

A presente dissertação apresenta o projecto desenvolvido em colaboração com o Grupo de Adesivos do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto com a finalidade da concretização da conclusão do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica.

.

Ruben Fernando Guedes Cardoso

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica

Rua Dr. Roberto Frias
4200 - 465 Porto
Portugal

em04099@fe.up.pt

Neste trabalho gostaria de expressar os meus mais sinceros agradecimentos ao Engenheiro Filipe Palhares Chaves e ao Professor Lucas Filipe Martins da Silva pelo incentivo e apoio, orientação, compreensão e disponibilidade prestados e pelo espírito autodidacta que sempre me incutiram ao longo deste trabalho.

Um agradecimento ao Sr. José e ao Sr. Albino que contribuíram para concretização deste projecto.

À minha família e amigos pelo carinho e pela compreensão.

Agradeço aos meus colegas e amigos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela amizade e pelo incentivo.

A todos aqueles que me ajudaram e aqui não foram referidos um muito obrigado.

Resumo

A aplicação de adesivos tem aumentado nos últimos anos uma vez que a sua utilização traz bastantes vantagens relativamente a aplicações concorrentes. Neste trabalho pretende-se desenvolver um dispositivo que permita determinar a resistência do adesivo num provete Double Cantilever Beam (DCB) à propagação de fendas em modo misto I e II.

O conhecimento da taxa de libertação de energia em modo misto é importante para efectuar a concepção e o dimensionamento de juntas adesivas reais em que o carregamento é complexo.

Para aplicar uma solicitação mista desenvolveu-se um dispositivo com base naquele proposto por Fernlund e Spelt, que promove esforços normais e de corte simultaneamente.

As forças para as quais o dispositivo de modo misto foi dimensionado são as forças máximas obtidas nos ensaios mais relevantes e mais estudados para cada um dos modos simples: DCB no caso do modo I e End Notched Flexure (ENF) no caso do modo II, concretizando as simulações e o dimensionamento dos componentes do dispositivo no programa SolidWorks® para que este suporte as solicitações máximas previstas quando os ensaios em modo misto forem efectuados.

Abstract

Recently, adhesive joints are increasingly applied because they bring a large number of advantages when compared to other joining solutions. In the present thesis, an apparatus to load a double cantilever beam (DCB) specimen in mixed mode I and II and measure the adhesive toughness is developed.

The adhesive toughness (or strain energy release rate) is an important parameter to design real adhesive joints that are subjected to a complex loading.

A loading device based on that proposed by Fernlund and Spelt was designed which permit to apply shearing a tensile loads at the same time.

To design the apparatus, the maximum loads seen in service for DCB in the case of mode I and End Notched Flexure (ENF) in the case of mode II were considered. The loading device was simulated in the programme SolidWorks to make sure that each component of the device can support the loads involved when a specimen is loaded in mixed mode.

Conteúdo

Resumo	5
Abstract	6
1 - Introdução	19
1.1 - Definição do problema	19
1.2 - Objectivos	20
1.3 - Metodologia	20
1.4 Plano da tese	20
2 – Revisão Bibliográfica	22
2.1 – Adesivos	22
2.2 – Mecânica da Fractura	25
2.3 – Ensaios de Fractura	29
2.3.1 – Ensaios de juntas adesivas em modo I.....	30
2.3.1.1 – Double Cantilever Beam (DCB)	31
2.3.1.2 – Tapered Double Cantilever Beam (TDCB).....	33
2.3.1.3 – Wedged test.....	35
2.3.2 – Ensaios de juntas adesivas em modo II.....	36
2.3.2.1 End Loaded Split (ELS)	36
2.3.2.2 – Four-point End Notched Flexure (4ENF)	38
2.3.2.3 – End Notched Flexure (ENF).....	40
2.3.3 – Ensaios de juntas adesivas em modo misto	43
2.3.3.1 – Asymmetric Double Cantilever Beam	44
2.3.3.2 – Assymmetric Tapered Double Cantilever Beam	48
2.3.3.3 – Mixed-Mode Bending (MMB)	50
2.3.3.4 – Single Leg Bending (SLB).....	53
2.3.3.5 – Fernlund–Spelt.....	56
3 – Descrição do modelo do dispositivo de modo misto.....	60
3.1 – Geometria do dispositivo.....	60
3.2 – Programas utilizados.....	63
3.3 – Malha e respectivos elementos.....	65
3.4 – Critérios de Resistência	68
3.4.1 – Material	68

3.4.2 – Critério de Von Mises.....	69
4 – Resultados da modelação do dispositivo de modo misto	70
4.1 – Diagrama de forças actuando sobre um provete	70
4.2 – Dimensionamento dos componentes do dispositivo	73
4.2.1 – Actuador	74
4.2.2– Viga de apoio superior	80
4.2.3 – Fixador do provete	84
4.2.4 - Peça de ligação viga de apoio superior – liga de apoio inferior	87
4.2.5 - Viga de apoio inferior	89
4.2.6 - Peça de ligação dispositivo-base.....	91
4.2.8 - Base	96
4.2.9 - Fixador base-MTS	98
5 - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	100
5.1 – Conclusões	100
Referências	104
Anexos	108
Desenhos técnicos dos componentes do dispositivo	110
Desenho de conjunto	Erro! Marcador não definido.
Actuador	Erro! Marcador não definido.
Viga de apoio superior	Erro! Marcador não definido.
Elemento de fixação do provete	Erro! Marcador não definido.
Ligação de vigas de apoio superior e inferior	Erro! Marcador não definido.
Viga de apoio inferior	Erro! Marcador não definido.
Ligação dispositivo-base.....	Erro! Marcador não definido.
Fixador dispositivo-base	Erro! Marcador não definido.
Base.....	Erro! Marcador não definido.
Fixador base-MTS	Erro! Marcador não definido.
Guia da barra de suporte do provete	Erro! Marcador não definido.
Varão roscado para suporte inferior	Erro! Marcador não definido.
Varão roscado para suporte superior	Erro! Marcador não definido.
Apoio do provete.....	Erro! Marcador não definido.

Lista de figuras

Figura 1- Representação esquemática dos diferentes tipos de rotura [5]	24
Figura 2- Representação dos diferentes modos de fractura [5].....	25
Figura 3 - Geometria do ensaio DCB conforme a norma ASTM D3433-99 [18]	31
Figura 4 - Representação esquemática do ensaio DCB [6]	32
Figura 5 - Curva Carga P – deslocamento δ [16]	32
Figura 6 - Representação esquemática do provete TDCB [5].....	34
Figura 7 - Representação esquemática dos provetes utilizados no Wedge test	35
Figura 8 - Representação esquemática do ensaio End Loaded Split (ELS) [5]	37
Figura 9 - Curva P - δ típica obtida no ensaio ELS [23]	38
Figura 10 - Representação esquemática do ensaio Four-point End Notched Flexure [5]	39
Figura 11 - Curva P - δ típica obtida no ensaio 4ENF [25]	40
Figura 12- Representação esquemática do ensaio End Notched Flexure [6] ..	40
Figura 13 - Curva P - δ típica obtida no ensaio ENF com $a_0=60\text{mm}$ [5].....	42
Figura 14 - Curva P - δ típica obtida no ensaio ENF com $a_0=40\text{mm}$ [5].....	42
Figura 15 - Comparação dos valores obtidos da taxa de libertação de energia nos ensaios ENF e 4ENF [25].....	43
Figura 16- Variação da geração do modo modo misto com assimetria da carga aplicada em provetes DCB [27].....	45

Figura 17 - Determinação da tenacidade nos diferentes modos do ensaio ADCB [27]	46
Figura 18 - Representação esquemática do ensaio ADCB [6]	47
Figura 19 - Representação esquemática do ensaio ATDCB	48
Figura 20 - Curva P - δ típica obtida no ensaio ATDCB [5]	49
Figura 21 – Representação de um dispositivo para efectuar o ensaio MMB [29]	50
Figura 22 - Representação esquemática do dispositivo MMB [5].....	51
Figura 23 - Representação esquemática da aplicação das forças num ensaio MMB [30].....	51
Figura 24 - Montagem experimental para ensaio dos provetes SLB [5].....	54
Figura 25 - Representação esquemática do ensaio SLB [5]	55
Figura 26 - Curva P - δ típica obtida no ensaio SLB [5]	56
Figura 27- Representação esquemática do ensaio Fernlund–Spelt (FS) [2]....	56
Figura 28- Representação das forças que actuam no provete recorrendo ao ensaio Fernlund–Spelt (FS) [33].....	57
Figura 29- Diagrama de estabilidade de propagação da fenda para o ensaio FS [2]	59
Figura 30 - Vista lateral do dispositivo.....	60
Figura 31 - Vista explodida do dispositivo	61
Figura 32- Provette normalizado segundo a norma ASTM D 3433 – 99 [18]....	62
Figura 33 - Posição do provete no dispositivo.....	62
Figura 34 - Representação esquemática do trabalho de simulação efectuado	64

Figura 35 - Representação da malha utilizada para simulação do dispositivo .	67
Figura 36 - Representação esquemática das forças que actuam no provete ..	70
Figura 37 - Distribuição de tensões no dispositivo	73
Figura 38 - Deslocamentos no dispositivo.....	73
Figura 39 - Representação do Actuador	74
Figura 40 - Representação esquemática da malha utilizada no actuador	74
Figura 41 - Representação da optimização do actuador	77
Figura 42 – Representação esquemática da malha utilizada na optimização do actuador	77
Figura 43 - Representação da viga de apoio superior.....	80
Figura 44 - Representação esquemática de actuação de forças na viga	80
Figura 45 - Representação do fixador da provete	84
Figura 46 - Representação da peça de ligação viga de apoio superior – liga de apoio inferior.....	87
Figura 47 - Representação da viga se apoio superior	89
Figura 48 - Representação da peça de ligação dispositivo-base	91
Figura 49 - Representação da viga de fixação dispositivo-base	93
Figura 50 - Representação da base	96
Figura 51 - Representação do fixador base-MTS.....	98
Figura 52 - Fixador da barra de ensaio para modo III	101
Figura 53 - Dispositivo adaptado para ensaio modo III	102
Figura 54 - Modo como actuam as forças com adaptação para modo III.....	102

Lista de tabelas

Tabela 1 - Evolução histórica dos adesivos estruturais [5].....	23
Tabela 2- Vantagens e desvantagens da utilização de adesivos [7]	24
Tabela 3- Relação entre rácios de modo misto respectivas forças F_1 e F_2 associadas	58
Tabela 4 - Características da malha utilizada na simulação em Solidworks®.	66
Tabela 5 - Comparação das malhas utilizadas para o mesmo provete	66
Tabela 6 - Propriedades da malha na determinação das forças F_1 e F_2	67
Tabela 7 - Propriedades dos materiais utilizados	68
Tabela 8 - Valores das forças obtidos na simulação em Solidworks®.....	72
Tabela 9 - Simulação tensões e deslocamentos no actuador de CF 1	75
Tabela 10 - Simulação tensões e deslocamentos no actuador de CF 2.....	76
Tabela 11 - Simulação tensões e deslocamentos no actuador optimizado de CF 1	78
Tabela 12 - Simulação tensões e deslocamentos no actuador optimizado de CF 2	79
Tabela 13 - Simulação tensões e deslocamentos na viga de apoio superior de CF 1 .	81
Tabela 14 - Simulação tensões e deslocamentos na viga de apoio superior de CF 2 .	82
Tabela 15 - Simulação tensões e deslocamentos na viga de apoio superior de CF 3 .	83
Tabela 16 - Simulação tensões e deslocamentos no fixador do provete de CF 1	85
Tabela 17 - Simulação tensões e deslocamentos no fixador do provete de CF 2	86
Tabela 18 - Simulação de tensões e deslocamentos da peça de ligação viga de apoio superior – liga de apoio inferior	88
Tabela 19 - Simulação de tensões e deslocamentos na viga de apoio inferior	90
Tabela 20 - Simulação de tensões e deslocamentos na peça de ligação dispositivo-base.....	92
Tabela 21 - Simulação de tensões e deslocamentos na viga de fixação dispositivo-base da CF 1	94
Tabela 22 - Simulação de tensões e deslocamentos na viga de fixação dispositivo-base da CF 2	95
Tabela 23 - Simulação de tensões e deslocamentos na base.....	97
Tabela 24 - Simulação de tensões e deslocamentos na Fixação base -MTS.....	99

Acrónimos

4ENF - Four-Point End Notched Flexure
ADCB - Asymmetric Double Cantilever Beam
ATDCB - Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam
CBBM - Compliance Based Beam Method
CLS - Crack Lap Shear
CZM - Cohesive Zone Model
DBT - Direct Beam Theory
DCB - Double Cantilever Beam
ELS - End Loaded Split
ENF - End Notched Flexure
ESIS – European Structural Integrity Society
FPZ – Fracture Process Zone
LEFM – Linear Elastic Fracture Method
LET - Laboratório de Ensaios Tecnológicos
MMB – MixedModeBending
MMF – Mixed Mode Flexure
MTS – Material Testing Systems
R – Curve - Resistance Curve
SERR – Strain Energy Release Rate
SLB – Single Leg Bending
SMC – Sheet Moulding Compound
TAST – Thick Adherend Shear Test
TDCB – Tapered Double Cantilever Beam
VCCT – Virtual Crack Closure Technique

Lista de símbolos

a – Comprimento da fenda

a_0 – comprimento da fenda inicial

b – Largura do provete

C – Flexibilidade

E – Módulo de Young

G – Módulo de elasticidade transversal

\mathcal{G} - Taxa de libertação de energia

\mathcal{G}_c - Taxa de libertação de energia crítica

h – Altura do substrato

K – Factor de concentração de tensões

P – Carga aplicada

δ – Deslocamento

σ_r - tensão remota

U – energia interna

W – trabalho realizado

1 - Introdução

1.1 - Definição do problema

Por definição, um adesivo é um material não metálico que tem a capacidade de construir uma união entre duas superfícies através da combinação de forças internas do material adesivo. Esta é uma definição simples de um material que é a base de uma indústria de um elevado valor económico.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias, e o constante aparecimento de novas necessidades, foi constatado que se podem construir ligações entre dois objectos, cujo material pode ser muito diferente, utilizando materiais adesivos. Como consequência, os adesivos têm ganho muita importância no que respeita à área de projecto e construção mecânica. Estes permitem ao projectista uma maior liberdade aquando da concepção de um produto, uma vez que podem ser muitas vezes a melhor solução de construção/montagem do produto final.

Actualmente o desenvolvimento de novos adesivos com aplicações nos campos de engenharia, principalmente a mecânica, tem assumido um papel muito importante perante a realização de qualquer projecto. Por essa razão, considerando a evolução que a tecnologia tem tido, tornou-se necessária a criação de ensaios simples e com exactidão a fim de caracterizar as suas propriedades. A caracterização dos adesivos em Modo I (esforços normais) e em Modo II (esforços de corte) hoje em dia encontra-se bem definida, com ensaios efectuados de forma simples e relativamente fiável, algo que ainda não acontece para os ensaios em modo misto em que apesar de já haver ensaios documentados [1], estes pecam pela disparidade na metodologia que apresentam e pela própria complexidade dos ensaios em si. Por essa razão, é estudado nesta dissertação um novo dispositivo que torne o ensaio mais simples e geral, no que toca à caracterização da energia de fractura de juntas adesiva.

1.2 - Objectivos

O principal objectivo deste trabalho é dimensionar um dispositivo que permita determinar a taxa de libertação de energia em modo misto recorrendo a um provete normalizado, nomeadamente o provete DCB.

1.3 - Metodologia

Para o fazer, recorreu-se à simulação de um dispositivo de ensaio baseado sobre o dispositivo desenvolvido por Fernlund e Spelt [2] e da junta adesiva (DCB) utilizando o programa de elementos finitos Solid Works®.

O dispositivo de ensaio foi numa primeira fase validada em termos do diagrama de forças aplicada ao provete DCB para garantir que a o rácio de modo misto aplicado ao provete está correcto.

Numa segunda fase, cada componente do dispositivo foi dimensionado para garantir que o estado de tensão está sempre abaixo do limite elástico.

O dispositivo está neste momento a ser maquinado nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

1.4 Plano da tese

Capítulo 2 - Foi feita a revisão bibliográfica que abrange as diferentes metodologias de ensaios de juntas adesivas documentadas para caracterização à fractura em modo I, modo II e modo misto (I + II) assim como os respectivos métodos de análise.

Capítulo 3 – É apresentada a geometria do dispositivo concebido e dos provetes usados. São mencionados os programas que se usaram para a concepção assim como a metodologia utilizada para a simulação do comportamento do dispositivo quando colocado em carga. É também referido o critério que se utilizou para o dimensionamento do dispositivo.

Capítulo 4 - São apresentados os resultados das simulações obtidos para a validação dos resultados esperados. Neste capítulo é possível ver o dimensionamento dos componentes essenciais ao ensaio que se pretende fazer.

Capítulo 5 - São apresentadas as conclusões deste trabalho bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 – Revisão Bibliográfica

2.1 – Adesivos

As primeiras evidências da utilização de material adesivo remontam aos anos de 4000 A. C., em que estes eram utilizados em utensílios de preservação de alimentos, nomeadamente em vasos de cerâmica que eram reparados com resinas retiradas de árvores. Arqueólogos descobriram pinturas em murais que mostram detalhes que envolviam a montagem de instrumentos de madeira utilizando operações de colagem já a partir dos anos 1500-1000 A. C. As primeiras referências em relação à preocupação com os adesivos e a sua utilização na literatura surgiram nos anos de 200 A. C., altura em que foram descritos procedimentos de fabrico e utilização de adesivos de origem animal [3].

Apesar da utilização rudimentar anteriormente referida, houve uma preocupação relativa ao desempenho deste tipo de materiais, levando a um desenvolvimento mais aprofundado a partir do século XX, muito por culpa das indústrias aeronáutica e aeroespacial. Estas tinham problemas como a não soldabilidade de algumas ligas e a concentração de tensões em ligações rebitadas, e, por essas razões, necessitavam de criar ligações que contornavam estes problemas e que ao mesmo tempo resistissem aos diversos tipos de solicitações e à intensidade destas. Esta motivação levou à criação de adesivos de origem sintética com maior durabilidade e maior resistência que os adesivos anteriormente existentes, baseados em produtos de origem natural.

Para que o desenvolvimento das ligações seja exequível é necessário um envolvimento de várias disciplinas, nomeadamente princípios básicos de física, química e mecânica, por forma a criar áreas intermédias das ciências de superfícies, de materiais poliméricos e de projecto de juntas, que são elementos base da ciência da adesão.

A teoria da mecânica da fractura é uma das principais disciplinas aplicadas à previsão do comportamento de juntas adesivas.

Tabela 1 - Evolução histórica dos adesivos estruturais [4]

Data aproximada de comercialização	Adesivo
1910	Fenol - formaldeído
1930	Ureia - formaldeído
1940	Fenólicos - Nitrilos, Fenólicos - Vinílicos, Acrílicos, Poliuretanos
1950	Epóxidos, Cianoacrilatos, Anaeróbicos
1960	Poliamidas

A Tabela 1 demonstra a evolução histórica dos adesivos, sendo as resinas de fenol-formaldeído os primeiros adesivos estruturais, a aparecer no mercado com o nome de baquelite.

Actualmente, não só há a necessidade de desenvolver adesivos com características superiores mas também é muito importante o método de medição dessas mesmas características. É necessário que os ensaios sejam simples, rápidos e acima de tudo, credíveis, permitindo uma previsão mais aproximada para a rotura do material adesivo.

