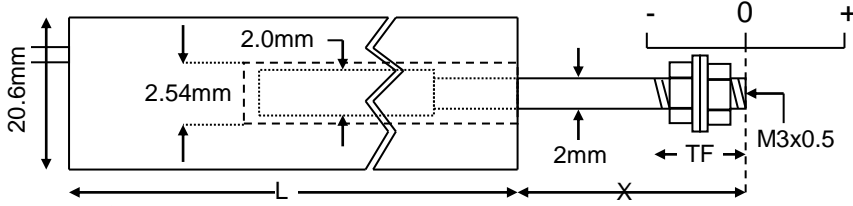


Our captive guided displacement transducer has bearings to guide the armature inside the measurement sensor. Captive LVDTs are for position measurement applications where guidance may be poor and end bearings may be required.

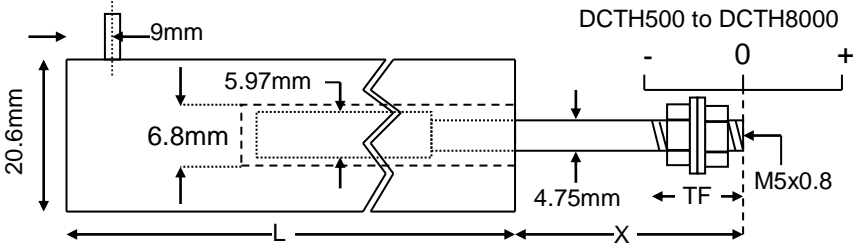
Type	Range	Linearity error (% F.S.)	L	X	D3	Total weight	TF	Inward over-travel	Outward over-travel
DCTH500C	±12.5mm	<±0.5/±0.25/±0.1	194mm	38mm	4.75mm	340g	15mm	10mm	12mm
DCTH1000C	±25mm	<±0.5/±0.25/±0.1	222mm	63mm	4.75mm	398g	15mm	13mm	10mm
DCTH2000C	±50mm	<±0.5/±0.25/±0.1	336mm	76mm	4.75mm	511g	15mm	10mm	14mm
DCTH3000C	±75mm	<±0.5/±0.25/±0.1	448mm	114mm	4.75mm	625g	15mm	24mm	15mm
DCTH4000C	±100mm	<±0.5/±0.25/±0.1	494mm	127mm	4.75mm	767g	15mm	8mm	14mm
DCTH6000C	±150mm	<±0.5/±0.25	684mm	178mm	4.75mm	1.0kg	15mm	12mm	17mm
DCTH8000C	±200mm	<±0.5/±0.25	875mm	254mm	4.75mm	1.4kg	32mm	22mm	25mm
DCTH10000C	±250mm	<±0.5/±0.25	1067mm	305mm	4.75mm	1.7kg	27mm	34mm	35mm
DCTH15000C	±375mm	<±0.5	1473mm	406mm	4.75mm	2.2kg	19mm	13mm	13mm
DCTH18500C	±470mm	<±0.5	1740mm	508mm	6.00mm	2.6kg	27mm	5mm	33mm

## Unguided version.

DCTH100 to DCTH400



DCTH500 to DCTH8000

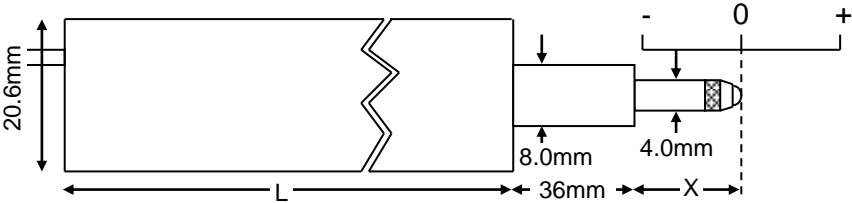


On our unguided LVDTs the armature assembly is a separate component, to make a measurement the user must guide the armature inside the body without touching the sides. Unguided position measurement transducers are appropriate where external guidance is available and give truly non-contact operation

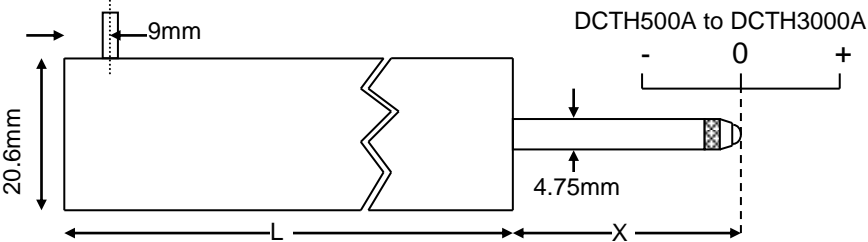
Type	Range	Linearity error (% F.S.)	L	X	Total weight	Armature weight	TF	Inward over-travel
DCTH100	±2.5mm	<±0.5/±0.25/±0.1	64mm	33mm	74g	1.4g	18mm	11.6mm
DCTH200	±5mm	<±0.5/±0.25/±0.1	64mm	33mm	74g	1.8g	18mm	9.0mm
DCTH300	±7.5mm	<±0.5/±0.25/±0.1	64mm	33mm	74g	1.8g	18mm	6.5mm
DCTH400	±10mm	<±0.5/±0.25	64mm	33mm	74g	1.9g	18mm	3.9mm
DCTH500	±12.5mm	<±0.5/±0.25/±0.1	175mm	43mm	213g	17g	15mm	16mm
DCTH1000	±25mm	<±0.5/±0.25/±0.1	203mm	69mm	270g	23g	15mm	22mm
DCTH2000	±50mm	<±0.5/±0.25/±0.1	317mm	81mm	369g	37g	15mm	16mm
DCTH3000	±75mm	<±0.5/±0.25/±0.1	430mm	119mm	497g	55g	15mm	29mm
DCTH4000	±100mm	<±0.5/±0.25/±0.1	475mm	132mm	625g	71g	15mm	16mm
DCTH6000	±150mm	<±0.5/±0.25	666mm	183mm	852g	100g	15mm	16mm
DCTH8000	±200mm	<±0.5/±0.25	856mm	259mm	1.3kg	140g	29mm	27mm

## Spring return version.

DCTH100AG to DCTH400AG



DCTH500A to DCTH3000A



Our spring displacement transducer has bearings to guide the armature inside the measurement sensor and a spring which pushes the armature to the fully out position. Spring return LVDTs are appropriate where it is not possible to connect the transducer armature to the moving component being measured.

Type	Range	Linearity error (% F.S.)	L	X	Total weight	Spring force at X	Spring rate	Inward over-travel	Outward over-travel
DCTH100AG	±2.5mm	<±0.5/±0.25/±0.1	64mm	12mm	83g	1.0N	0.9N/cm	2.2mm	1.3mm
DCTH200AG	±5mm	<±0.5/±0.25/±0.1	64mm	13mm	83g	1.0N	0.8N/cm	0.3mm	1.3mm
DCTH300AG	±7.5mm	<±0.5/±0.25/±0.1	64mm	18mm	83g	1.5N	0.6N/cm	1.4mm	1.3mm
DCTH400AG	±10mm	<±0.5/±0.25	64mm	22mm	83g	1.8N	0.8N/cm	1.3mm	1.3mm
DCTH500A	±12.5mm	<±0.5/±0.25/±0.1	182mm	38mm	227g	1.3N	0.2N/cm	1.0mm	13mm
DCTH1000A	±25mm	<±0.5/±0.25/±0.1	210mm	63mm	284g	2.0N	0.3N/cm	3.0mm	10mm
DCTH2000A	±50mm	<±0.5/±0.25/±0.1	324mm	75mm	398g	1.8N	0.2N/cm	8mm	14mm
DCTH3000A	±75mm	<±0.5/±0.25/±0.1	436mm	114mm	511g	6.0N	0.4N/cm	15mm	15mm

Specification		
V output	Supply voltage (dual)	±12V to ±20V dc, 30mA
	Supply voltage (single, must be floating)	24V to 40V dc, 30mA
	Change in output for change in supply	5mV/V
	Output load	10kOhms
	Output ripple	30mV (peak-to-peak)
	Electrical output bandwidth	200Hz
	Output impedance	2 Ohms
	Operating temperature range	-40°C to 80°C
4-20mA output (>=±12.5mm)	Supply voltage	12V to 36V dc
	Max loop resistance	(Supply voltage-11) x 50 Ohms
	Output ripple	50uA (peak-to-peak)
	Electrical output bandwidth	200Hz
Both outputs	Operating temperature range	-10°C to 70°C
	Temperature coefficient (zero)	±0.01% F.S. /°C (typical)
	Temperature coefficient (span)	±0.03% F.S. /°C (typical)
	Electrical termination	2m (integral cable) Longer available to order.

Output details (outputs 1 and 2 selected using different connections)				
Option code	Note	- position	0	+ position
Standard	Output 1	0V	5V	10V (+0% - 5%)
Standard	Output 2	-5V (+0% - 5%)	0V	+5V (+0% - 5%)
TM0627	Output 1	10V (+0% - 5%)	5V	0V
TM0627	Output 2	+5V (+0% - 5%)	0V	-5V (+0% - 5%)
TM0321A	>=±12.5mm	4mA	12mA	20mA
TM0321B	>=±12.5mm	20mA	12mA	4mA

All dimensions and specifications are nominal.

Due to our policy of on-going development, specifications may change without notice. Any modification may affect some or all of the specifications for our equipment.

UK Head Office  
RDP Electronics Ltd  
Grove Street, Heath Town  
Wolverhampton, West Midlands, WV10 0PY  
United Kingdom  
Tel: +44 1902 457512  
Fax: +44 1902 452000  
Email: sales@rdpe.com  
URL: www.rdpe.com  
Registered in England No. 1688591

## Ball Lock Pins• self-locking, with standard handle

22380.0029



### Product Description

For quick fastening, locking, adjusting, changing and securing. Quickly and easily unlockable for frequently repeated connections.

All versions are corrosion resistant. When using stainless steel 1.4542: high-strength, hardened, abrasion resistant pin with high load capacity.

Compact design with standard handle.

### Material

Pin part

- Stainless steel 1.4542, precipitation-hardened

Spring

- stainless steel

### Operation

The balls are unlocked by pressing the knob.

### Characteristic

Types from stainless steel 1.4542 with marking below the balls.