A rotura de uma junta adesiva pode ocorrer sob 3 diferentes modos [1]:

- Rotura adesiva, em que a rotura ocorre na interface entre o substrato e o adesivo, geralmente associado a uma má preparação da superfície dos substratos;
- Rotura coesiva no adesivo, em que a rotura se dá na região interna do adesivo, ocorrendo quando a resistência do adesivo é menor que a resistência do substrato;
- Rotura coesiva no substrato, em que a rotura ocorre na região interna do substrato, verificando-se quando a resistência do substrato é menor que a resistência do adesivo.

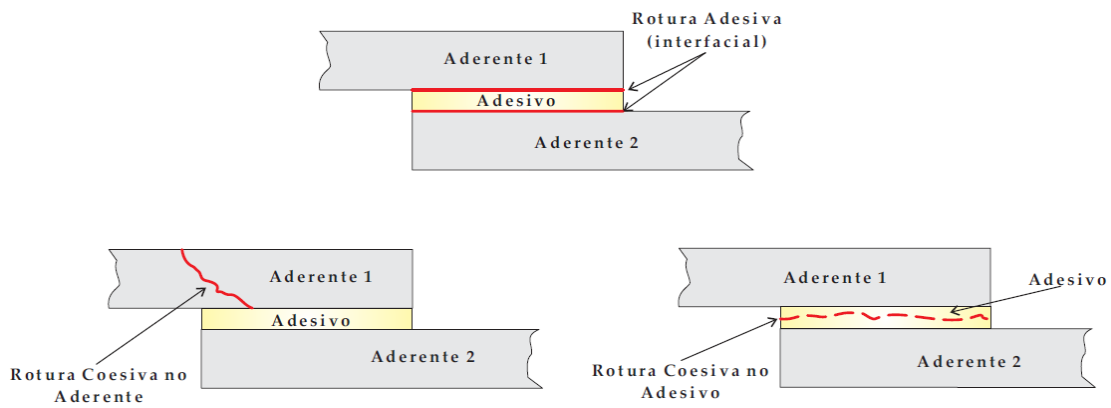


Figura 1- Representação esquemática dos diferentes tipos de ruptura [5]

Apesar das vantagens que um adesivo apresenta, estas têm que ser analisadas meticulosamente. A Tabela 2 refere algumas delas.

Tabela 2- Vantagens e desvantagens da utilização de adesivos [6]

Vantagens	Limitações
Capacidade de obter estruturas mais leves e rígidas	As peças não podem ser separadas posteriormente
Capacidade de unir materiais distintos (por exemplo, metais com compósitos)	Podem ocorrer tensões residuais resultantes dos diferentes coeficientes de expansão térmica
Capacidade de unir eficientemente materiais de espessuras finas	Sensibilidade a tensões de tracção segundo a espessura
Melhor distribuição das tensões	Fraca resistência à temperatura e à humidade
Melhores propriedades à fadiga devido à melhor distribuição de tensões	Susceptíveis a degradação ambiental e incerteza relativamente à sua durabilidade a longo prazo em condições de serviço severas
Melhor resistência à corrosão	Problemas de toxicidade e inflamabilidade
Melhor aparência superficial (sem cabeças de parafusos, sem marcas de soldadura, etc)	Dificuldade ao nível das inspecções
Fabrico de formas complexas	
Boa capacidade de vedação	

2.2 – Mecânica da Fractura

O conceito da mecânica da fractura tem vindo a ser largamente aplicado no estudo de juntas adesivas uma vez que cada vez mais é necessário conhecer o comportamento do adesivo, principalmente ao surgimento e propagação de fissuras.

A fractura dos materiais pode ocorrer sob três diferentes modos de sollicitação, nomeadamente o modo I (sollicitação em tensão normal), modo II (sollicitação em tensão de corte) e modo III (sollicitação de corte). Os dois modos de corte são diferenciados para que, no modo II, as superfícies da fenda têm movimento relativo perpendicular à frente da fenda, já no modo III esse mesmo movimento é paralelo à frente da fenda.

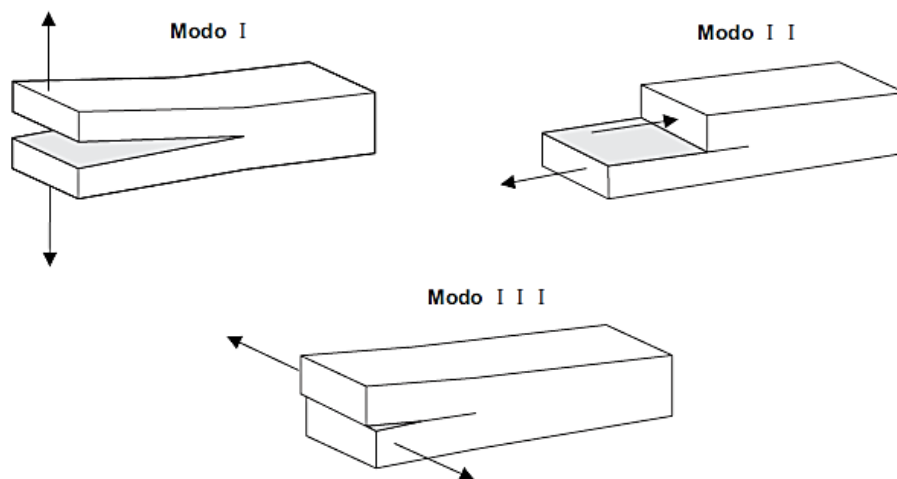


Figura 2- Representação dos diferentes modos de fractura [5]

Os critérios de rotura baseados na Mecânica dos Meios Contínuos, consideram que o material é isento de defeitos, comportando-se como um corpo contínuo [1]. Uma vez que esta teoria desconsidera os defeitos ou as reentrâncias de material, torna-se então necessário efectuar os cálculos por outra via. A alternativa mais aconselhável para efectuar a caracterização do adesivo é então a Mecânica da Fractura. Esta teoria considera que a estrutura não é homogénea, contendo defeitos ou falhas provocadas pelo próprio processo de fabrico ou pelo próprio funcionamento. Assim, para simular a

existência destes defeitos, assume-se a existência de uma pré-fenda introduzida artificialmente.

Defeitos como delaminagens, descolagens, falhas e/ou fendas podem encontrar-se nos materiais, fazendo com que as tensões e/ou deformações presentes nas suas extremidade, iniciem a propagação, podendo conduzir à rotura do material adesivo. Desta forma, é possível avaliar, se durante o período de vida da estrutura na qual o material adesivo é utilizado, as dimensões de qualquer tipo de defeito permanecem controladas ou se as dimensões do defeito ultrapassam as dimensões críticas que levam à rotura do filme adesivo, não garantindo assim a integridade da estrutura.

A Mecânica da Fractura está assente em dois critérios com a finalidade de estudar materiais com a presença de defeitos [7]: o critério que tem como base o factor de concentração de tensões K e o critério que tem como base os conceitos energéticos.

O factor de concentração de tensões K é definido como sendo um parâmetro de escala que define a alteração do estado de tensão na vizinhança da extremidade da fenda, devido à existência de tensões extremamente elevadas nessa mesma vizinhança, caracterizando desta forma a tensão existente na extremidade de uma fenda [8]. Este valor pode ser calculado através da equação:

$$K = \sigma_r \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

em que σ_r é a tensão remota aplicada na direcção perpendicular à direcção de propagação da fenda e a o comprimento da mesma.

No caso particular do modo I, a equação 1 toma a seguinte forma:

$$K_I = Y \sigma_r \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

sendo Y uma função adimensional dependente da geometria da estrutura e da distribuição da carga, sendo obtido geralmente sob forma gráfica para uma grande diversidade de casos práticos.

Para que a propagação da fissura não ocorra é necessário que a concentração de tensões não atinja um valor crítico, K_{Ic} , sendo este usualmente definido como tenacidade. Desta forma, quando a relação $K_I = K_{Ic}$ é verificada, ocorre a propagação da fissura. É de notar que enquanto o factor de concentração de tensões existente na extremidade da fenda não igualar o valor da tenacidade do material, a propagação não ocorre.

A tenacidade à fractura em modo I, ou K_{Ic} , é uma propriedade intrínseca associada a cada material, medindo a sua capacidade de resistir à propagação de fendas aquando sujeitas a esforços que provocam tensões normais.

A principal diferença entre o factor de concentração de tensões, K_I , e a tenacidade do material, K_{Ic} , prende-se com o facto de que enquanto K_I é um parâmetro que depende do tipo de solitação e da geometria da peça e da fenda, K_{Ic} é um parâmetro que é uma propriedade mecânica do próprio material.

Uma das desvantagens que este critério apresenta é a dificuldade da determinação do factor de concentração de tensões, principalmente quando a fenda se propaga na interface ou perto desta.

Relativamente ao critério energético, este é baseado na hipótese de que a propagação de um defeito ocorre sempre que a energia acumulada na extremidade desse defeito, usualmente designada por taxa de libertação de energia e representada por \mathcal{G} , seja igual à energia necessária à propagação da fenda, nomeadamente à taxa de libertação de energia crítica, \mathcal{G}_c , sendo esta última uma propriedade intrínseca do material, ou seja, para que a fenda não se propague, é necessário que a condição $\mathcal{G} \leq \mathcal{G}_c$ prevaleça [9]. Segundo este critério, é possível calcular a taxa de libertação de energia a partir da equação:

$$\mathcal{G} = \frac{d(W - U)}{dA} \quad (3)$$

sendo W o trabalho realizado pelas forças exteriores que actuam no sistema, U a energia interna de deformação e A a área da fissura.

A maioria dos trabalhos que fazem uso da mecânica da fractura para prever o comportamento do adesivo recorrem ao critério da taxa de libertação de energia de deformação. Este critério apresenta algumas vantagens comparativamente com o critério do factor de concentração de tensões, nomeadamente o facto de se trabalhar com um critério que está relacionado com a absorção de energia por parte da fenda, facto deveras importante no estudo das propriedades do material [10].

Uma vez que a grande maioria das solicitações do quotidiano se processam em modo misto, sendo em maior ou menor rácio de modo misto, torna-se necessário determinar a relação entre estes dois modos para que seja possível fazer uma melhor previsão do comportamento dos adesivos.

No caso particular do estudo de materiais adesivos é necessário ter em atenção o papel dos substratos, sendo que estes irão influenciar a propagação da fenda, provocando um crescimento da fenda sob situações de modo misto [8]. Para que estes efeitos sejam contabilizados, é necessário utilizar os critérios energéticos mais adequados, sendo geralmente apresentados através da seguinte equação:

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\beta = 1 \quad (4)$$

sendo G_{IC} e G_{IIC} as taxas de libertação de energia críticas para os modos puros, e α e β os expoentes, que são dependentes do critério utilizado. Os critérios mais utilizados para o calculo dos expoentes são geralmente os critérios linear, com $\alpha = \beta = 1$, ou o quadrático com $\alpha = \beta = 2$.

Para efectuar correctamente a caracterização da propagação da fenda em modo misto, é necessário determinar uma propriedade intrínseca a este mesmo modo, designada por grau de rácio entre modos, sendo calculada pela seguinte equação:

$$\psi = \tan^{-1} \frac{K_{II}}{K_I} = \tan^{-1} \sqrt{\frac{G_{II}}{G_I}} \quad (5)$$

Para materiais homogêneos, os critérios anteriormente descritos estão relacionados entre si, através das seguintes equações:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mathcal{G} = \frac{K^2}{E} & \text{para estado plano de tensão} \quad (6) \\ \mathcal{G} = \frac{K^2(1 - \nu^2)}{E} & \text{para estado plano de deformação} \quad (7) \end{array} \right.$$

sendo válidas para os respectivos valores críticos.

Apesar da teoria da Mecânica da Fractura apresentar boas aproximações, esta apenas dedica-se fundamentalmente à propagação do dano e não da sua iniciação.

A mecânica do dano é outro método de previsão que combina conceitos da mecânica dos meios contínuos e da mecânica da fractura e que permite simular ambas: a iniciação e a propagação [12]. Para a propagação é preciso ter o conhecimento da tenacidade do material.

2.3 – Ensaio de Fractura

Quando se procede à caracterização de um adesivo, a tenacidade à fractura \mathcal{G}_c é um parâmetro essencial a determinar, podendo ser obtido em três situações diferentes, obtendo dessa forma três valores diferentes, nomeadamente a tenacidade à fractura em modo I, em modo II, modo III e em modo misto.

No caso dos modos I e II, que são as situações mais documentadas na literatura, já é possível obter resultados bastante razoáveis e acima de tudo fiáveis. No entanto, o que acontece na maioria das aplicações é que o material adesivo está sujeito a um modo misto, situação para a qual, apesar de haver ensaios para determinar \mathcal{G}_c , estes não apresentam resultados satisfatórios, ou para os apresentarem são necessários ensaios mais complexos e morosos.

No caso do Modo I, a fim de ser possível obter apenas e só esforços normais, foram criados os ensaios com provetes Double Cantilever Beam (DCB), Tapered Double Cantilever Beam (TDCB) e Wedge Test.

Se o objectivo for o de testar a resistência do adesivo face a esforços de corte, podem ser usados os ensaios End Notched Flexure (ENF), End Loaded Split (ELS) e Four-point End Notched Flexure (4ENF).

No caso de na aplicação do adesivo serem desenvolvidos esforços normais e de corte simultaneamente, então teremos que recorrer a ensaios que combinem as acções protagonizadas pelo Modo I e Modo II. Para obtermos a combinação de esforços pretendida podemos recorrer aos ensaios referentes ao Modo Misto tais como o Asymmetric Double Cantilever Beam (ADCB), o Assymmetric Tapered Double Cantilever Beam (ATDCB), o Mixed-Mode Bending (MMB), o Single Leg Bending (SLB) e um ensaio recentemente desenvolvido por Fernlund e Spelt.

2.3.1 – Ensaios de juntas adesivas em modo I

O modo I permite determinar a taxa de libertação de energia de juntas adesivas estruturais quando estas são sujeitas a tensões normais. O modo I puro ocorre quando os provetes ensaiados estão apenas sujeitos a tensões normais. É a partir da propagação da fissura no material que conseguimos obter o valor anteriormente descrito.

Para a obtenção de G_{Ic} os ensaios utilizados na maioria das vezes são: o Double Cantilever Beam, (DCB), o Tapered Double Cantilever Beam, (TDCB), ambos normalizados pela norma americana ASTM D 3433 – 99 e o *Wedge test* normalizado pela norma americana ASTM D1876 – 08.

2.3.1.1 – Double Cantilever Beam (DCB)

O Double Cantilever Beam (Figura 3) é o ensaio mais atractivo não só do ponto de vista teórico mas também do prático sendo o mais utilizado para o estudo de G_{Ic} e do comportamento da fenda em juntas coladas. Este ensaio resulta da técnica simples, mas eficaz aplicada por Benbow e Roesler [13] e também por Gilman [14].

A técnica do ensaio DCB é efectuada com provetes que são constituídos por duas vigas de igual comprimento e de espessura constante, em que o adesivo é colocado entre os mesmos, promovendo a sua adesão, e não na totalidade do comprimento uma vez que é considerada uma região inicial de comprimento, a_0 , isenta de adesivo a qual geralmente é designada por pré-fenda.



Figura 3 - Geometria do ensaio DCB conforme a norma ASTM D3433-99 [18]

Após a construção dos provetes, estes devem ser fixados a uma máquina auto-alinhante por forma a garantir o correcto alinhamento da solicitação.

Na norma anteriormente referida relativa a este ensaio, está definido também que a velocidade de solicitação deve ser fixada de forma a induzir o início da propagação da pré-fenda. A velocidade de solicitação geralmente está compreendida entre 0,5 e 3 [mm/min], dependendo da geometria e das propriedades dos materiais do provete. Durante o ensaio, são registados os valores da carga P e os valores deslocamento δ para os correspondentes valores de comprimento da fenda a .

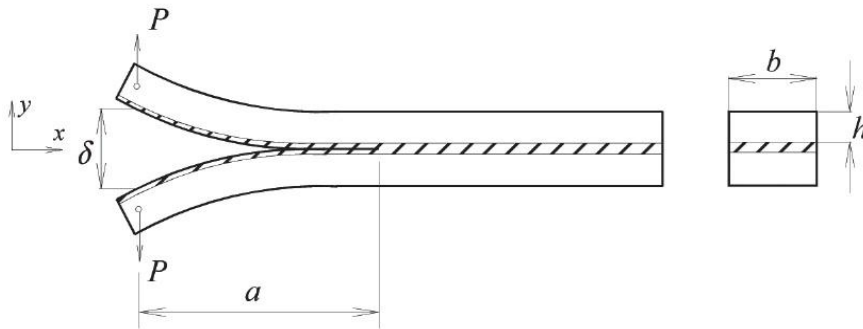


Figura 4 - Representação esquemática do ensaio DCB [6]

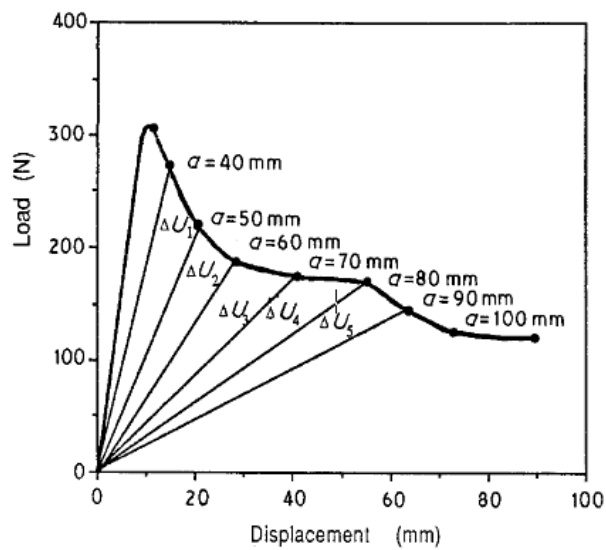


Figura 5 - Curva Carga P – deslocamento δ [16]

Para analisar os dados obtidos a partir dos gráficos Carga P – Comprimento da fenda, existem vários métodos de fractura mecânica linear elástica (LEFM), sendo extremamente importante a escolha do método correcto para analisar os resultados obtidos. Os métodos existentes para o cálculo de G [15] são:

- Método da área (*Area method*);
- Método do comprimento (*Compliance method*);
- Teoria de vigas simples (*Direct Beam Theory (DBT)*);
- Método do deslocamento (*Displacement method*).

O método do comprimento da fenda (a) foi um método de obtenção de G desenvolvido por Irwin-Kyees [16]. Tendo em consideração que a flexibilidade pode ser definida a partir da equação $C = \frac{\delta}{P}$, então a taxa de libertação de energia é dada pela equação:

$$G = \frac{P^2 dC}{2b da'} \quad (8)$$

sendo P a força aplicada e a o comprimento da fenda. Neste método também é possível chegarmos ao valor de G através da construção de um gráfico que relacione a flexibilidade C com o comprimento da fenda a .

Resolvendo a equação anterior a partir da teoria de vigas simples (DBT), para o provete DCB, a taxa de libertação de energia é obtida recorrendo à equação [17]:

$$G_{1c} = \frac{6P^2}{b^2 h^3} \left(\frac{2a^2}{E} + \frac{h^2}{5G} \right) \quad (9)$$

Contudo, esta teoria não contabiliza os efeitos da concentração de tensões e a rotação existente na extremidade da fenda, restringindo desta forma o movimento da fenda. Existem métodos mais sofisticados (Corrected Beam Theory) que têm em conta esses aspectos. Recentemente de Moura [12] desenvolveu um método de obtenção de G_c sem necessitar da medição de a , baseado na flexibilidade da junta.