### More information

### Notes

Special types on request.

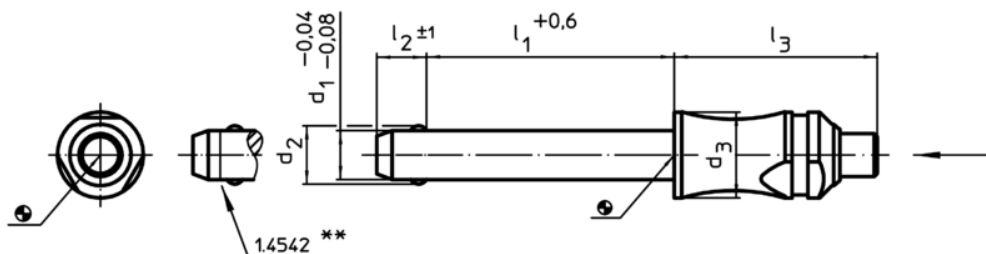
### Accessories

Can easily be fitted with retaining cable EH 22400.

### Further products

- Ball Lock Pins, self-locking, with standard handle, titanium
- Locating Bushings, for ball lock pins and socket pins
- Locating Bushings, with flange, for ball lock pins and socket pins
- Retaining Cables
- Positioning Bushings, with collar, DIN 172 A
- Positioning Bushings, without collar, DIN 179 A

### Drawing



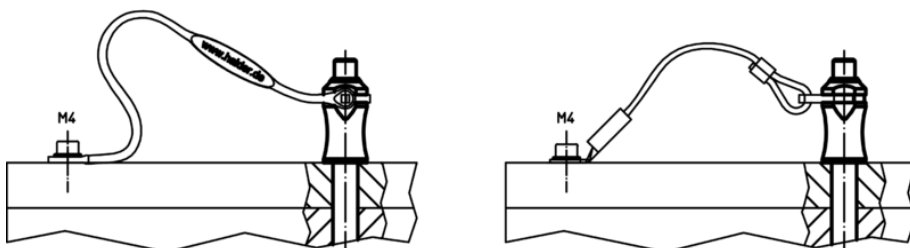
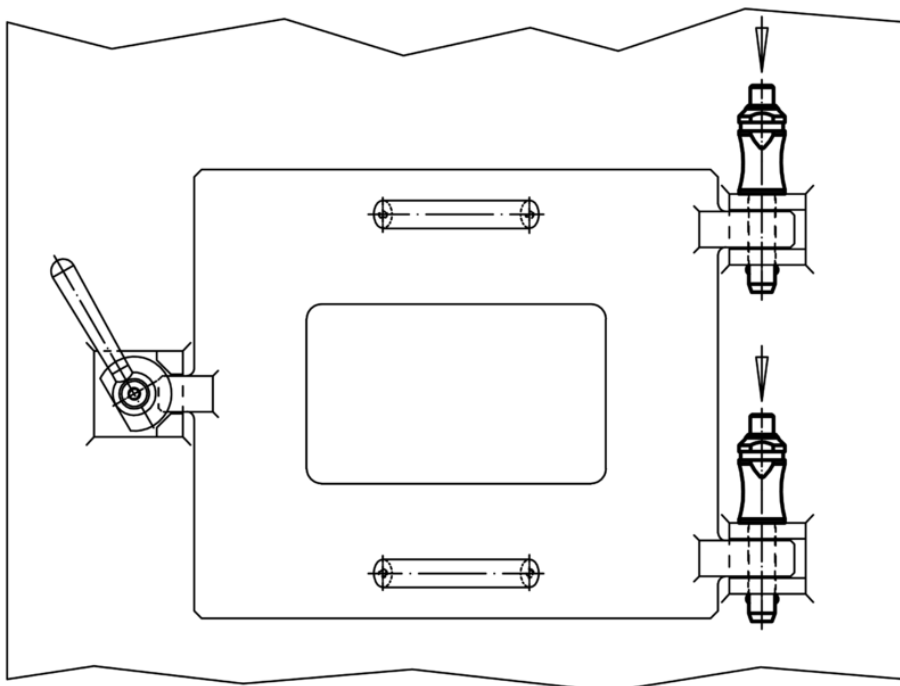
\*\* Types from stainless steel 1.4542 with marking.

### Order information

Dimensions						Location hole H11	max.		Shearing resistance, two-shear <sup>1)</sup> min.	Art. No.
d <sub>1</sub>	l <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	l <sub>2</sub> ±1	l <sub>3</sub>		°C	[g]	[kN]	
-0.04 -0.08	+0.6					[mm]	[°C]	[g]	[kN]	
stainless steel										
6	45	7	10	7	26.2	6	250	18	35	22380.0029

<sup>1)</sup> Shearing resistance similar to DIN 50141

Application example



## Ball Lock Pins• self-locking, with standard handle

22380.0069



### Product Description

For quick fastening, locking, adjusting, changing and securing. Quickly and easily unlockable for frequently repeated connections.

All versions are corrosion resistant. When using stainless steel 1.4542: high-strength, hardened, abrasion resistant pin with high load capacity.

Compact design with standard handle.

### Material

Pin part

- Stainless steel 1.4542, precipitation-hardened

Spring

- stainless steel

### Operation

The balls are unlocked by pressing the knob.

### Characteristic

Types from stainless steel 1.4542 with marking below the balls.

### More information

### Notes

Special types on request.

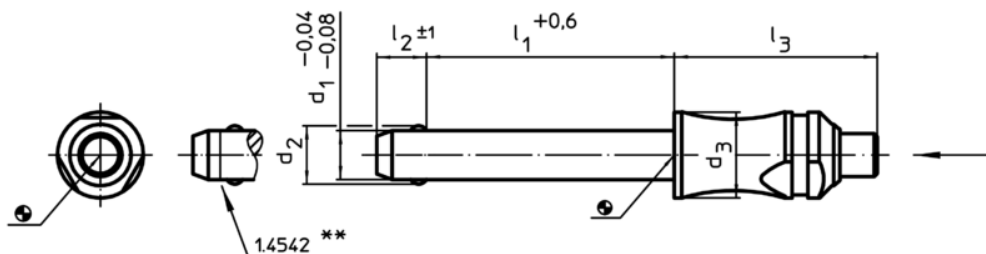
### Accessories

Can easily be fitted with retaining cable EH 22400.

### Further products

- Ball Lock Pins, self-locking, with standard handle, titanium
- Locating Bushings, for ball lock pins and socket pins
- Locating Bushings, with flange, for ball lock pins and socket pins
- Retaining Cables
- Positioning Bushings, with collar, DIN 172 A
- Positioning Bushings, without collar, DIN 179 A

### Drawing



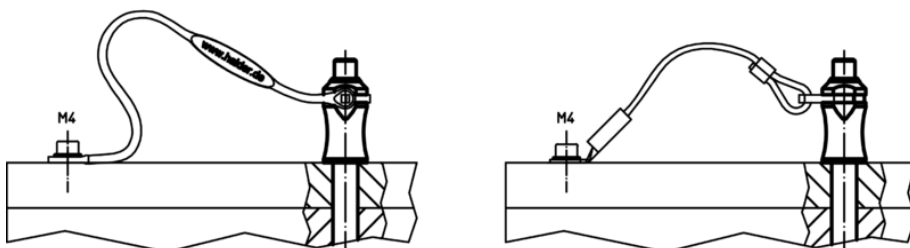
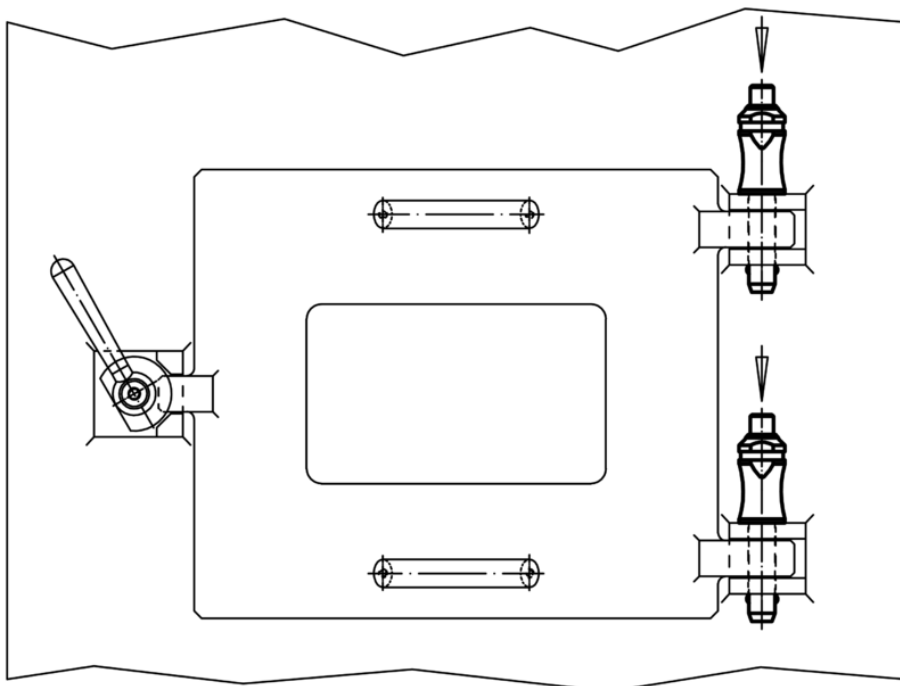
\*\* Types from stainless steel 1.4542 with marking.

### Order information

Dimensions						Location hole H11	max.		Shearing resistance, two-shear <sup>1)</sup> min.	Art. No.
d <sub>1</sub>	l <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	l <sub>2</sub>	l <sub>3</sub>		°C	[g]	[kN]	
-0.04 -0.08	+0.6			±1						
[mm]						[mm]	[°C]	[g]	[kN]	
stainless steel										
12	45	14.5	20	10.6	39.5	12	250	101	144	22380.0069

<sup>1)</sup> Shearing resistance similar to DIN 50141

Application example



## Ball Lock Pins• self-locking, with standard handle EH 22370. /EH 22380.



### Product Description

For quick fastening, locking, adjusting, changing and securing. Quickly and easily unlockable for frequently repeated connections.

All versions are corrosion resistant. When using stainless steel 1.4542: high-strength, hardened, abrasion resistant pin with high load capacity. Compact design with standard handle.