2.3.1.2 – Tapered Double Cantilever Beam (TDCB)

O ensaio com provetes Tapered Double Cantilever Beam (TDCB) é também definido na norma ASTM D 3433 – 99 como sendo uma alternativa ao ensaio com provetes DCB para a determinação da taxa de libertação de energia de fractura em modo I (Figura 6). A geometria apresentada pelos

provetes TDCB é igualmente simétrica como os provetes DCB, mas aqueles são maquinados com duas secções de altura constante nas extremidades, mas com a secção intermédia de altura variável, o que faz com que a rigidez varie ao longo do provete [18].

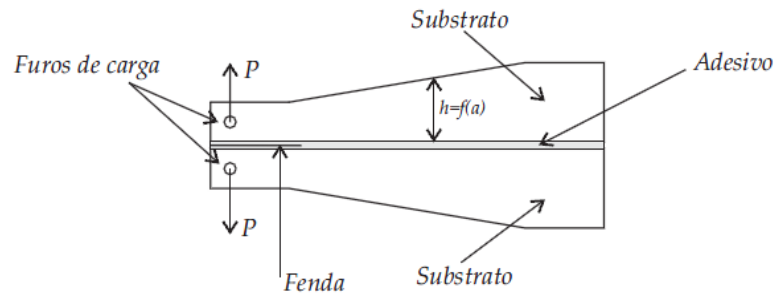


Figura 6 - Representação esquemática do provete TDCB [5]

O ensaio em modo I recorrendo a estes provetes tem ainda a vantagem de ser possível a obtenção da taxa crítica de libertação de energia G_{Ic} independentemente do comprimento da fenda a . Desta forma G_{Ic} é obtida através da seguinte equação:

$$G_{Ic} = \frac{4P^2 m}{Eb^2} \quad (10)$$

sendo que m é dado por:

$$m = \frac{1}{h} + \frac{3a^2}{h^3} \quad (11)$$

Segundo Mostovoy [19], utilizando um provete com um perfil adequado, é possível fazer com que o valor de dC/da se mantenha constante, desde que o valor de $\left(\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h}\right)$ também se mantenha constante.

A maior desvantagem da utilização do provete TDCB relaciona-se com o fabrico deste, sendo mais complexo comparativamente com o DCB, especialmente quando o substrato utilizado é fabricado em material compósito.

2.3.1.3 – Wedged test

O Wedge test (Figura 7) é o ensaio mais utilizado quando é efectuada a determinação da durabilidade da fenda e da resistência das juntas adesivas quando expostas a diferentes ambientes [20].

Este ensaio é normalizado pela norma americana ASTM D 3762 e utiliza provetes com a mesma configuração de outros ensaios em modo I.

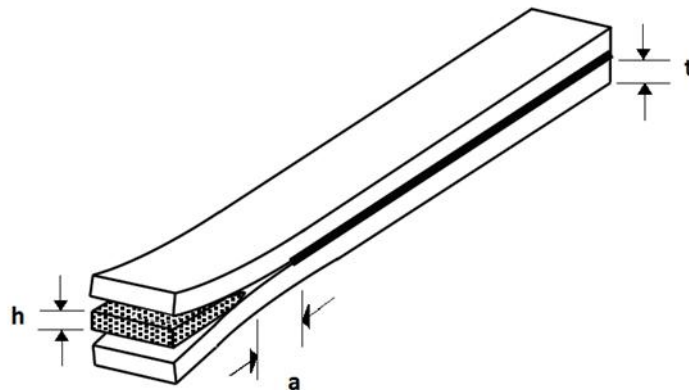


Figura 7 - Representação esquemática dos provetes utilizados no Wedge test

Segundo a norma referida anteriormente, o procedimento deste ensaio consiste na inserção de uma pequena placa metálica em forma de cunha entre as duas placas que servem de substrato ao adesivo, tendo este um comprimento de fenda inicial a_0 antes da inserção da cunha, medindo desta forma a propagação da fenda em função do tempo, após aquela ter sido inserida. A inserção da cunha entre as vigas do provete provoca o seu afastamento, fazendo com que desta forma seja criada uma tensão normal no adesivo, a qual decresce à medida que a fenda se propaga, libertando a energia armazenada no adesivo. Para este ensaio, segundo o critério de Griffith, a taxa de libertação de energia crítica pode ser calculada através da seguinte expressão [20]:

$$G_{Ic} = \frac{3Et^3h^2}{16a^4} \quad (12)$$

sendo E o módulo de Young do substrato, h a espessura do *wedge*, a o comprimento da fenda e t a espessura do substrato.

Este ensaio também requer que o único regime de trabalho seja o regime elástico, condição que geralmente não costuma trazer problemas no estudo dos adesivos visto que quaisquer contribuições devido às propriedades viscoelásticas do adesivo não serão tidas em conta aquando a determinação de G_{Ic} .

Uma das desvantagens do wedge test é a necessidade da medição do comprimento da fenda, situação que para além de tornar necessária a sua medição pode ser limitada pelo facto da propagação não ser homogénea ao longo do seu comprimento.

2.3.2 – Ensaios de juntas adesivas em modo II

O Modo II tem particular interesse para juntas porque é o principal modo de carregamento.

Os ensaios mais utilizados para a caracterização dos adesivos quando solicitados em Modo II baseiam-se nos ensaios utilizados para caracterização da fractura interlaminar em materiais compósitos, tais como o End Notched Flexure (ENF), End Loaded Split (ELS) e Four-point End Notched Flexure (4ENF).

2.3.2.1 End Loaded Split (ELS)

Este ensaio apresenta algumas dificuldades na correcta determinação de G_{IIC} , estando estas relacionadas com a existência de grandes deslocamentos, sendo um pouco complexo garantir uma medição precisa do comprimento da fenda durante a sua propagação [21], acrescento ainda

alguma sensibilidade às condições de aperto uma vez que a tarefa de garantir o encastramento perfeito é algo com um elevado grau de dificuldade (Figura 8).

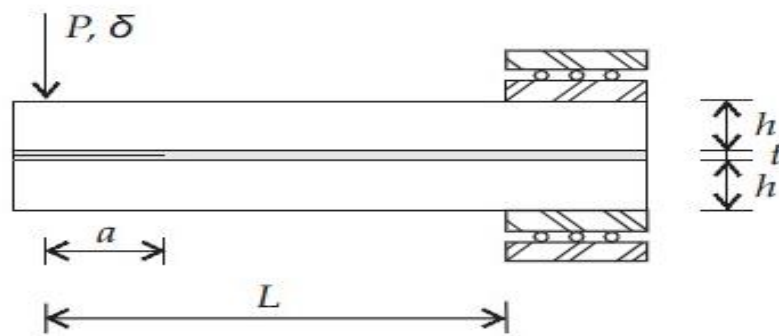


Figura 8 - Representação esquemática do ensaio End Loaded Split (ELS) [5]

A vantagem deste método é estabilidade do início da propagação da fenda, sendo por essa razão um método utilizado para estudos científicos. Foi demonstrado que a propagação de fenda neste ensaio é estável se o comprimento da fenda inicial for superior a 65% do comprimento do provete [22].

O cálculo da flexibilidade, C , do provete ELS é dado pela equação:

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{3a^3 + L^3}{2Bh^3E} \quad (13)$$

em que P e δ representam a força aplicada e o deslocamento do ponto de aplicação da força, respectivamente. Note-se que esta equação determina a flexibilidade, desprezando os efeitos do esforço transversal. Substituindo na equação 13:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2a^2}{4BEh^3} \quad (14)$$

Para que o efeito do esforço transversal seja contabilizado é necessário recorrer à teoria de vigas corrigida. Wang [24] propõem a seguinte equação:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2(a + |\Delta_{II}|)^2}{4B^2Eh^3} \quad (15)$$

sendo o factor de correcção Δ_{II} dado por:

$$\Delta_{II} = 0.49\Delta_I \quad (16)$$

em que:

$$\Delta_I = h \sqrt{\frac{E}{11G} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]} \quad \text{e} \quad \Gamma = 1.18 \frac{E}{G} \quad (17)$$

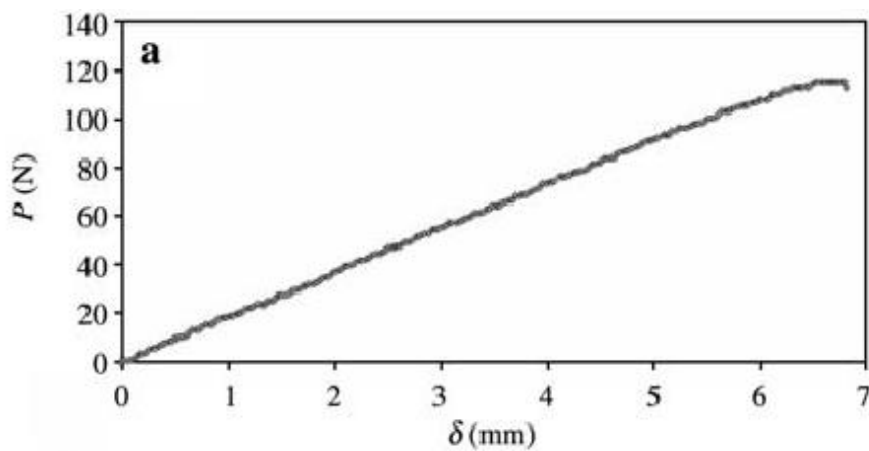


Figura 9 - Curva P-δ típica obtida no ensaio ELS [23]

2.3.2.2 - Four-point End Notched Flexure (4ENF)

Como podemos observar na Figura 10, o ensaio 4ENF consiste no carregamento em dois pontos num provete composto por duas vigas, simplesmente apoiado em ambas as extremidades. Relativamente ao ensaio 4ENF, sabemos que apresenta alguns problemas relacionados com a influência do atrito na zona de pré-fenda, devido ao tipo de carregamento, para além de requerer a utilização de um dispositivo de ensaio sofisticado.

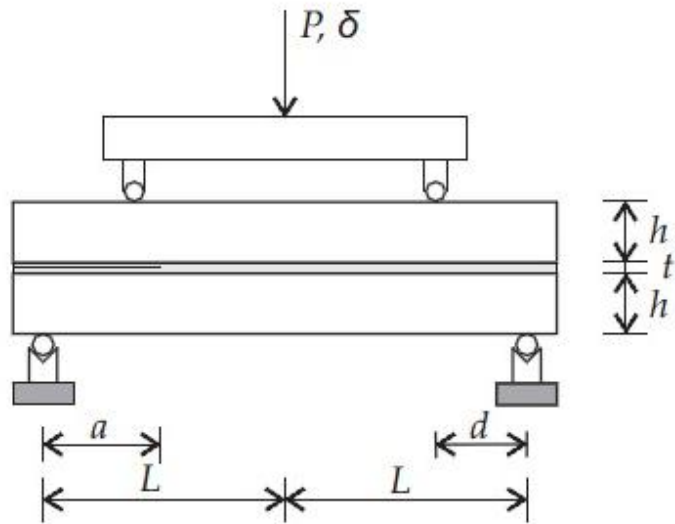


Figura 10 - Representação esquemática do ensaio Four-point End Notched Flexure [5]

Neste caso em concreto, a flexibilidade C é determinada a partir da equação:

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{L^3}{4EBh^3} \left(1 + \frac{9a}{L} \right). \quad (18)$$

Desta forma, substituindo na equação 18 obtém-se:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2L^2}{8EB^2h^3}. \quad (19)$$

Geralmente, o valor da tenacidade obtido através deste ensaio é superior aquele obtido através do ensaio End Notched Flexure (ver secção 2.3.2.3). Este fenómeno é explicado pela influência que o atrito tem nos resultados do ensaio 4ENF.

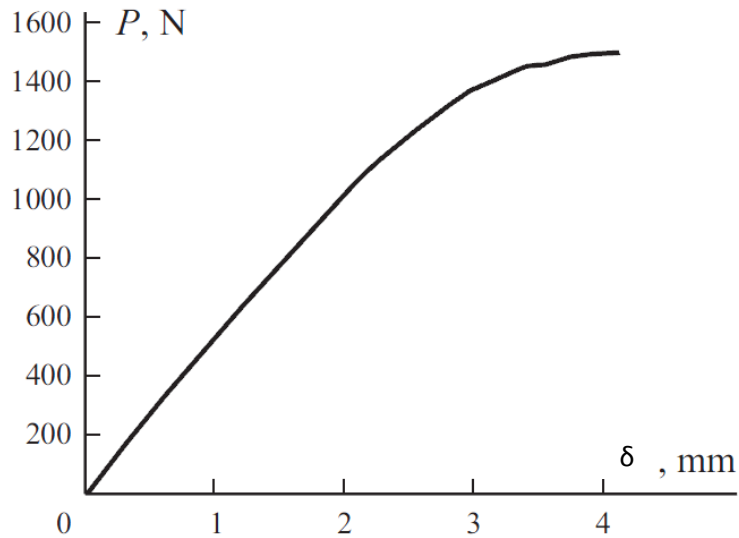


Figura 11 - Curva P- δ típica obtida no ensaio 4ENF [25]

2.3.2.3 – End Notched Flexure (ENF)

O ENF (Figura 12) é o ensaio mais utilizado devido à sua simplicidade, sendo o ensaio mais conhecido de entre aqueles daqueles que aqui são referidos para determinação da tenacidade em Modo II. Ele foi introduzido pela primeira vez em 1977 por Barret e Foschi [22] com o objectivo de determinar a taxa crítica de libertação de energia em modo II de uma espécie de madeira.

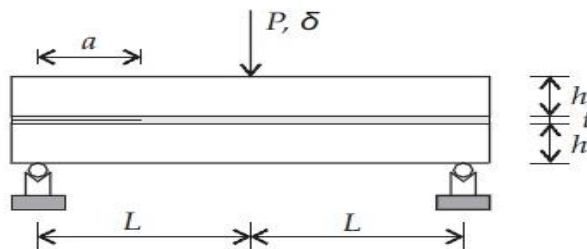


Figura 12- Representação esquemática do ensaio End Notched Flexure [6]

O ensaio é efectuado com base na aplicação de uma força vertical, no ponto médio de um provete constituído por 2 vigas unidas por material adesivo, simplesmente apoiado em ambas as extremidades, provocando desta forma o escorregamento de uma viga sobre a outra e conseqüentemente os esforços de corte.

Segundo a equação de *Irwin-Keyes* o cálculo de G_{IIc} , de acordo com o Direct Beam Theory (DBT):

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a^2}{16b^2 E h^3} \quad (20)$$

O Corrected Beam Theory foi outro dos métodos apresentados [23] para o cálculo da taxa crítica de libertação de energia uma vez que o DBT não contabiliza o efeito de corte transversal que ocorre na extremidade da fenda. Através deste novo método é possível determinar a energia crítica através da expressão:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 (a + |\Delta_{II}|)^2}{16b^2 E h^3}, \quad (21)$$

sendo Δ_{II} a correcção do comprimento da fenda que contabiliza os efeitos da rotação de raiz existente na extremidade da fenda, sendo obtida por:

$$\Delta_{II} = 0.42\Delta_I \quad (22)$$

em que Δ_I é a correcção do comprimento da fenda para modo I, obtido com o ensaio DCB e determinado através da expressão já anteriormente referida. Nas Figuras 13 e 14 é possível observar a evolução da curva $P - \delta$ para diferentes comprimentos de fenda iniciais. Como se pode observar a partir dos gráficos, é possível deduzir fendas com comprimento inicial superior tem uma taxa de libertação menor.

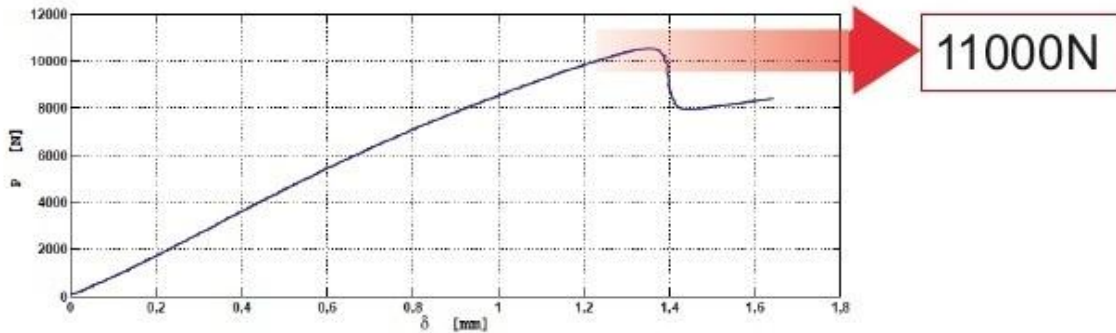


Figura 13 - Curva P - δ típica obtida no ensaio ENF com $a_0=60\text{mm}$ [5]

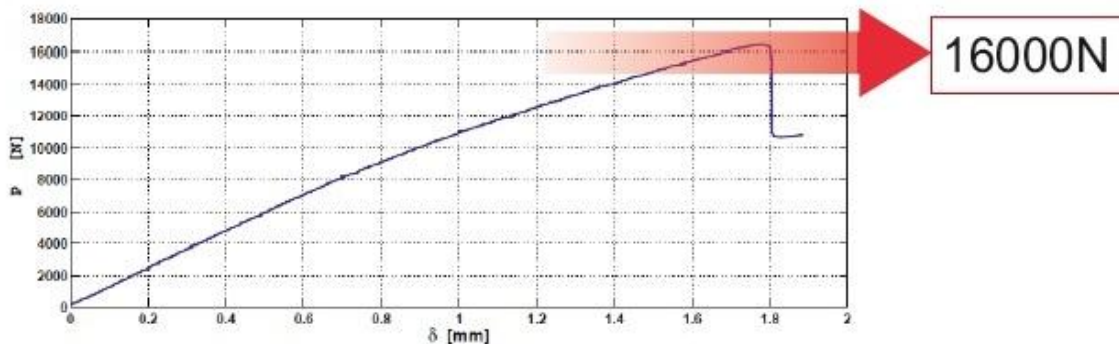


Figura 14 - Curva P - δ típica obtida no ensaio ENF com $a_0=40\text{mm}$ [5]

Contudo, os métodos anteriormente referidos necessitam que a propagação da fenda seja monitorizada durante a progressão do ensaio, facto que torna o ensaio mais complexo. Estes métodos também não contabilizam a Fracture Process Zone (FPZ) existente na extremidade da fenda, onde a fractura do material ocorre por plastificação e microdeformação, fazendo com que parte da energia disponível seja absorvida, e por isso, obtendo taxas de libertação de energia menores (Figura 15). A fim de contabilizar os efeitos da dissipação de energia na FPZ, é necessário incluir uma correcção ao comprimento real da fenda durante a propagação. De Moura [12] propõem um método baseado no Compliance of the Specimen que não requiere a medição do comprimento da fenda.

A utilização deste método, designado de Compliance Based Beam Method (CBBM) e baseado na teoria da flexibilidade dos materiais, traz-nos as vantagens de, para além de não ser necessário a monitorização *in loco* da

propagação da fenda, a utilização do comprimento equivalente α_e produz resultados que já contabilizem os efeitos causados pela FPZ. Desta forma é possível determinar a energia de fractura G_{IIc} recorrendo apenas à curva $P - \delta$.