### Material

Pin part

- Stainless steel 1.4305
- Stainless steel 1.4542, precipitation-hardened

Spring

- stainless steel

### Operation

The balls are unlocked by pressing the knob.

### Characteristic

Types from stainless steel 1.4542 with marking below the balls.

### More information

### Notes

Special types on request.

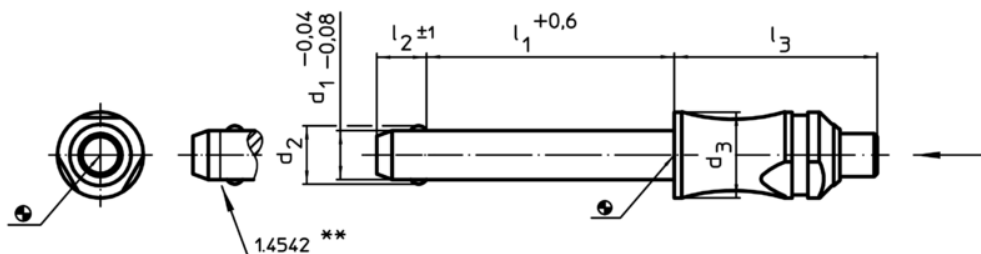
### Accessories

Can easily be fitted with retaining cable EH 22400.

### Further products

- Ball Lock Pins, self-locking, with standard handle, titanium
- Locating Bushings, for ball lock pins and socket pins
- Locating Bushings, with flange, for ball lock pins and socket pins
- Retaining Cables
- Positioning Bushings, with collar, DIN 172 A
- Positioning Bushings, without collar, DIN 179 A

### Drawing





\*\* Types from stainless steel 1.4542 with marking.



### Order information

Dimensions						Location hole H11	🌡️ max.	🏋️ [g]	Shearing resistance, two-shear <sup>1)</sup> min.	Art. No.
d <sub>1</sub>	l <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	l <sub>2</sub>	l <sub>3</sub>	[mm]	[°C]	[g]	[kN]	
-0.04 -0.08	+0.6			±1						
[mm]										
Stainless steel 1.4305										
5	10	5.5	10	6.0	26.2	5	250	10	14	22370.0012
5	15	5.5	10	6.0	26.2	5	250	11	14	22370.0013
5	20	5.5	10	6.0	26.2	5	250	12	14	22370.0014
5	25	5.5	10	6.0	26.2	5	250	13	14	22370.0015
5	30	5.5	10	6.0	26.2	5	250	13	14	22370.0016
5	35	5.5	10	6.0	26.2	5	250	14	14	22370.0017
5	40	5.5	10	6.0	26.2	5	250	15	14	22370.0018



<sup>1)</sup> Shearing resistance similar to DIN 50141

d <sub>1</sub> -0.04 -0.08	l <sub>1</sub> +0.6	Dimensions				l <sub>2</sub> ±1	l <sub>3</sub>	Location hole H11	 max.	 [g]	Shearing resistance, two-shear <sup>1)</sup> min.	Art. No.
		d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	[mm]								
5	45	5.5	10	6.0	26.2	5	250	15	14	22370.0007		
5	50	5.5	10	6.0	26.2	5	250	16	14	22370.0008		
5	60	5.5	10	6.0	26.2	5	250	17	14	22370.0009		
5	70	5.5	10	6.0	26.2	5	250	19	14	22370.0010		
5	80	5.5	10	6.0	26.2	5	250	20	14	22370.0011		
6	10	7.0	10	7.0	26.2	6	250	11	21	22370.0022		
6	15	7.0	10	7.0	26.2	6	250	12	21	22370.0023		
6	20	7.0	10	7.0	26.2	6	250	13	21	22370.0024		
6	25	7.0	10	7.0	26.2	6	250	14	21	22370.0025		
6	30	7.0	10	7.0	26.2	6	250	15	21	22370.0026		
6	35	7.0	10	7.0	26.2	6	250	16	21	22370.0027		
6	40	7.0	10	7.0	26.2	6	250	17	21	22370.0028		
6	45	7.0	10	7.0	26.2	6	250	18	21	22370.0029		
6	50	7.0	10	7.0	26.2	6	250	19	21	22370.0030		
6	60	7.0	10	7.0	26.2	6	250	21	21	22370.0019		
6	70	7.0	10	7.0	26.2	6	250	23	21	22370.0020		
6	80	7.0	10	7.0	26.2	6	250	25	21	22370.0021		
8	10	9.5	14	8.2	33.1	8	250	29	38	22370.0032		
8	15	9.5	14	8.2	33.1	8	250	31	38	22370.0033		
8	20	9.5	14	8.2	33.1	8	250	33	38	22370.0034		
8	25	9.5	14	8.2	33.1	8	250	34	38	22370.0035		
8	30	9.5	14	8.2	33.1	8	250	36	38	22370.0036		
8	35	9.5	14	8.2	33.1	8	250	38	38	22370.0037		
8	40	9.5	14	8.2	33.1	8	250	40	38	22370.0038		
8	45	9.5	14	8.2	33.1	8	250	42	38	22370.0039		
8	50	9.5	14	8.2	33.1	8	250	44	38	22370.0040		
8	60	9.5	14	8.2	33.1	8	250	47	38	22370.0031		
8	70	9.5	14	8.2	33.1	8	250	51	38	22370.0041		
8	80	9.5	14	8.2	33.1	8	250	55	38	22370.0042		
8	90	9.5	14	8.2	33.1	8	250	58	38	22370.0043		
8	100	9.5	14	8.2	33.1	8	250	62	38	22370.0051		
10	15	12.0	14	9.6	33.1	10	250	36	60	22370.0059		
10	20	12.0	14	9.6	33.1	10	250	39	60	22370.0044		
10	25	12.0	14	9.6	33.1	10	250	42	60	22370.0045		
10	30	12.0	14	9.6	33.1	10	250	45	60	22370.0046		
10	35	12.0	14	9.6	33.1	10	250	48	60	22370.0047		
10	40	12.0	14	9.6	33.1	10	250	51	60	22370.0048		
10	45	12.0	14	9.6	33.1	10	250	54	60	22370.0049		
10	50	12.0	14	9.6	33.1	10	250	57	60	22370.0050		
10	60	12.0	14	9.6	33.1	10	250	63	60	22370.0052		
10	70	12.0	14	9.6	33.1	10	250	69	60	22370.0053		
10	80	12.0	14	9.6	33.1	10	250	74	60	22370.0054		
10	90	12.0	14	9.6	33.1	10	250	80	60	22370.0055		
10	100	12.0	14	9.6	33.1	10	250	86	60	22370.0056		
10	110	12.0	14	9.6	33.1	10	250	92	60	22370.0057		
10	120	12.0	14	9.6	33.1	10	250	98	60	22370.0058		
12	20	14.5	20	10.6	39.5	12	250	80	87	22370.0064		
12	25	14.5	20	10.6	39.5	12	250	84	87	22370.0065		
12	30	14.5	20	10.6	39.5	12	250	88	87	22370.0066		
12	35	14.5	20	10.6	39.5	12	250	92	87	22370.0067		
12	40	14.5	20	10.6	39.5	12	250	96	87	22370.0068		
12	45	14.5	20	10.6	39.5	12	250	101	87	22370.0069		
12	50	14.5	20	10.6	39.5	12	250	105	87	22370.0070		
12	60	14.5	20	10.6	39.5	12	250	113	87	22370.0072		
12	70	14.5	20	10.6	39.5	12	250	122	87	22370.0074		
12	80	14.5	20	10.6	39.5	12	250	130	87	22370.0076		
12	90	14.5	20	10.6	39.5	12	250	139	87	22370.0060		
12	100	14.5	20	10.6	39.5	12	250	148	87	22370.0061		
12	110	14.5	20	10.6	39.5	12	250	157	87	22370.0062		