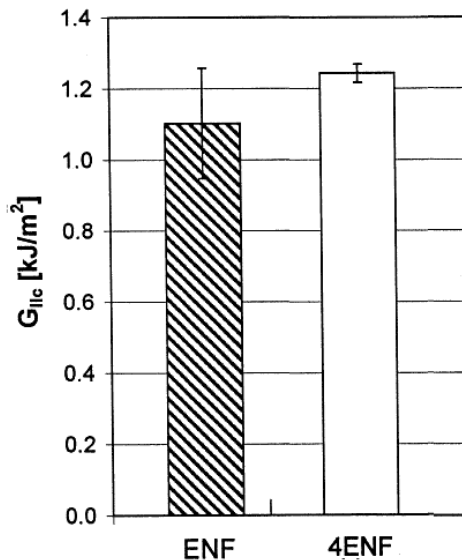


Figura 15 - Comparação dos valores obtidos da taxa de libertação de energia nos ensaios ENF e 4ENF [26]

2.3.3 – Ensaios de juntas adesivas em modo misto

O Modo Misto é definido como sendo o comportamento à fractura de materiais quando sujeitos a combinações de esforços normais e esforços de corte simultâneos.

Na grande maioria dos casos de iniciação e propagação de fissuras, são estas combinações de esforços que estão na sua origem. Por essa razão, tornou-se necessário desenvolver métodos e dispositivos que permitem aplicar a carga de duas formas distintas em simultâneo.

Para a caracterização do comportamento das juntas adesivas quando sujeitas a este modo, existem diversos ensaios: 2.3.3.1 – Asymmetric Double Cantilever Beam; 2.3.3.2 – Assymmetric Tapered Double Cantilever Beam;

2.3.3.3 – Mixed-Mode Bending (MMB); Single Leg Bending (SLB) e o Fernlund-Spelt. Entre os vários ensaios referidos, apenas o Fernlund-Spelt permite ensaios de fractura em toda a gama de rácios de modo misto, desde o modo I puro até ao modo II puro.

2.3.3.1 – Asymmetric Double Cantilever Beam

O Asymmetric Double Cantilever Beam (ADCB) é um ensaio que foi criado a partir do ensaio DCB de forma a conseguir proceder à caracterização de adesivos em modo misto. Uma vez que não é um ensaio normalizado, e apesar da forma como a solicitação é feita em ambos os casos ser igual, há duas formas de efectua-lo: carga assimétrica e provete assimétrico. No caso da carga assimétrica, ao contrário do ensaio DCB, as forças aplicadas nas extremidades dos provetes têm diferentes intensidades, podendo ser aplicadas não só em sentidos opostos como se faz no ensaio DCB, como também podem ser aplicadas no mesmo sentido, criando desta forma o modo II conjuntamente com o modo I (Figura 16).

No caso do provete assimétrico, como o próprio nome indica, recorre-se à utilização de substratos de diferentes materiais e/ou de diferentes espessuras, o que faz com que forças de igual intensidade a actuar na extremidade do provete, tenham diferentes deslocamentos, e conseqüentemente, a provocação de ambos os modos.

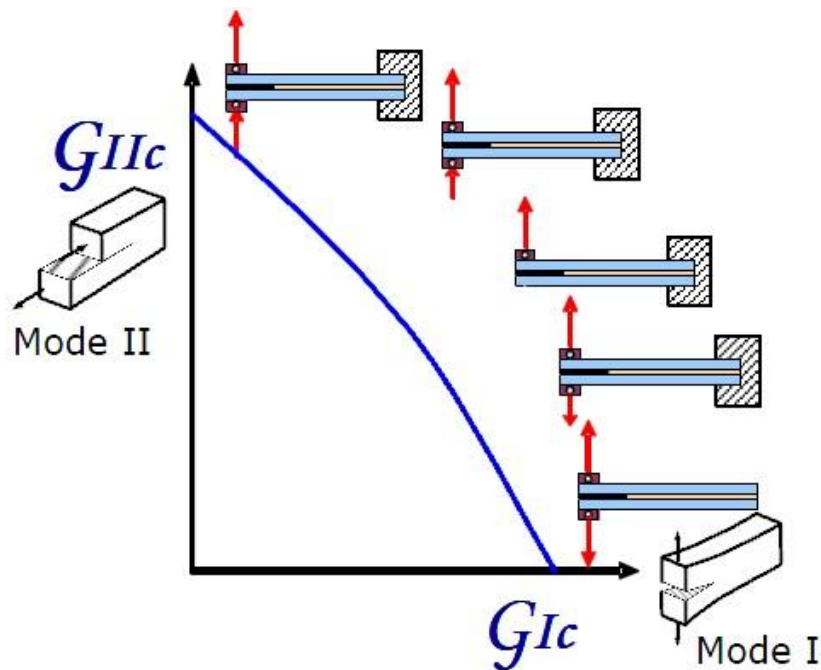


Figura 16- Variação da geração do modo modo misto com assimetria da carga aplicada em provetes DCB [27]

O actuador com duas forças independentes permite a determinação da gama completa de modos mistos recorrendo à utilização de provetes DCB standard. Este processo apresenta vantagens em relação ao método de provete assimétrico. Não só a faixa de modos mistos ensaiada é significativamente maior comparativamente ao modo de realização de provete assimétrico, que é identificado por ter apenas um modo de modo misto, como a própria fabricação dos provetes, torna-se mais simples, bem como os cálculos a serem efectuados para a obtenção das características dos adesivos.

A partir de vários ensaios efectuados e resultados alcançados, combinando diversos modos I e II, foram obtidas as seguintes equações para determinação das forças impostas nos referidos modos:

$$F_I = (F_R + F_L)/2 \quad (23)$$

$$F_{II} = (F_R - F_L)/2 \quad (24)$$

onde F_R e F_L são as forças que actuam nas extremidades dos provetes.

Para efectuar o cálculo de G em ambos os modos, são propostas as seguintes equações [27]:

$$G_I = \frac{F_I^2 a^2}{EIb} \quad (25)$$

$$G_{II} = \frac{3F_{II}^2 a^2}{4EIb} \quad (26)$$

O modo misto neste caso é caracterizado com o ângulo ψ que é calculado pela equação:

$$\psi = \text{ArcTan} \left(\sqrt{\frac{G_{II}}{G_I}} \right) \quad (27)$$

Testes experimentais demonstraram que, em modo misto, o valor de ψ aumenta com o progredir do ensaio e o crescimento da fenda (Figura 17).

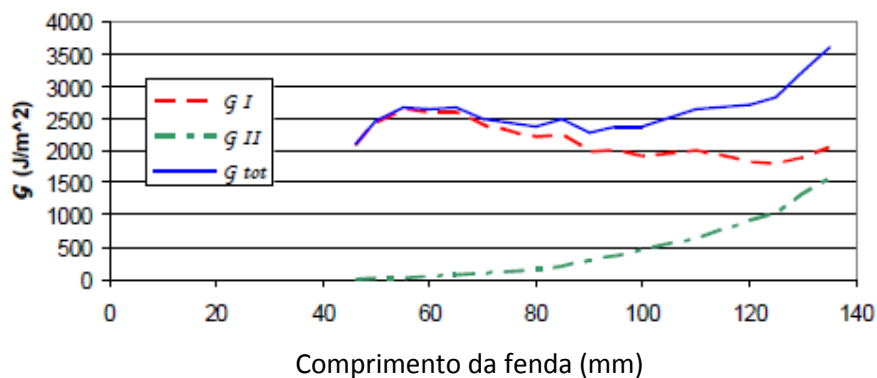


Figura 17 - Determinação da tenacidade nos diferentes modos do ensaio ADCB [27]

No caso do ensaio ADCB, ao contrário do método descrito anteriormente, existe apenas um grau de modo misto constante [27], sendo este definido pela razão entre as espessuras dos substratos.

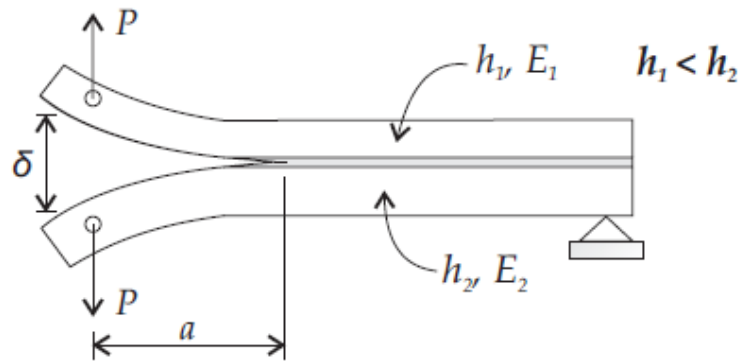


Figura 18 - Representação esquemática do ensaio ADCB [5]

Para efectuar o cálculo da tenacidade à fractura em modo misto foi proposto um modelo em que o provete ADCB (Figura 18) deve ser considerado como sendo constituído por duas vigas elásticas encastadas, assumindo que toda a energia elástica libertada na fractura provenha apenas da energia de deformação elástica dos substratos, U , ficando esta armazenada nos substratos.

Recorrendo à teoria de vigas e derivando a energia elástica de deformação U , em ordem ao comprimento da fenda a , a taxa de libertação de energia resultante pode ser calculada a partir da expressão:

$$G = \frac{3\delta E_1 E_2 h_1^3 h_2^3}{8a^4 (E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3)} \quad (28)$$

sendo δ o deslocamento de abertura, E_1 e E_2 os módulos de rigidez e h_1 e h_2 as espessuras dos substratos. A equação acima descrita dá-nos uma boa aproximação para comprimentos de fenda a muito superiores às espessuras dos substratos. Uma das desvantagens que este modelo de viga apresenta, é a aproximação por excesso de G_c para menores comprimentos de fenda, situação típica das interfaces mais fortes.

Para uma melhor descrição do comportamento à fractura em modo misto no ensaio ADCB, foi aplicado por o modelo de viga em fundação elástica a partir da extremidade ao modelo da viga simples. Desta forma, a viga é considerada

como sendo livre na zona fracturada, apoiada numa fundação elástica a partir da extremidade da fenda.

2.3.3.2 – Assymmetric Tapered Double Cantilever Beam

O Assymmetric Tapered Double Cantilever Beam (ATDCB) (Figura 19) é uma variação do ensaio ADCB, utilizando provetes normalizados do ensaio TDCB. Esta alteração relativamente ao ensaio TDCB foi proposta por Park e Dillard [28]. Os provetes são compostos por duas vigas sendo que uma delas é igual às utilizadas no provete DCB, e a outra igual às utilizadas nos provetes TDCB, como demonstra a Figura 19.

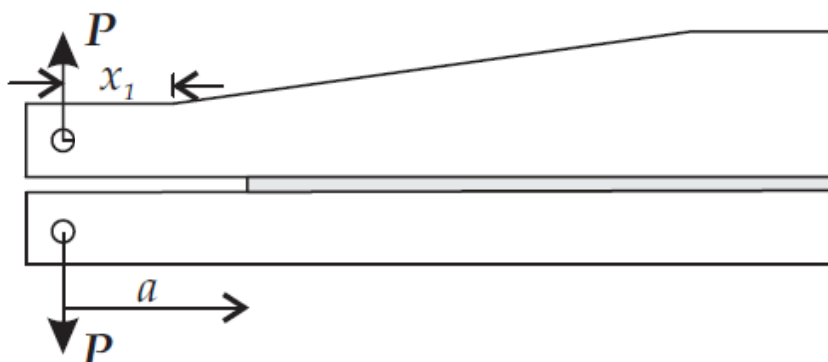


Figura 19 - Representação esquemática do ensaio ATDCB

Para determinar o valor de C , foi assumido que o provete ATDCB teria uma flexibilidade igual ao sistema representado na Figura 19. Esta pode ser expressa pela seguinte equação:

$$C_{total} = C_{DCB} + C_{TDCB} \quad (29)$$

sendo C_{DCB} e C_{TDCB} as flexibilidades dos provetes DCB e TDCB respectivamente.

Recorrendo à equação de Irwin-Keyes, a taxa de libertação de energia total pode ser determinada através da seguinte equação:

$$G_{total} = \frac{P^2 d(C_{DCB})}{2b da} + \frac{P^2 d(C_{TDCB})}{2b da}. \quad (30)$$

Para um provete ATDCB o valor de G é metade do valor de G_{total} , ou seja:

$$G_{ATDCB} = \frac{1}{2} \left(\frac{P^2 d(C_{DCB})}{2b da} + \frac{P^2 d(C_{TDCB})}{2b da} \right) = \frac{1}{2} (G_{DCB} + G_{TDCB}) \quad (31)$$

Estas equações são válidas se a camada de adesivo permanecer normal à direcção do carregamento, como acontece nos casos de ambos os sistemas equivalentes, sendo:

$$G_{DCB} = \frac{4P^2(3a^2 + h^2)}{Eb^2h^3}; \quad (32)$$

$$G_{TDCB} = \frac{4P^2}{Eb^2} m; \quad (33)$$

em que m é o factor geométrico com que o substrato em forma de cunha irá ser maquinado. Na Figura 20 é possível observar a evolução da taxa de libertação de energia à medida que a fenda cresce.

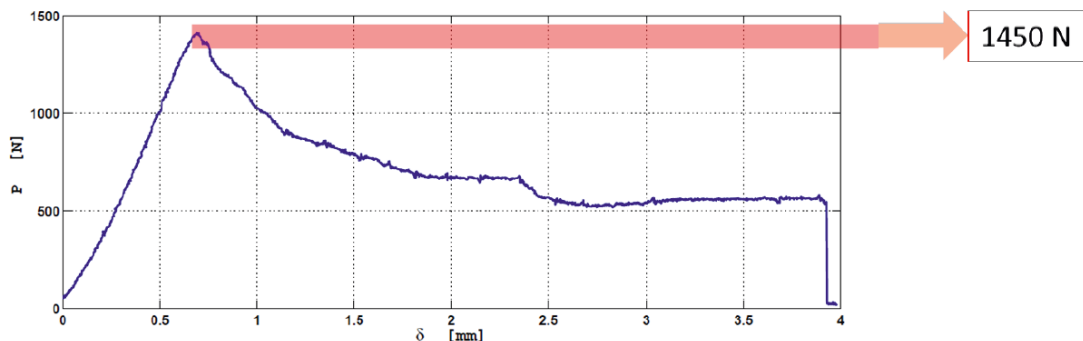


Figura 20 - Curva P - δ típica obtida no ensaio ATDCB [5]

2.3.3.3 – Mixed-Mode Bending (MMB)

O Mixed-Mode Bending é um ensaio normalizado pela norma D 6671, sendo um dos ensaios mais utilizados e o único normalizado para determinação da taxa de libertação de energia de factura G_c em modo misto para materiais compósitos, tendo sido desenvolvido a partir da combinação dos principais ensaios utilizados em Modo I e Modo II, nomeadamente o DCB e o ENF respectivamente (Figura 21).

Devido à utilização de um sistema de alavanca, é possível promover esforços normais e de corte simultaneamente no provete de ensaio, sendo apenas aplicada uma só carga. Este sistema surge como uma evolução do ensaio ENF, que vai provocar um modo de abertura do provete, fazendo com que desta forma o adesivo esteja também sujeito a esforços em modo I.

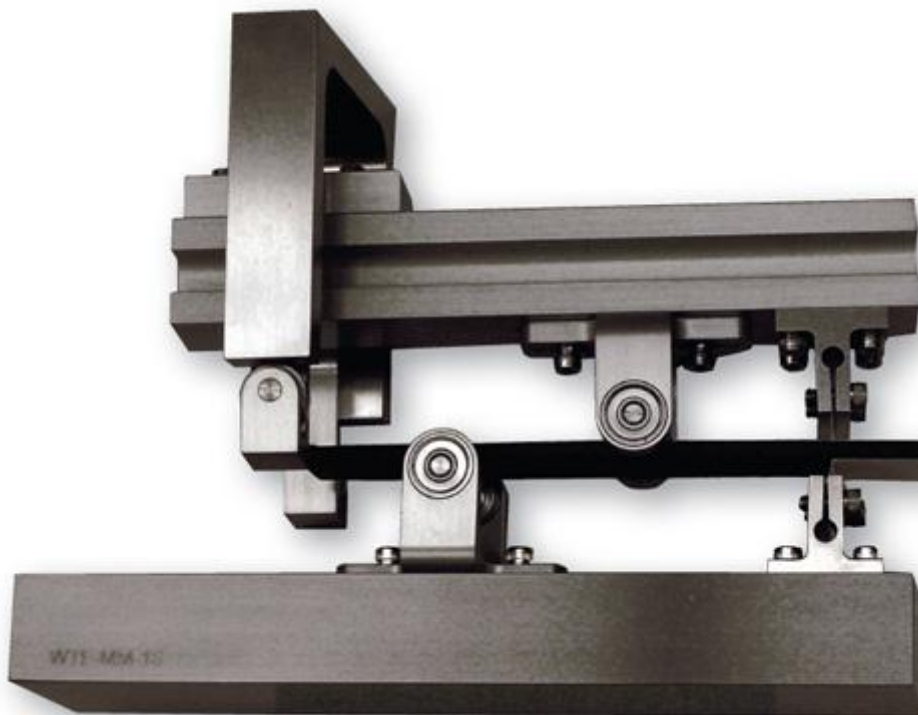


Figura 21 – Representação de um dispositivo para efectuar o ensaio MMB [29]

A partir da actuação de uma única força no braço de solicitação é possível provocar duas solicitações (Figura 22), sendo a da extremidade do provete de abertura, com a mesma direcção mas de sentido oposto à força aplicada, e a

solicitação de escorregamento aquela aplicada na secção intermédia do provete, com a mesma direcção e sentido da força aplicada, como é possível constatar na Figura 23.

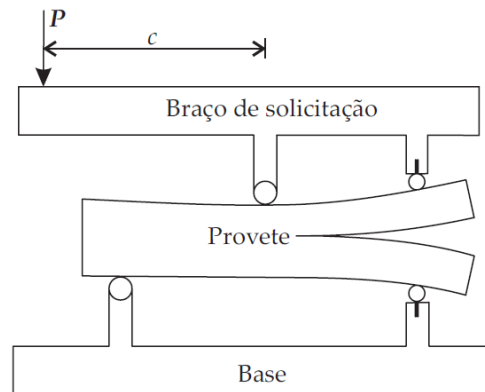


Figura 22 - Representação esquemática do dispositivo MMB [5]

Desta forma, com este ensaio é possível obter uma vasta gama de graus de modo misto através das variações das posições de actuação das cargas que irão actuar no provete. A obtenção daqueles vários graus é possível variando o valor de c , que faz com que o valor relativo das cargas resultantes sobre o modelo também varie. Estes graus variam muito pouco com o decorrer do ensaio (<5%).

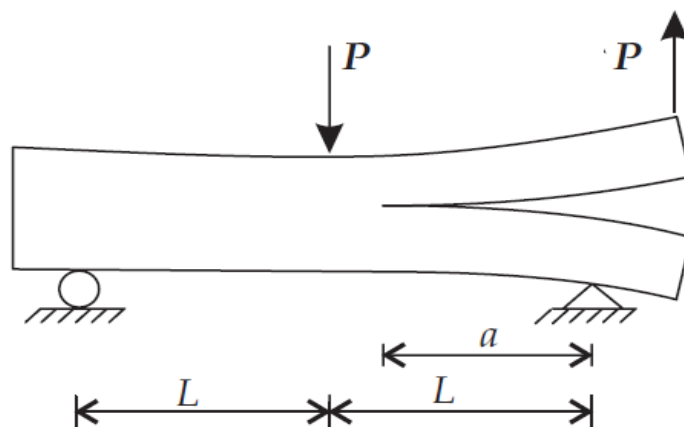


Figura 23 - Representação esquemática da aplicação das forças num ensaio MMB [30]

Recorrendo à teoria de vigas, iremos determinar a solitação em modo I que é dada por:

$$P_I = \left(\frac{3c - L}{4L} \right) P. \quad (34)$$

Não sendo considerados os efeitos de corte transversal e substituindo P_I na equação 9, a taxa de libertação de energia para modo I é dada por:

$$G_I = \frac{3a^2 P^2}{4Eb^2 h^3 L^2} (3c - L)^2. \quad (35)$$

Seguindo a mesma lógica para o modo II, é a solitação aplicada em modo II é dada por:

$$P_{II} = \left(\frac{c - L}{L} \right) P, \quad (36)$$

Substituindo P_{II} na equação 20 obtida quando foram efectuados os cálculos para o ensaio ENF, obtém-se:

$$G_{II} = \frac{9a^2 P^2}{16Eb^2 h^3 L^2} (c - L)^2. \quad (37)$$

Para o cálculo da taxa de libertação de energia total basta apenas somar as equações obtidas para G_I e G_{II} obtendo assim:

$$G_T = \frac{3a^2 P^2}{4Eb^2 h^3 L^2} (3c - L)^2 + \frac{9a^2 P^2}{16Eb^2 h^3 L^2} (c - L)^2 \Leftrightarrow \quad (38)$$

$$\Leftrightarrow G_T = \frac{3a^2 P^2}{16Eb^2 h^3 L^2} [4(3c - L)^2 + 3(c - L)^2]$$

Após obtidas estas equações é possível também calcular o grau de rácio de modos, ψ , bastando para isso fazer:

$$(39)$$

$$\frac{G_I}{G_{II}} = \frac{4}{3} \left(\frac{3c - L}{c + L} \right)^2$$

A determinação de ψ é feita apenas considerando o valor da distância c e do comprimento L , tomando o valor de zero para $c = L/3$, sendo apenas válida para valores de $c \geq L/3$, visto que neste modelo não é considerado o contacto existente entre os dois braços do provete.

Ao efectuarem cálculos e ensaios a partir das equações anteriores, vários autores verificaram que elas subestimavam os valores de G_I e G_{II} quando aplicadas à rotura interlaminar de compósitos. De forma a minimizar este inconveniente e otimizar os resultados obtidos, Kanninen [31] propôs a contabilização dos efeitos de rotação da viga na extremidade da fenda na componente devida ao modo I e dos efeitos de corte em ambas as contribuições, sendo obtidas as seguintes expressões:

$$G_I = \frac{3P^2(3c - L)^2}{4Eb^2h^3L^2} \left(a^2 + \frac{2a}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} + \frac{h^2E}{10G} \right), \quad (40)$$

$$G_{II} = \frac{9a^2P^2(c - L)^2}{16Eb^2h^3L^2} \left(a^2 + \frac{2h^2E}{10G} \right), \quad (41)$$

sendo

$$\lambda = \left(\frac{6E_t}{h^4E} \right)^{1/4}, \quad (42)$$

em que E_t é o módulo de Young na direcção transversal.

2.3.3.4 – Single Leg Bending (SLB)

O ensaio Single Leg Bending (Figura 24) é outro dos ensaios utilizados para a avaliação da taxa de libertação crítica em modo misto, tendo como base o ENF, só que ao contrário deste, o braço inferior tem menor comprimento, fazendo com que uma das extremidades do provete apoie apenas no braço superior dando origem a um modo de abertura (modo I) e a um modo de corte (modo II).

É um ensaio cuja execução é mais simples quando comparados com outros efectuados para o mesmo fim.

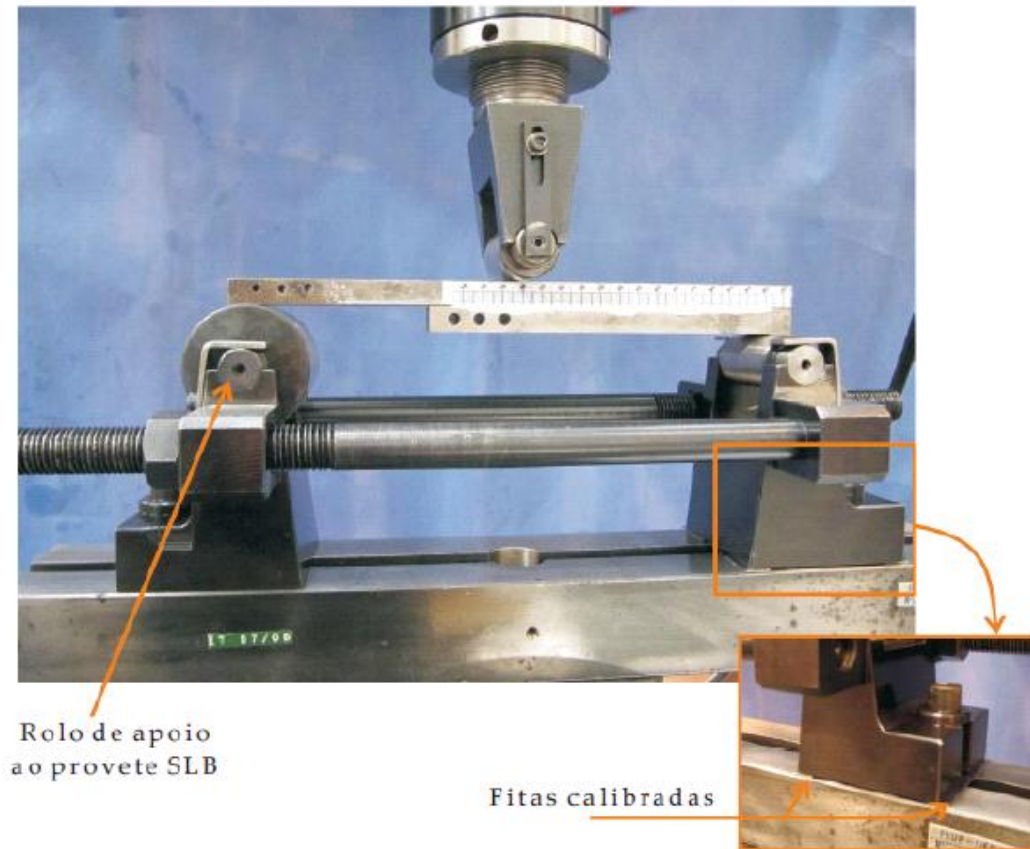


Figura 24 - Montagem experimental para ensaio dos provetes SLB [5]

Para o cálculo do valor da taxa de libertação de energia, temos que recorrer à flexibilidade do provete. Szekrenyes e Uj [32] propuseram, já incluindo os efeitos de Saint Venant, de corte transverso, a deformação de corte existente na extremidade da fenda e o modelo de viga em fundação elástica de Winkler, a seguinte equação para a determinação da flexibilidade:

$$\begin{aligned}
C_{SLB} = & \frac{7a^3 + 2L^3}{8bh^3E} + \frac{3a^2}{4\pi bh^2E} \left(\frac{E}{G}\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{a + 2L}{8bhkG} + \\
& + \frac{a^3}{8bh^3E} \left[0.98 \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{E}{G}\right)^{\frac{1}{2}} + 0.43 \left(\frac{h}{a}\right)^2 \left(\frac{E}{G}\right) \right] + \\
& + \frac{a^3}{8bh^3E} \left[3.32 \left(\frac{h}{a}\right) + 3.68 \left(\frac{h}{a}\right)^2 + 1.36 \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right]
\end{aligned} \quad (43)$$

Efectuando a derivada em ordem ao comprimento da fenda a obtém-se para cada modo:

$$G_I = \frac{12P^2a^2}{16b^2h^3E} \left[1 + 0.55 \left(\frac{h}{a}\right) + 0.31 \left(\frac{h}{a}\right)^2 + 0.32 \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{E}{G}\right)^{\frac{1}{2}} + 0.1 \left(\frac{h}{a}\right)^2 \left(\frac{E}{G}\right) \right]; \quad (44)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2a^2}{16b^2h^3E} \left[1 + 0.218 \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{E}{G}\right)^{\frac{1}{2}} + 0.048 \left(\frac{h}{a}\right)^2 \left(\frac{E}{G}\right) \right]; \quad (45)$$

Sendo b a largura do provete, a o comprimento da fenda, h a altura de cada viga constituinte do provete (Figura 25), $k=5/6$ o factor de correcção ao corte, E o módulo de Young e G o módulo de elasticidade ao corte.

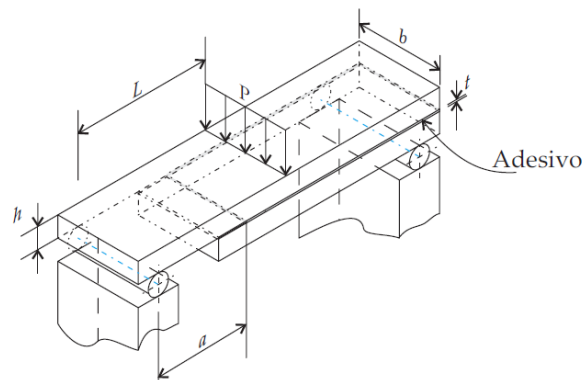


Figura 25 - Representação esquemática do ensaio SLB [5]

Na Figura 26 é apresentada a Curva P - δ típica deste ensaio.

Os mesmos autores apresentaram outra formulação de partição, sendo esta baseada na teoria de vigas e considerando apenas os efeitos de corte e o modelo de viga assente em fundação elástica.

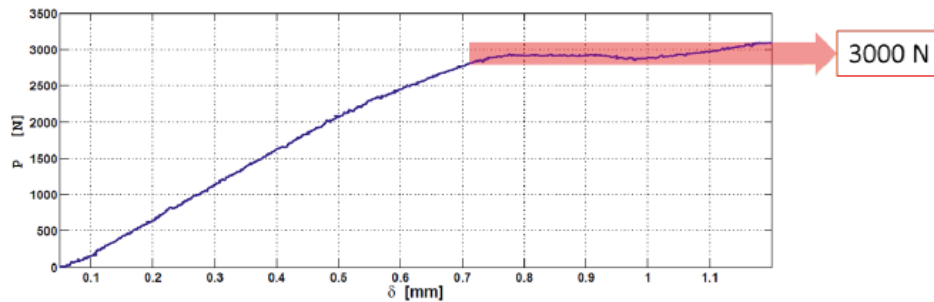


Figura 26 - Curva P - δ típica obtida no ensaio SLB [5]

2.3.3.5 – Fernlund–Spelt

Este foi um ensaio desenvolvido e proposto por G. Fernlund e J. K. Spelt [2] (Figura 27)

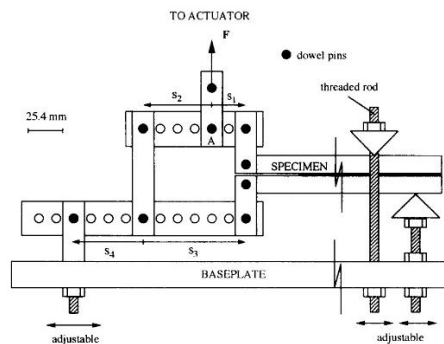


Figura 27- Representação esquemática do ensaio Fernlund–Spelt (FS) [2]

Ensaio realizado com este dispositivo demonstram que a obtenção dos valores do grau de modo misto e de G_c são independentes do comprimento da fenda, factor que elimina uma quantidade significativa de erros associados a medições experimentais. Facto não menos importante é a pequena influência do atrito entre as faces da fenda, podendo esse efeito ser desprezado.

Outra grande vantagem da utilização deste ensaio baseia-se no facto de que, recorrendo a provetes normalizados DCB, é possível percorrer toda a gama de

rácio de modo misto. Desta forma é possível simplificar o modo como o grau de modo misto é calculado quando comparado com a utilização de provetes não normalizados.

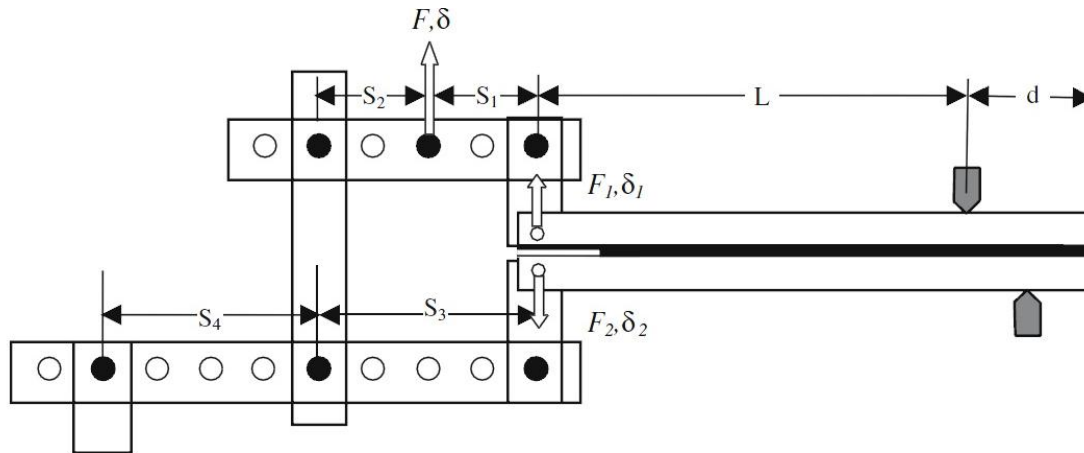


Figura 28- Representação das forças que actuam no provete recorrendo ao ensaio Fernlund-Spelt (FS) [33]

O dispositivo FS, como demonstra a Figura 28, consiste num sistema de vigas, construídas em aço, e articuladas, sendo ligadas entre si por pinos, que distribui a força F , que vai actuar na extremidade do provete DCB sob a forma das forças F_1 e F_2 . Esta distribuição é variável e dependente das distâncias S_1 , S_2 , S_3 e S_4 , sendo estas medidas relativamente aos centros dos pinos de ligação.

Desta forma, aplicando as equações de equilíbrio estático ao sistema, obtêm-se as seguintes equações para o cálculo de F_1 e F_2 :

$$F_1 = F \left(1 - \frac{S_1}{S_3} \right); \quad (46)$$

$$F_2 = F_1 \frac{S_1}{S_2} \frac{1}{\left(1 + \frac{S_3}{S_4} \right)}. \quad (47)$$

Assumindo que as deformações tangenciais são desprezáveis, pode-se determinar a taxa de libertação de energia a partir da expressão:

$$\mathcal{G} = \frac{12(F_1 a)^2}{2Eh^3} \left[1 + \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2 - \frac{1}{8} \left(1 + \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2 \right) \right], \quad (48)$$

sendo a o comprimento da fenda, E e h o módulo de Young e a altura do substrato.

O modo misto é definido pelo ângulo de fase nominal de carregamento $\psi = \arctan(\sqrt{G_{II}/G_I})$, sendo determinado neste caso pela equação:

$$\psi = \arctan \left[\frac{\sqrt{3} \left(\frac{F_1}{F_2} + 1 \right)}{2 \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right)} \right]. \quad (49)$$

Tabela 3- Relação entre rácios de modo misto respectivas forças F_1 e F_2 associadas

Rácio de grau misto $\Psi(^{\circ})$	Relação entre forças	
0	$F_1 = F$	$F_2 = -F$
48	$F_1 = \frac{3F}{5}$	$F_2 = -\frac{F}{10}$
75	$F_1 = \frac{F}{2}$	$F_2 = \frac{3F}{14}$
90	$F_1 = \frac{F}{4}$	$F_2 = \frac{F}{4}$

Nos ensaios feitos a partir deste dispositivo, a propagação da fenda pode ser instável ou estável. Não sendo o primeiro caso de todo favorável, é necessário criar condições de ensaio garantir a ocorrência da segunda situação.

O critério para uma propagação de fenda estável pode ser escrito na forma:

$$\left[\frac{dG}{da} \right]_{A \text{ fixed}} < 0 \quad (50)$$

Calculando a variação de G em relação à variação de a obtém-se:

$$\frac{dG}{da} = \frac{12F_1 a}{Eh^3} \left[\frac{dF_1}{da} a + F_1 \right] \times \left[1 + \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2 - \frac{1}{8} \left(1 + \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2 \right) \right] \quad (51)$$

Para ser possível fazer uma correcta avaliação de dG/da , é necessário ter em consideração a deformação do provete provocada pelas componentes da força

aplicada, de F_1 e F_2 . Os valores das deformações na extremidade do provete, δ_1 e δ_2 podem ser calculados, recorrendo à teoria de vigas, a partir das seguintes equações:

$$\delta_1 = \frac{12F_1}{Eh^3} \left[\frac{a^3}{3} + \frac{1}{24} \left(1 + \frac{F_2}{F_1} \right) (L^2(L + \delta) - a^3) \right] \quad (52)$$

$$\delta_2 = \frac{12F_1}{Eh^3} \left[\frac{a^3 F_2}{3 F_1} + \frac{1}{24} \left(1 + \frac{F_2}{F_1} \right) (L^2(L + \delta) - a^3) \right] \quad (53)$$

Tendo calculado o grau de modo misto, é necessário ainda determinar o parâmetro adimensional β (equação 54), essencial para verificação da estabilidade de propagação da fenda. Assim, β é dado pela seguinte equação:

$$\beta = \frac{L^2(L + d)}{a^3} - 1 \quad (54)$$

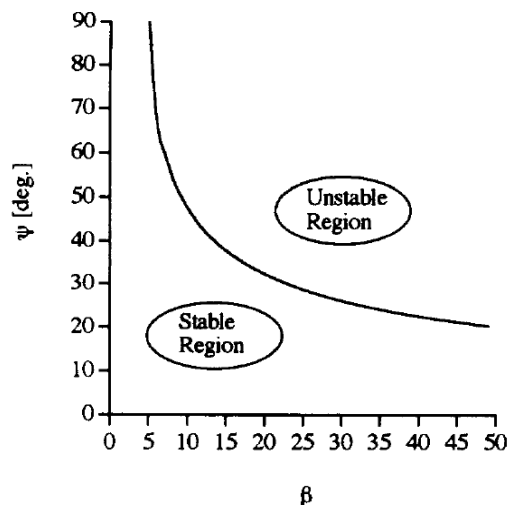


Figura 29- Diagrama de estabilidade de propagação da fenda para o ensaio FS [2]

A Figura 29 mostra que para promover uma propagação da fenda estável em modo II puro ($\psi = 90^\circ$), é imperativo que $\beta < 5$. Já para o modo I puro ($\psi = 0^\circ$), não há qualquer imposição ou restrição ao valor de β para que se obtenha uma propagação de fenda estável.

3 - Descrição do modelo do dispositivo de modo misto

3.1 - Geometria do dispositivo

Nesta secção é apresentada a geometria do dispositivo concebido bem como a dos provetes que vão ser utilizados. As dimensões do dispositivo (Figura 30) e dos seus componentes (Figura 31) estão representadas em anexo, nos desenhos de definição.