1) Shearing resistance similar to DIN 50141

d <sub>1</sub> -0.04 -0.08	l <sub>1</sub> +0.6	Dimensions				l <sub>2</sub> ±1	l <sub>3</sub>	Location hole H11	 max.	 [g]	Shearing resistance, two-shear <sup>1)</sup> min.	Art. No.
		d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	[mm]								
12	120	14.5	20	10.6	39.5	12	250	165	87	22370.0063		
16	30	19.0	20	14.0	39.5	16	250	120	155	22370.0086		
16	35	19.0	20	14.0	39.5	16	250	127	155	22370.0087		
16	40	19.0	20	14.0	39.5	16	250	135	155	22370.0088		
16	45	19.0	20	14.0	39.5	16	250	143	155	22370.0089		
16	50	19.0	20	14.0	39.5	16	250	150	155	22370.0090		
16	60	19.0	20	14.0	39.5	16	250	166	155	22370.0092		
16	70	19.0	20	14.0	39.5	16	250	181	155	22370.0094		
16	80	19.0	20	14.0	39.5	16	250	196	155	22370.0096		
16	90	19.0	20	14.0	39.5	16	250	216	155	22370.0097		
16	100	19.0	20	14.0	39.5	16	250	233	155	22370.0098		
16	110	19.0	20	14.0	39.5	16	250	248	155	22370.0099		
16	120	19.0	20	14.0	39.5	16	250	263	155	22370.0100		
16	130	19.0	20	14.0	39.5	16	250	279	155	22370.0101		
16	140	19.0	20	14.0	39.5	16	250	295	155	22370.0102		
16	150	19.0	20	14.0	39.5	16	250	310	155	22370.0103		
20	50	25.0	28	20.5	49.9	20	250	303	244	22370.0111		
20	60	25.0	28	20.5	49.9	20	250	322	244	22370.0112		
20	70	25.0	28	20.5	49.9	20	250	351	244	22370.0113		
20	80	25.0	28	20.5	49.9	20	250	370	244	22370.0116		
20	90	25.0	28	20.5	49.9	20	250	400	244	22370.0117		
20	100	25.0	28	20.5	49.9	20	250	414	244	22370.0120		
20	110	25.0	28	20.5	49.9	20	250	448	244	22370.0121		
20	120	25.0	28	20.5	49.9	20	250	466	244	22370.0124		
20	130	25.0	28	20.5	49.9	20	250	497	244	22370.0125		
20	140	25.0	28	20.5	49.9	20	250	520	244	22370.0126		
20	150	25.0	28	20.5	49.9	20	250	545	244	22370.0127		
25	50	30.8	28	22.0	49.9	25	250	395	386	22370.0129		
25	60	30.8	28	22.0	49.9	25	250	432	386	22370.0130		
25	70	30.8	28	22.0	49.9	25	250	470	386	22370.0131		
25	80	30.8	28	22.0	49.9	25	250	507	386	22370.0132		
25	90	30.8	28	22.0	49.9	25	250	545	386	22370.0133		
25	100	30.8	28	22.0	49.9	25	250	582	386	22370.0134		
25	110	30.8	28	22.0	49.9	25	250	620	386	22370.0135		
25	120	30.8	28	22.0	49.9	25	250	657	386	22370.0136		
25	130	30.8	28	22.0	49.9	25	250	695	386	22370.0137		
25	140	30.8	28	22.0	49.9	25	250	732	386	22370.0138		
25	150	30.8	28	22.0	49.9	25	250	770	386	22370.0139		
Stainless steel 1.4542, precipitation-hardened												
5	10	5.5	10	6.0	26.2	5	250	10	24	22380.0012		
5	15	5.5	10	6.0	26.2	5	250	11	24	22380.0013		
5	20	5.5	10	6.0	26.2	5	250	12	24	22380.0014		
5	25	5.5	10	6.0	26.2	5	250	13	24	22380.0015		
5	30	5.5	10	6.0	26.2	5	250	13	24	22380.0016		
5	35	5.5	10	6.0	26.2	5	250	14	24	22380.0017		
5	40	5.5	10	6.0	26.2	5	250	15	24	22380.0018		
5	45	5.5	10	6.0	26.2	5	250	15	24	22380.0007		
5	50	5.5	10	6.0	26.2	5	250	16	24	22380.0008		
5	60	5.5	10	6.0	26.2	5	250	17	24	22380.0009		
5	70	5.5	10	6.0	26.2	5	250	19	24	22380.0010		
5	80	5.5	10	6.0	26.2	5	250	20	24	22380.0011		
6	10	7.0	10	7.0	26.2	6	250	11	35	22380.0022		
6	15	7.0	10	7.0	26.2	6	250	12	35	22380.0023		
6	20	7.0	10	7.0	26.2	6	250	13	35	22380.0024		
6	25	7.0	10	7.0	26.2	6	250	14	35	22380.0025		
6	30	7.0	10	7.0	26.2	6	250	15	35	22380.0026		
6	35	7.0	10	7.0	26.2	6	250	16	35	22380.0027		
6	40	7.0	10	7.0	26.2	6	250	17	35	22380.0028		