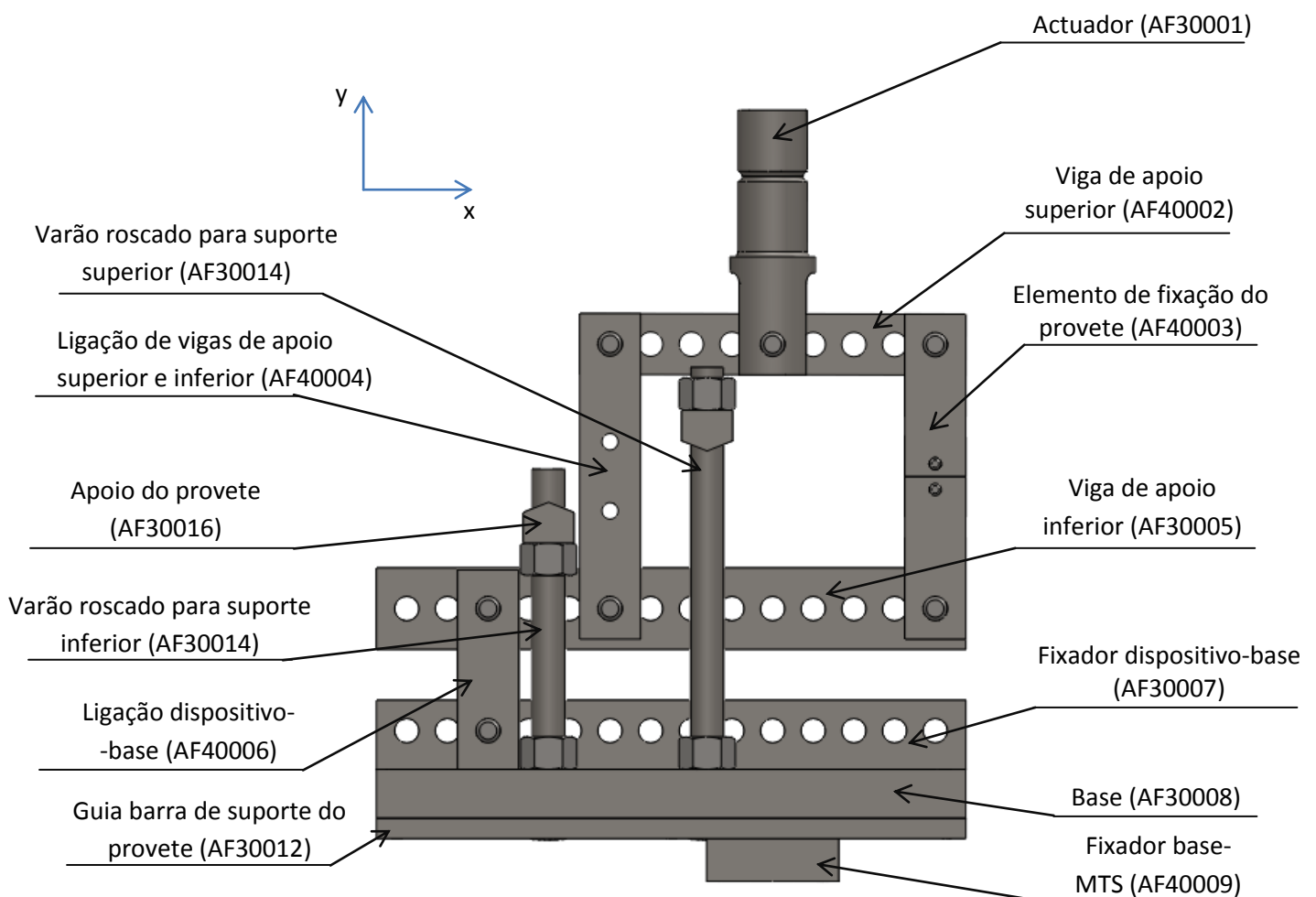


Figura 30 - Vista lateral do dispositivo

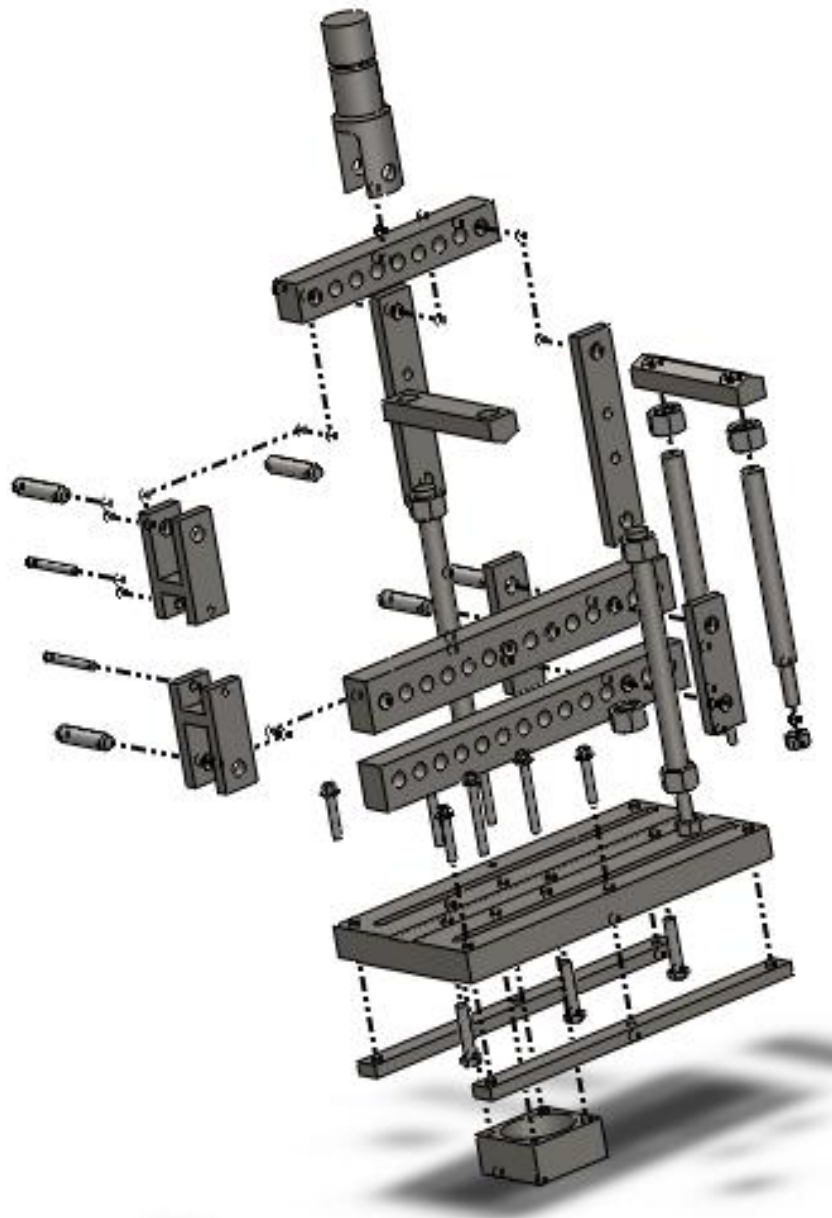


Figura 31 - Vista explodida do dispositivo

O provete para o qual este dispositivo foi dimensionado e que que será ensaiado neste dispositivo será o mesmo tipo de provete utilizado nos ensaios em modo I e modo II, nomeadamente o provete DCB [18], com a única diferença no valor do comprimento, em que no nosso caso, é de 290 mm em vez dos 356 mm normalizados. Este provete já foi utilizado em anteriores trabalhos [34] tendo provado a sua fiabilidade.

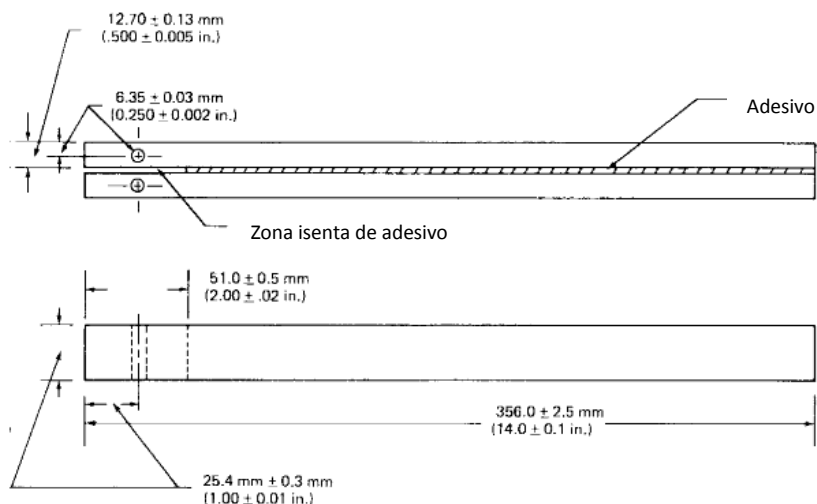


Figura 32- Provete normalizado segundo a norma ASTM D 3433 – 99 [18]

Como podemos ver na Figura 32, os provetes são constituídos por duas vigas metálicas, de espessura constante e igual comprimento.

Ao contrário do dispositivo proposto por Fernlund–Spelt [2], o que aqui é desenvolvido coloca o provete no sentido oposto, no interior do próprio dispositivo, conseguindo desta forma otimizar o espaço (Figura 33). Prevê-se que esta alteração na geometria do dispositivo os resultados não sejam influenciados.

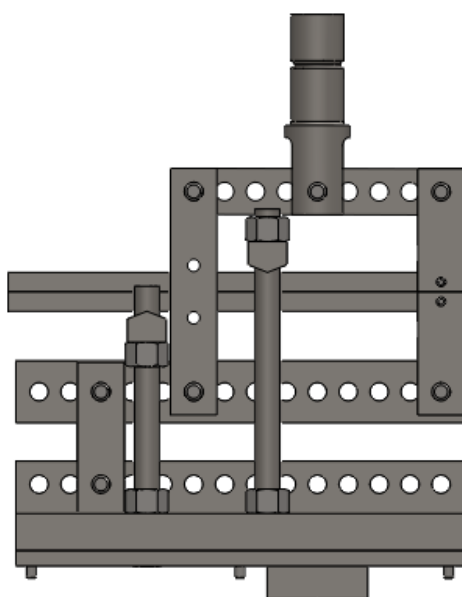


Figura 33 - Posição do provete no dispositivo

3.2 – Programas utilizados

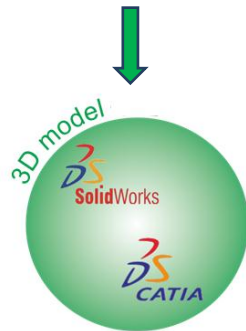
Para efectuar as simulações referentes às forças que actuam nos elementos do dispositivo e ao comportamento do adesivo foram escolhidos os programas Solidworks® e o ABAQUS®.

Para fazer o dimensionamento do dispositivo foi utilizado o Solidworks® uma vez que é um programa que permite o dimensionamento dos componentes em 3D, dando ao utilizador uma perspectiva espacial que não seria possível num desenho 2D. Para além disso, este programa não tem exigências muito elevadas ao nível do hardware do computador quando comparado com outros programas. Para a determinação das constantes das molas os provetes DCB e ENF foram simulados no programa ABAQUS® para que as simulações no Solidworks® fossem validadas.

Fizeram-se as simulações dos comportamentos de um provete DCB e de um provete ENF em ABAQUS® e os resultados obtidos em termos de forças e deslocamentos foram utilizados para ajustar os valores das constantes das molas correspondentes ao adesivo no Solidworks®.

A Figura 34 dá uma representação esquemática do trabalho desenvolvido.

Desenho dos componentes,
montagem e simulação da
actuação de forças



Problema: Não é possível simular elementos coesivos em Solidworks®
Solução: Utilização de um programa em que seja possível a simulação de elementos coesivos.



Problema: Processo muito moroso devido ao elevado nível de processamento de informação
Solução: Simular apenas o comportamento do adesivo em ABAQUS® e fazer a aproximação do comportamento do adesivo em Solidworks® através de molas

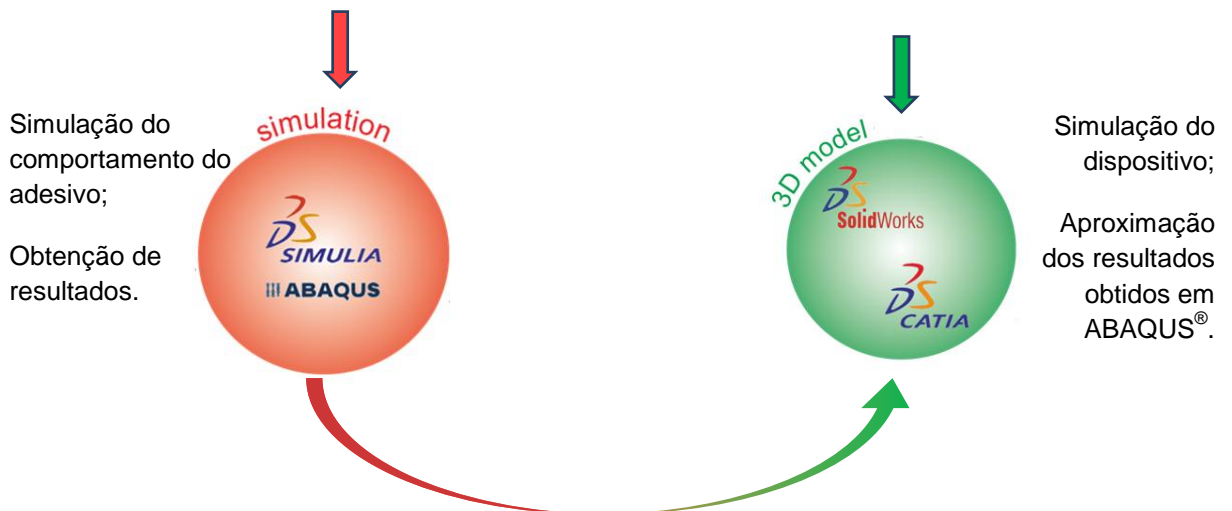


Figura 34 - Representação esquemática do trabalho de simulação efectuado

3.3 – Malha e respectivos elementos

Para as simulações efectuadas no Solidworks[®], foram usados elementos sólidos 3D tetraédricos parabólicos integrados com 4 pontos de Gauss (para verificação do Jacobiano).

A qualidade da malha exerce um papel importante na precisão dos resultados. O Solidworks[®] permite alterar dois parâmetros muito importantes para variar a qualidade dos elementos de uma malha: a verificação de proporção e o número de pontos de Gauss.

Para obter uma melhor precisão numérica, utilizou-se uma malha com elementos tetraédricos uniformes de arestas com o mesmo comprimento. Para uma geometria geral, não é possível criar uma malha de elementos tetraédricos perfeitos. Devido a arestas e geometrias não lineares e cantos pronunciados, os elementos gerados podem ter arestas não uniformes. Quando as arestas de um elemento passam a ter comprimentos muito diferentes, a precisão dos resultados diminui drasticamente.

A proporção de um elemento tetraédrico perfeito é usada como base para o cálculo da proporção dos outros elementos sendo definida como a razão entre a aresta mais longa e a normal correspondente a um tetraedro perfeito. Por definição a proporção de um elemento tetraédrico perfeito é 1,0. O parâmetro verificação da proporção é usado automaticamente pelo programa para verificar a qualidade da malha.

O número de pontos de Gauss tem como base um número de pontos traçados dentro de cada elemento. Aumentar este número de pontos permite aumentar a precisão da malha. Contudo, torna o cálculo muito mais moroso. Por essa razão foi escolhido o elemento de 4 nós. Para além de ser um cálculo mais rápido, também é menos complexo, sendo possível fazer os cálculos pelos nossos próprios meios.

Na Tabela 4 são apresentadas as características da malha que foi utilizada para fazer a simulação em Solidworks[®] (Figura 35).

Tabela 4 - Características da malha utilizada na simulação em Solidworks®.

Tipo de malha	Solid Mesh
Gerador de malha utilizado	Curvature based mesh
Nº de pontos Jacobianos	4 Pontos
Qualidade da malha	Elevada

Para simular o comportamento do adesivo, foi necessário recorrer a elementos coesivos, sendo necessário por isso recorrer ao ABAQUS®.

Neste caso, apenas foi simulado o comportamento do provete, sendo necessário recorrer a dois tipos de elementos:

- C3D8R para os substratos;
- COH3D8 para os elementos coesivos.

O elemento C3D8R é um elemento linear reduzido a apenas um ponto de integração sendo adequado para simular materiais com um comportamento linear elástico uma vez que tem tendência a não ser demasiado duro.

Para prever a propagação de uma fenda é necessário ter uma malha fina o suficiente para que seja possível uma melhor avaliação do comportamento coesivo. Por essa razão é usado o elemento coesivo COH3D8.

Em seguida comparamos as malhas utilizadas na simulação do comportamento do adesivo.

Tabela 5 - Comparação das malhas utilizadas para o mesmo provete

Ensaio	ABAQUS®		Solidworks®	
	DCB	ENF	DCB	ENF
Tipo de malha	C3D8R + COH3D8	C3D8R + COH3D8	Solid Mesh	
Nº de pontos do elemento	C3D8R (8) + COH3D8 (8)	C3D8R (8) + COH3D8 (8)	4 Pontos	
Qualidade da malha	Muito elevada		Elevada	
Nº de nós	100624	92199	24264	17909
Nº de elementos	87750	79380	14980	10478

Na Tabela 6 são apresentadas as propriedades da malha utilizada para fazer as simulações.

Tabela 6 - Propriedades da malha na determinação das forças F_1 e F_2

Tipo de malha	Solid Mesh
Gerador de malha utilizado	Curvature based mesh
Nº de pontos Jacobianos	4 Pontos
Dimensão máxima dos elementos	28.6043 [mm]
Dimensão mínima dos elementos	5.72086 [mm]
Qualidade da malha	Elevada
Nº total de nós	76940
Nº total de elementos	44292

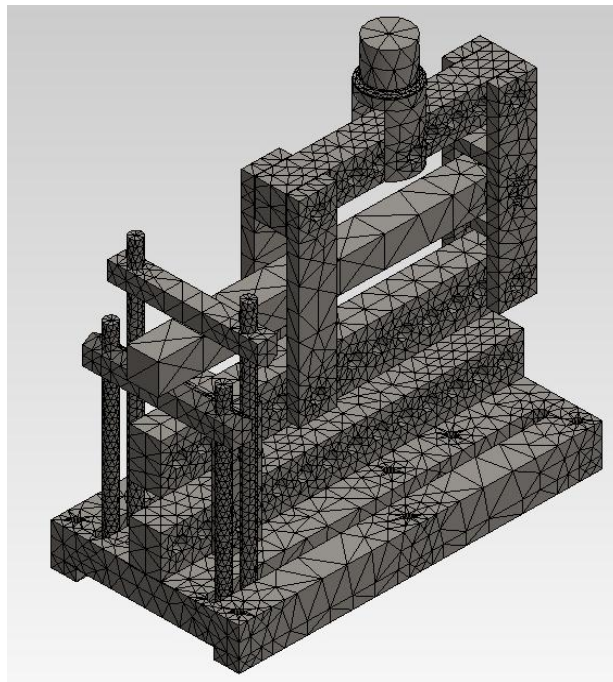


Figura 35 - Representação da malha utilizada para simulação do dispositivo

3.4 – Critérios de Resistência

3.4.1 – Material

Para o fabrico do dispositivo foram usados dois tipos de aço:

- Aço DIN CK 45;
- Aço AISI P20

A Tabela 8 apresenta as características mecânicas dos materiais utilizados.

Tabela 7 - Propriedades dos materiais utilizados

Material	Categoria	Estado Fornecido	Dureza (HB)	Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de rotura [MPa]
Aço CK 45	Aço Carbono para Ferramentas	Estriado	170	323	578
Aço PM 300	Aço de Moldes	Tratado	290/330	640	993

Todas as peças à excepção da base foram construídas no aço PM 300. Usou-se o aço CK 45 para a base para facilitar a maquinagem.

3.4.2 – Critério de Von Mises

O critério da energia de Energia de Distorção, ou mais conhecido como critério de Von Mises, é um critério aplicável a materiais dúcteis, estabelecendo que cedência ocorre num dado ponto de uma peça quando o valor da energia específica de distorção instalada nesse ponto iguala a energia específica de distorção instalada num ponto do provete do ensaio de tracção [35], no momento da cedência, ou seja, quando:

$$U = U_{ced} \quad (55)$$

Para o cálculo da energia de deformação, é necessário conhecer as tensões principais. Após efectuar o cálculo destas estamos em condições de determinar a energia de deformação, dada pela equação:

$$U = \frac{1 + \nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2], \quad (56)$$

logo, a condição limite de resistência pode ser dada pela expressão:

$$\frac{1 + \nu}{6E} [2\sigma_{eq}^2] = \frac{1 + \nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (57)$$

determinando a tensão equivalente segundo este critério através da expressão:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (58)$$

Uma vez que o critério de Von Mises é um critério energético, assim como o critério utilizado para a determinação da taxa de libertação de energia, será o escolhido para determinação das tensões. Para além desse factor, temos ainda os factos de que não só o critério de Von Mises encontra-se mais em concordância com os resultados experimentais bem como é o critério que geralmente é utilizado nos códigos de projecto.

4 – Resultados da modelação do dispositivo de modo misto

Do conjunto de todos os ensaios experimentais [4] já realizados com o provete escolhido para o dispositivo de modo misto, percebemos que aquele que assume maior valor para a força máxima é o ENF com 16 kN conforme se pode ver na Figura 14. Por essa razão, o dispositivo foi dimensionado para uma força de 20 kN, tendo assim um factor de segurança de 1,25. Esta força actuará na direcção vertical, aplicada no Actuador (ver Figura 34)

4.1 – Diagrama de forças actuando sobre um provete

O ponto de partida para o desenvolvimento do dispositivo foram os provetes de ensaio. A partir das suas dimensões e das forças envolvidas, procedeu-se ao cálculo dos elementos que constituem o dispositivo.

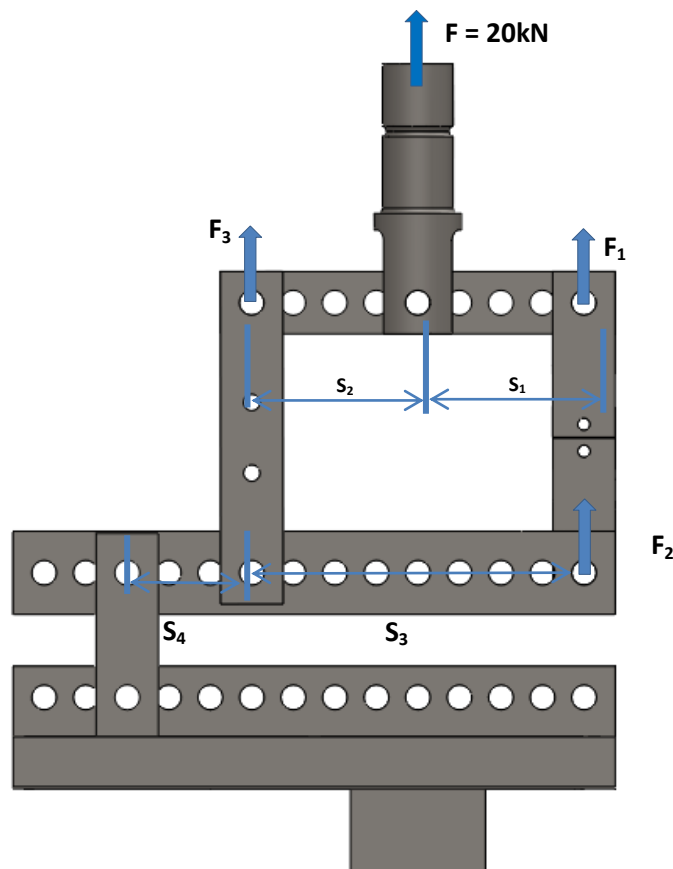


Figura 36 - Representação esquemática das forças que actuam no provete

De modo a validar o dispositivo desenvolvido, determinou-se numericamente o diagrama forças actuando sobre o provete e comparou-se os valores numéricos com valores teóricos da resistência dos materiais.

A partir das equações 46 e 47 é possível determinar as forças F_1 e F_2 .

$$F = 20 \text{ kN}$$

$$S_1 = S_2 = 80 \text{ mm}$$

$$S_3 = 160 \text{ mm}$$

$$S_4 = 60 \text{ mm}$$

$$F_1 = F \left(1 - \frac{S_1}{S_3}\right) = 20 \left(1 - \frac{80}{160}\right) = 10 \text{ kN}$$

$$F_2 = 10 \frac{80}{80} \frac{1}{\left(1 + \frac{160}{60}\right)} = 2,72 \text{ kN}$$

$$F_3 = F - F_1 = 10 \text{ kN}$$

obtendo-se:

$$F_1 = \frac{1}{2}F$$

$$F_2 = 0.114F$$

A Tabela 8 apresenta as forças obtidas com o SolidWorks® e a comparação com os valores teóricos. Os valores de força F usados correspondem a um deslocamento de 0.5 mm. Aplicou-se um deslocamento ao dispositivo em vez de uma força para facilitar a convergência.

Tabela 8 - Valores das forças obtidos na simulação em Solidworks®

	Cálculos analíticos (Eq. 46 e 47)	Resultados da Simulação no Solidworks®	Diferença	$\frac{F_i}{F}$
F [N]	688,7	688,7	-	684,1
S ₁ [mm]	80	80	-	-
S ₂ [mm]	80	80	-	-
S ₃ [mm]	160	160	-	-
S ₄ [mm]	60	60	-	-
F ₁ [N]	344,35	344,50	0,06%	0.5
F ₂ [N]	93,9	93,9	0,00%	0.136

4.2 – Dimensionamento dos componentes do dispositivo

As Figura 37e 38 apresentam a distribuição de tensão e os deslocamentos para um deslocamento aplicado no actuador de 0,5 mm.

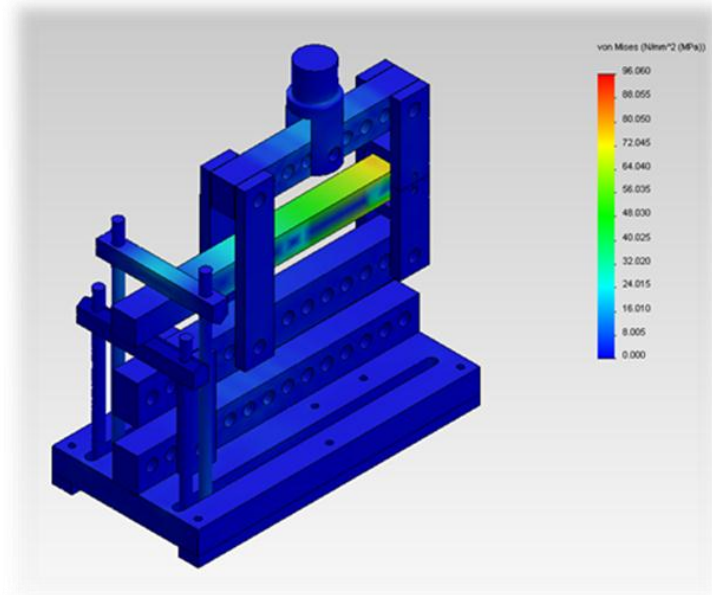


Figura 37 - Distribuição de tensões no dispositivo

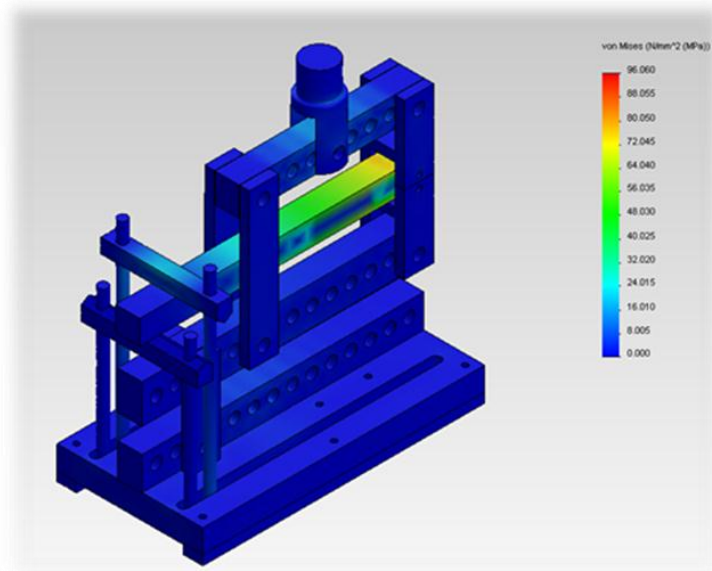


Figura 38 - Deslocamentos no dispositivo

Após o modelo ter sido validado é possível passar ao dimensionamento dos componentes. As Tabelas 9 a 24 apresentam as tensões máximas e mínimas, os deslocamentos máximos e mínimos, as propriedades da malha (Figuras 40 e 42) que foi utilizada para calcular esses valores assim como as condições fronteira utilizadas e o modo como actua a força.

4.2.1 - Actuador

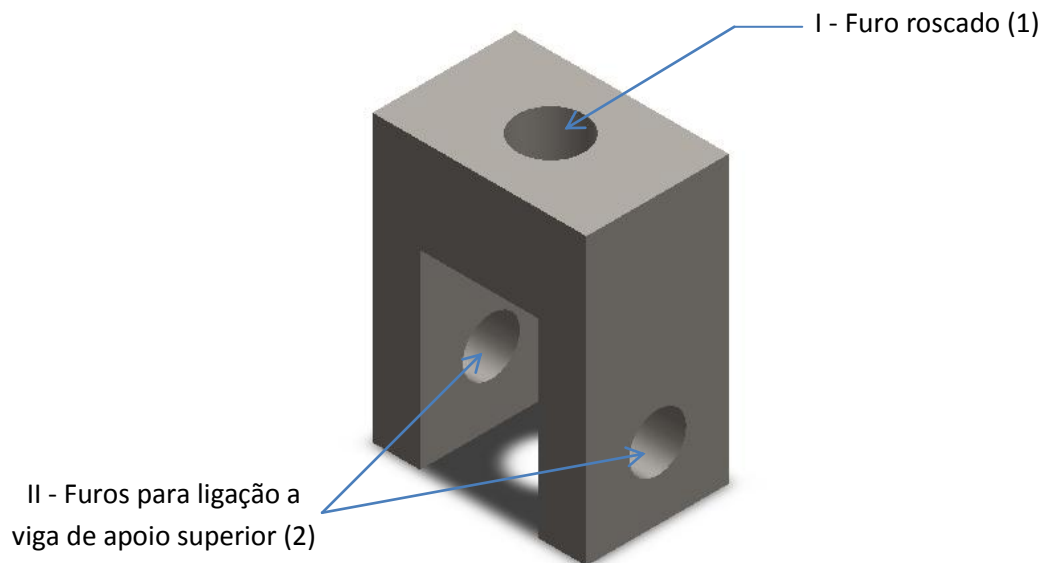


Figura 39 - Representação do Actuador

Estudo estático

Para efectuar o estudo do efeito dos esforços a que o actuador (Figura 39) seria submetido foram consideradas duas condições fronteira.

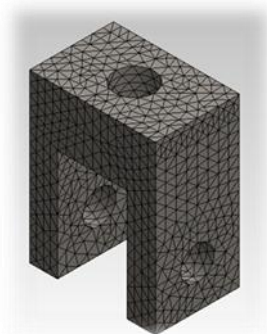


Figura 40 - Representação esquemática da malha utilizada no actuador

Condição fronteira nº 1

Tabela 9 - Simulação tensões e deslocamentos no actuador de CF 1

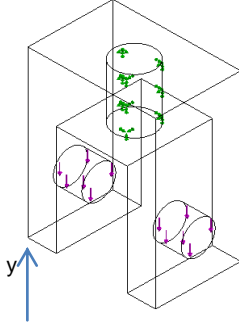
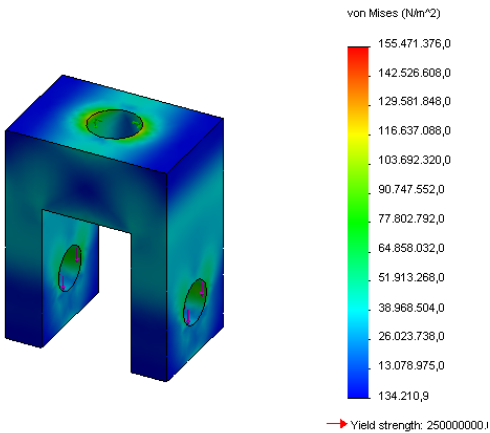
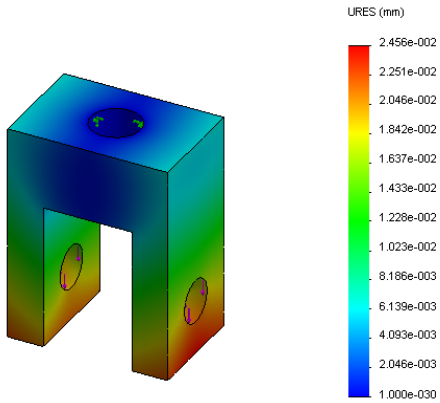
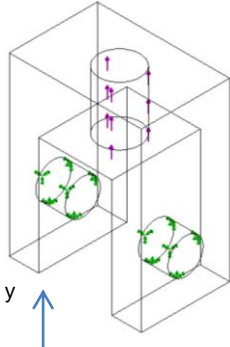
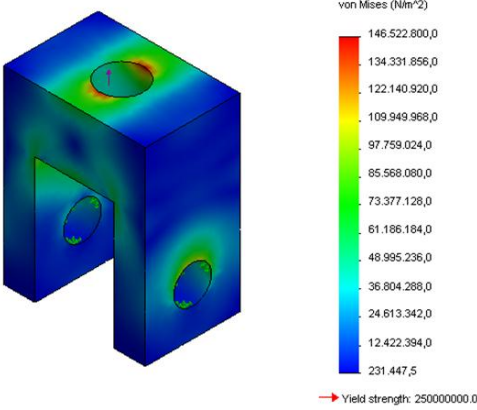
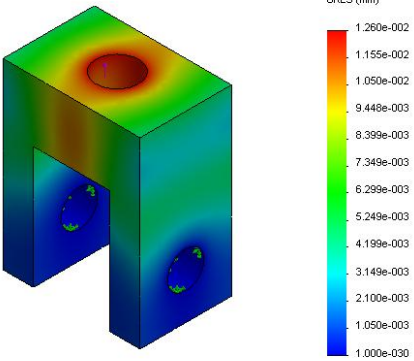
<p>Tipo de sollicitação</p>	 <p>I – Encastrado II- Actuação de força - Força com a direcção do eixo dos yy e sentido negativo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>155</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0,13</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0,360</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>45,66 x 10⁻⁶</p>	<p>m³</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>10345</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>16463</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>3,70</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>3,70</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0.025</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0</p>	<p>mm</p>

Tabela 10 - Simulação tensões e deslocamentos no actuador de CF 2

<p>Tipo de sollicitação</p>	 <p>I –Actuação de força II- Encastrado</p> <p>A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido positivo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>146</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0.23</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0,36</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>$45,66 \times 10^{-6}$</p>	<p>m³</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>10345</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>16463</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>3.596</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>3.596</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0.0126</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0</p>	<p>mm</p>

Aplicando a força prevista para o dimensionamento, obtêm-se tensões máximas de 155,5 MPa, situação perfeitamente admissível para o aço em questão. Após a concepção desta peça, verificou-se que seria possível eliminar a necessidade de uma peça de ligação à máquina de ensaio, para além de simplificar o fabrico do próprio componente. Por essa razão efectuou-se uma optimização a fim de facilitar a fabricação e de fazer a ligação directa à MTS.

Evolução/optimização

Devido a uma maior facilidade e rapidez no fabrico nas oficinas da Faculdade de Engenharia da Universidade, para além de tornar a peça adaptável à MTS, optou-se por redefinir a nossa peça de actuação de força e convertemo-la numa peça cilíndrica (Figura 41), em que a zona superior irá roscar directamente na MTS.