<sup>1)</sup> Shearing resistance similar to DIN 50141

d <sub>1</sub> -0.04 -0.08	l <sub>1</sub> +0.6	Dimensions				l <sub>2</sub> ±1	l <sub>3</sub>	Location hole H11	 max.	 [g]	Shearing resistance, two-shear <sup>1)</sup> min.	Art. No.
		d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	[mm]								
6	45	7.0	10	7.0	26.2	6	250	18	35	22380.0029		
6	50	7.0	10	7.0	26.2	6	250	19	35	22380.0030		
6	60	7.0	10	7.0	26.2	6	250	21	35	22380.0019		
6	70	7.0	10	7.0	26.2	6	250	23	35	22380.0020		
6	80	7.0	10	7.0	26.2	6	250	25	35	22380.0021		
8	10	9.5	14	8.2	33.1	8	250	29	63	22380.0032		
8	15	9.5	14	8.2	33.1	8	250	31	63	22380.0033		
8	20	9.5	14	8.2	33.1	8	250	33	63	22380.0034		
8	25	9.5	14	8.2	33.1	8	250	34	63	22380.0035		
8	30	9.5	14	8.2	33.1	8	250	36	63	22380.0036		
8	35	9.5	14	8.2	33.1	8	250	38	63	22380.0037		
8	40	9.5	14	8.2	33.1	8	250	40	63	22380.0038		
8	45	9.5	14	8.2	33.1	8	250	42	63	22380.0039		
8	50	9.5	14	8.2	33.1	8	250	44	63	22380.0040		
8	60	9.5	14	8.2	33.1	8	250	47	63	22380.0031		
8	70	9.5	14	8.2	33.1	8	250	51	63	22380.0041		
8	80	9.5	14	8.2	33.1	8	250	55	63	22380.0042		
8	90	9.5	14	8.2	33.1	8	250	58	63	22380.0043		
8	100	9.5	14	8.2	33.1	8	250	62	63	22380.0051		
10	15	12.0	14	9.6	33.1	10	250	36	100	22380.0059		
10	20	12.0	14	9.6	33.1	10	250	39	100	22380.0044		
10	25	12.0	14	9.6	33.1	10	250	42	100	22380.0045		
10	30	12.0	14	9.6	33.1	10	250	45	100	22380.0046		
10	35	12.0	14	9.6	33.1	10	250	48	100	22380.0047		
10	40	12.0	14	9.6	33.1	10	250	51	100	22380.0048		
10	45	12.0	14	9.6	33.1	10	250	54	100	22380.0049		
10	50	12.0	14	9.6	33.1	10	250	57	100	22380.0050		
10	60	12.0	14	9.6	33.1	10	250	63	100	22380.0052		
10	70	12.0	14	9.6	33.1	10	250	69	100	22380.0053		
10	80	12.0	14	9.6	33.1	10	250	74	100	22380.0054		
10	90	12.0	14	9.6	33.1	10	250	80	100	22380.0055		
10	100	12.0	14	9.6	33.1	10	250	86	100	22380.0056		
10	110	12.0	14	9.6	33.1	10	250	92	100	22380.0057		
10	120	12.0	14	9.6	33.1	10	250	98	100	22380.0058		
12	20	14.5	20	10.6	39.5	12	250	80	144	22380.0064		
12	25	14.5	20	10.6	39.5	12	250	84	144	22380.0065		
12	30	14.5	20	10.6	39.5	12	250	88	144	22380.0066		
12	35	14.5	20	10.6	39.5	12	250	92	144	22380.0067		
12	40	14.5	20	10.6	39.5	12	250	96	144	22380.0068		
12	45	14.5	20	10.6	39.5	12	250	101	144	22380.0069		
12	50	14.5	20	10.6	39.5	12	250	105	144	22380.0070		
12	60	14.5	20	10.6	39.5	12	250	113	144	22380.0072		
12	70	14.5	20	10.6	39.5	12	250	122	144	22380.0074		
12	80	14.5	20	10.6	39.5	12	250	130	144	22380.0076		
12	90	14.5	20	10.6	39.5	12	250	139	144	22380.0060		
12	100	14.5	20	10.6	39.5	12	250	148	144	22380.0061		
12	110	14.5	20	10.6	39.5	12	250	157	144	22380.0062		
12	120	14.5	20	10.6	39.5	12	250	165	144	22380.0063		
16	30	19.0	20	14.0	39.5	16	250	120	257	22380.0086		
16	35	19.0	20	14.0	39.5	16	250	127	257	22380.0087		
16	40	19.0	20	14.0	39.5	16	250	135	257	22380.0088		
16	45	19.0	20	14.0	39.5	16	250	143	257	22380.0089		
16	50	19.0	20	14.0	39.5	16	250	150	257	22380.0090		
16	60	19.0	20	14.0	39.5	16	250	166	257	22380.0092		
16	70	19.0	20	14.0	39.5	16	250	181	257	22380.0094		
16	80	19.0	20	14.0	39.5	16	250	196	257	22380.0096		
16	90	19.0	20	14.0	39.5	16	250	216	257	22380.0097		
16	100	19.0	20	14.0	39.5	16	250	233	257	22380.0098		
16	110	19.0	20	14.0	39.5	16	250	248	257	22380.0099		

1) Shearing resistance similar to DIN 50141

d <sub>1</sub> -0.04 -0.08	l <sub>1</sub> +0.6	Dimensions				l <sub>2</sub> ±1	l <sub>3</sub>	Location hole H11  [mm]	🌡️ max.  [°C]	📦  [g]	Shearing resistance, two-shear <sup>1)</sup> min.  [kN]	Art. No.
		d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	[mm]								
16	120	19.0	20	14.0	39.5	16	250	263	257	22380.0100		
16	130	19.0	20	14.0	39.5	16	250	279	257	22380.0101		
16	140	19.0	20	14.0	39.5	16	250	295	257	22380.0102		
16	150	19.0	20	14.0	39.5	16	250	310	257	22380.0103		
20	50	25.0	28	20.5	49.9	20	250	303	403	22380.0111		
20	60	25.0	28	20.5	49.9	20	250	322	403	22380.0112		
20	70	25.0	28	20.5	49.9	20	250	351	403	22380.0113		
20	80	25.0	28	20.5	49.9	20	250	370	403	22380.0116		
20	90	25.0	28	20.5	49.9	20	250	400	403	22380.0117		
20	100	25.0	28	20.5	49.9	20	250	414	403	22380.0120		
20	110	25.0	28	20.5	49.9	20	250	448	403	22380.0121		
20	120	25.0	28	20.5	49.9	20	250	466	403	22380.0124		
20	130	25.0	28	20.5	49.9	20	250	497	403	22380.0125		
20	140	25.0	28	20.5	49.9	20	250	520	403	22380.0126		
20	150	25.0	28	20.5	49.9	20	250	545	403	22380.0127		
25	50	30.8	28	22.0	49.9	25	250	395	631	22380.0129		
25	60	30.8	28	22.0	49.9	25	250	432	631	22380.0130		
25	70	30.8	28	22.0	49.9	25	250	470	631	22380.0131		
25	80	30.8	28	22.0	49.9	25	250	507	631	22380.0132		
25	90	30.8	28	22.0	49.9	25	250	545	631	22380.0133		
25	100	30.8	28	22.0	49.9	25	250	582	631	22380.0134		
25	110	30.8	28	22.0	49.9	25	250	620	631	22380.0135		
25	120	30.8	28	22.0	49.9	25	250	657	631	22380.0136		
25	130	30.8	28	22.0	49.9	25	250	695	631	22380.0137		
25	140	30.8	28	22.0	49.9	25	250	732	631	22380.0138		
25	150	30.8	28	22.0	49.9	25	250	770	631	22380.0139		

<sup>1)</sup> Shearing resistance similar to DIN 50141

### Application example