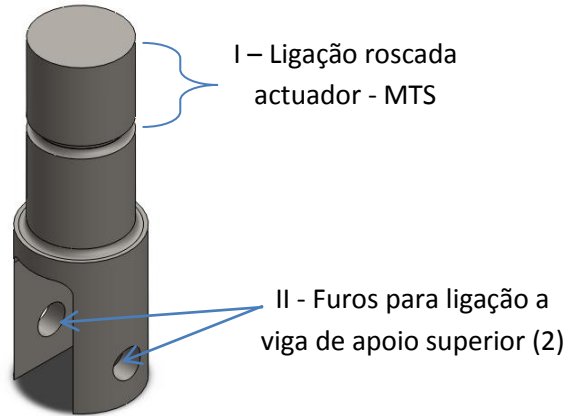


Figura 41 - Representação da optimização do actuador

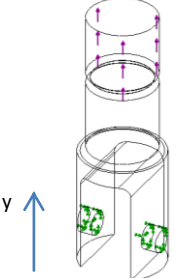
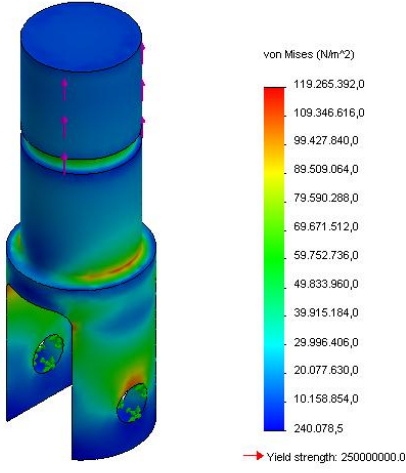
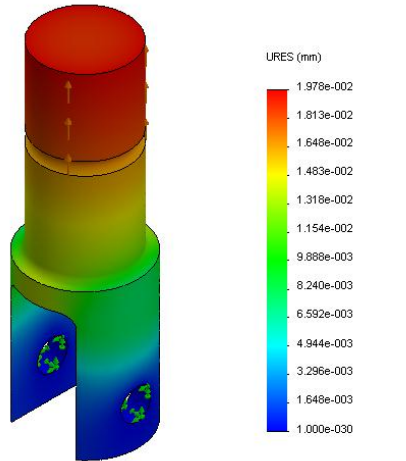


Figura 42 – Representação esquemática da malha utilizada na optimização do actuador

Estudo estático

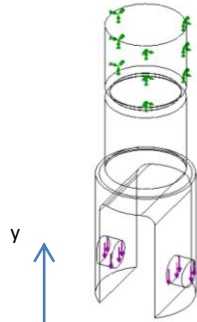
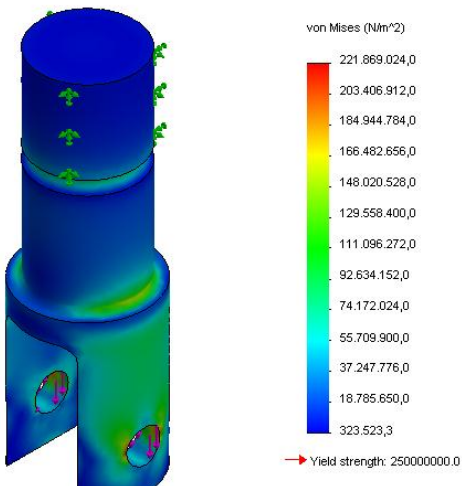
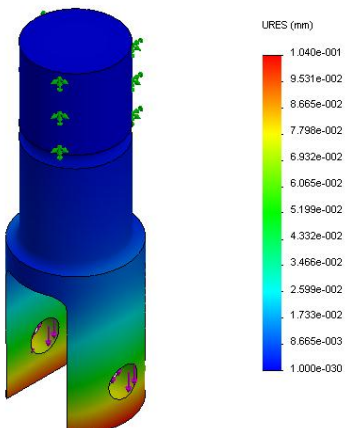
Condição fronteira nº 1

Tabela 11 - Simulação tensões e deslocamentos no actuador optimizado de CF 1

<p>Tipo de sollicitação</p>	 <p>I –Actuação de força II- Encastrado A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido positivo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>119</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0,24</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0,73</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>$92,84 \times 10^{-6}$</p>	<p>m³</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>14234</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>22289</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>3,952</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>3,952</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0,01978</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0</p>	<p>mm</p>

Condição fronteira nº 2

Tabela 12 - Simulação tensões e deslocamentos no actuador otimizado de CF 2

<p>Tipo de solicaçãoção</p>	 <p>I – Encastado II- Actuação de força A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido negativo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>222</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0,32</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0,73</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>92,84 x 10⁻⁶</p>	<p>m³</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>19901</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>30464</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>3,451</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>3,451</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0,1040</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0</p>	<p>mm</p>

4.2.2- Viga de apoio superior

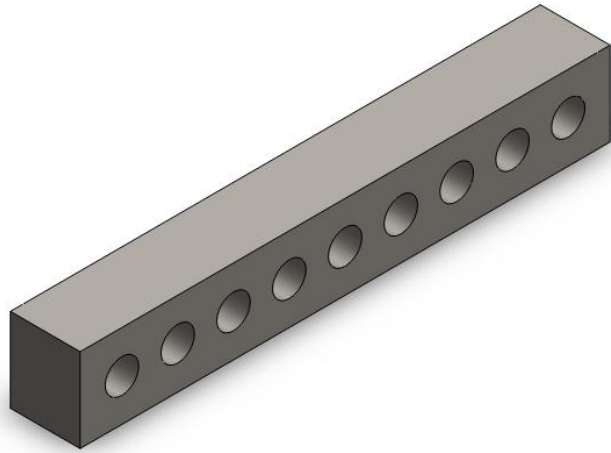


Figura 43 - Representação da viga de apoio superior

Estudo estático

Para o estudo estático da viga de apoio superior (Figura 43) colocou-se dois apoios simples nos furos extremos e faremos variar uma carga de 20 kN ao longo da viga (Figura 44).

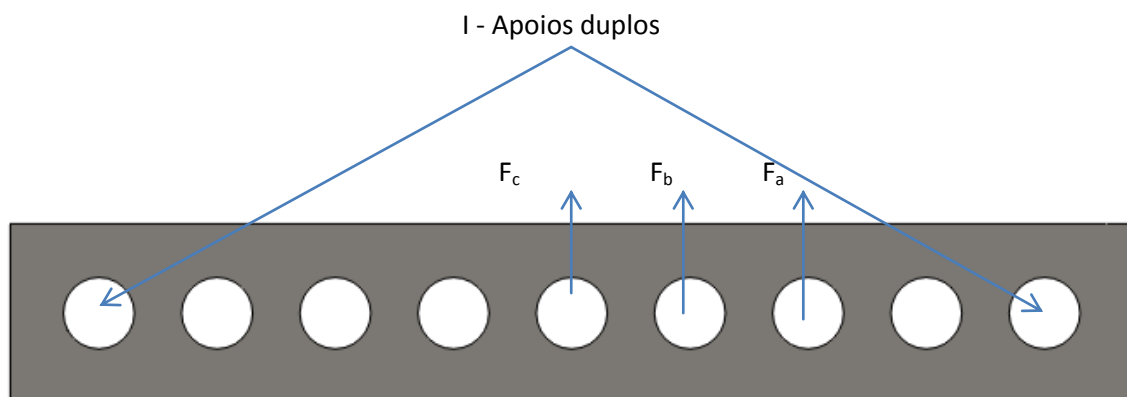
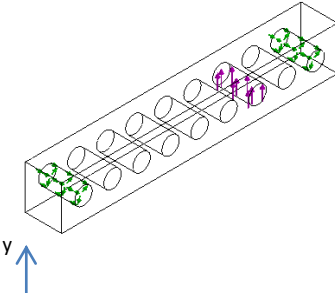
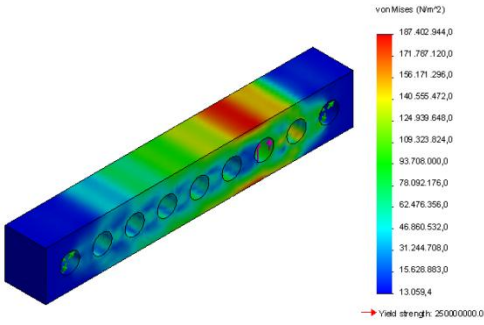
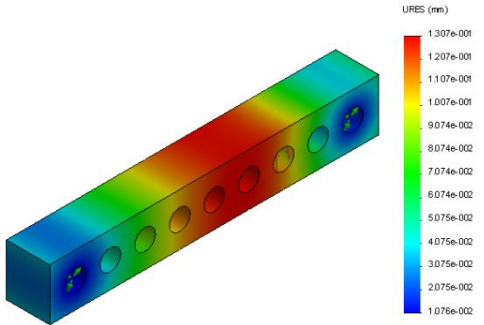


Figura 44 - Representação esquemática de actuação de forças na viga

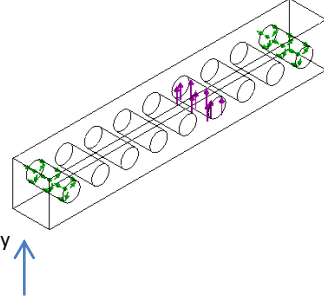
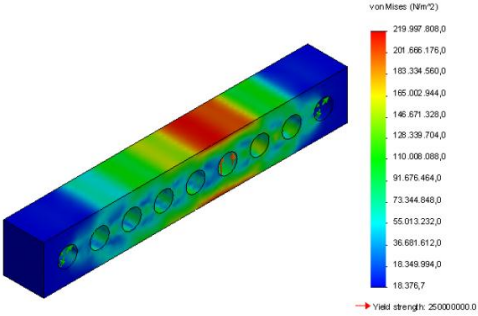
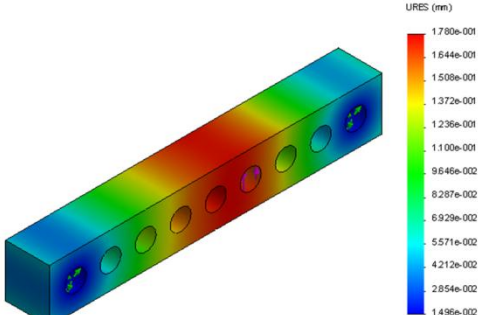
Condição fronteira nº 1

Tabela 13 - Simulação tensões e deslocamentos na viga de apoio superior de CF 1

<p>Tipo de solicitação</p>	 <p>I – Apoio duplo (Fig.) II- Actuação de força F_a A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido positivo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>187</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0.014</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0.92</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>117.05×10^{-6}</p>	<p>m^3</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>14470</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>22847</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>4.8932</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>1.6310</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0.1307</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0.0108</p>	<p>mm</p>

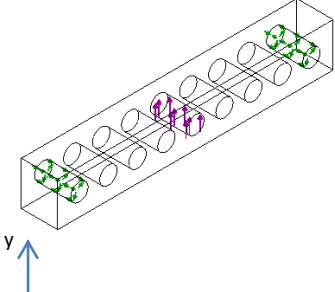
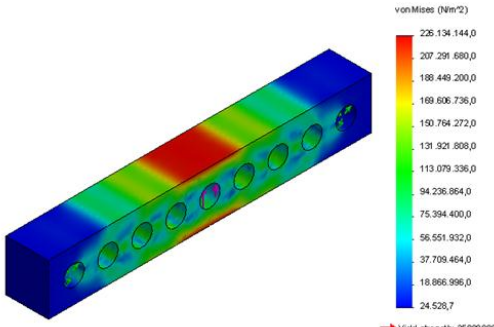
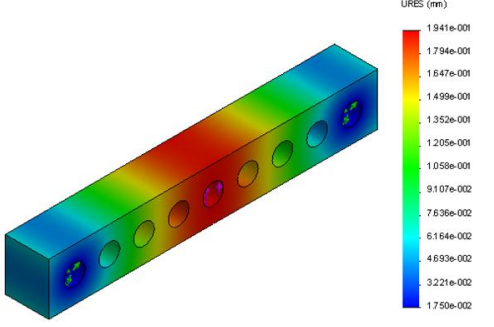
Condição fronteira nº 2

Tabela 14 - Simulação tensões e deslocamentos na viga de apoio superior de CF 2

<p>Tipo de solicitação</p>	 <p>I – Apoio duplo (Fig.) II- Actuação de força F_b A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido positivo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>220</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0.018</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0.92</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>117.05×10^{-6}</p>	<p>m^3</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>14406</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>22763</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>4.89</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>1.63</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0.178</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0.015</p>	<p>mm</p>

Condição fronteira nº 3

Tabela 15 - Simulação tensões e deslocamentos na viga de apoio superior de CF 3

<p>Tipo de solicitação</p>	 <p>I – Apoio duplo (Fig.) II- Actuação de força F_c A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido positivo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>226</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0,024</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0,92</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>$117,05 \times 10^{-6}$</p>	<p>m^3</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>14470</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>22847</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>4.893</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>1,631</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0.194</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0.017</p>	<p>mm</p>

4.2.3 – Fixador do provete

O cálculo das tensões no fixador do provete (Figura 45) foi feito com condições fronteiras semelhantes ao Actuador.

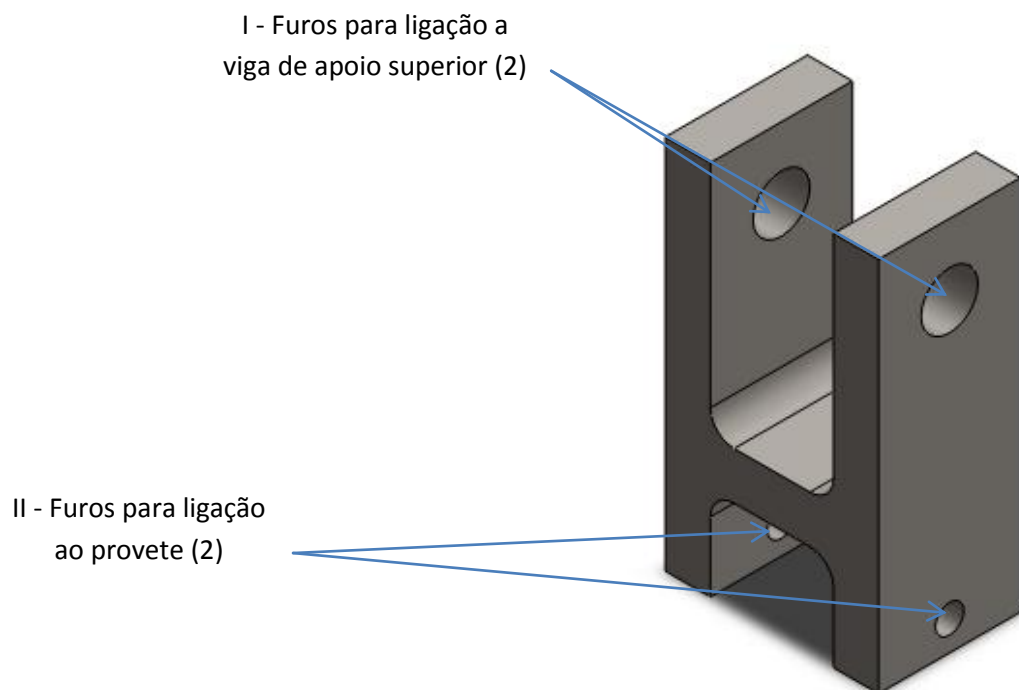
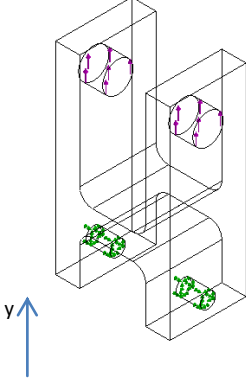
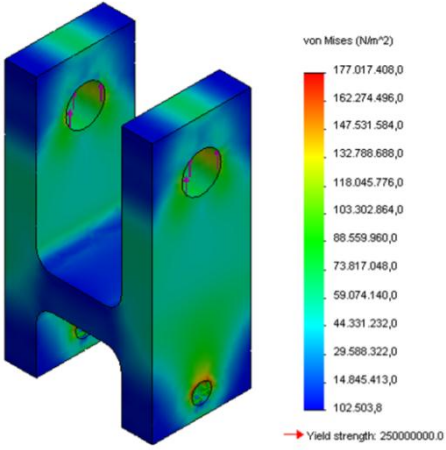
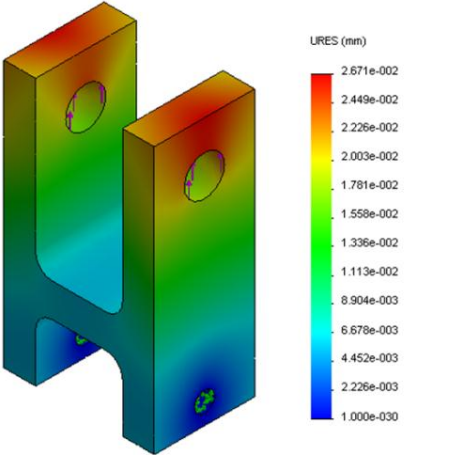


Figura 45 - Representação do fixador da provete

Duas condições fronteira foram estudadas. Na primeira situação a força actua em I e estará encastrada em II. Na segunda situação temos a situação inversa.

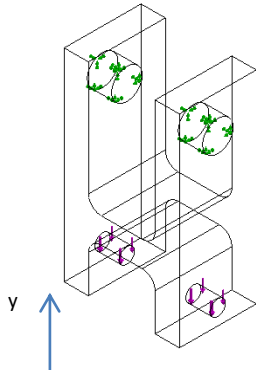
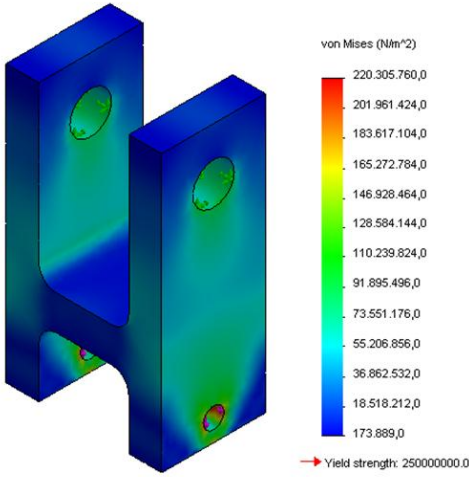
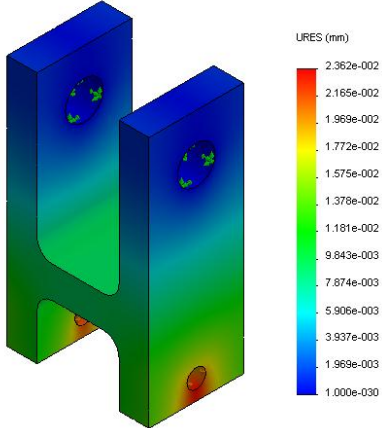
Condição fronteira nº 1

Tabela 16 - Simulação tensões e deslocamentos no fixador do provete de CF 1

<p>Tipo de solicação</p>	 <p>I – Actuação de força II- Encastrado A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido positivo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>177</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0.10</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0.37</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>46.523×10^{-6}</p>	<p>m³</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>10407</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>16788</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>3.598</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>1.200</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0.026</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0</p>	<p>mm</p>

Condição fronteira nº 2

Tabela 17 - Simulação tensões e deslocamentos no fixador do provete de CF 2

<p>Tipo de solicitação</p>	 <p>I – Encastrado II- Actuação de força A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido negativo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>220</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0.173</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0.37</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>46.523×10^{-6}</p>	<p>m³</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>10407</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>16788</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>3.598</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>1.200</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0.023</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0</p>	<p>mm</p>

4.2.4 - Peça de ligação viga de apoio superior – liga de apoio inferior

Para a peça de ligação das vigas de apoio superior e inferior (Figura 46) a simulação foi efectuada encastrando-se um dos furos extremos actuando-se a força no outro furo extremo.

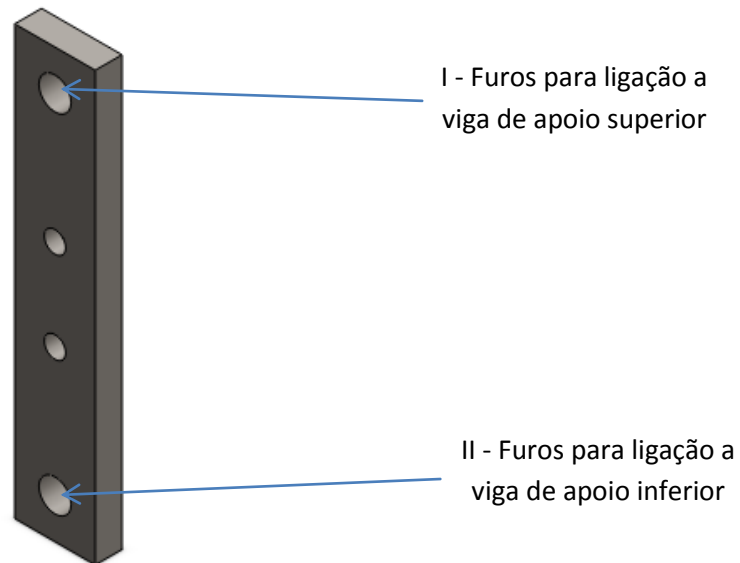
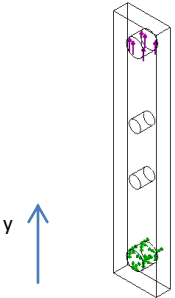
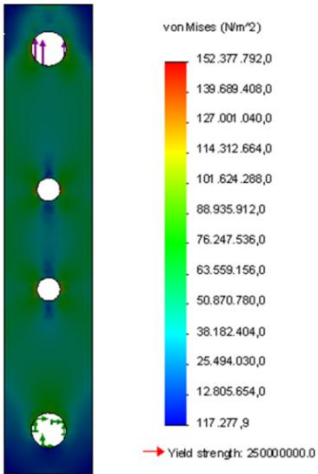
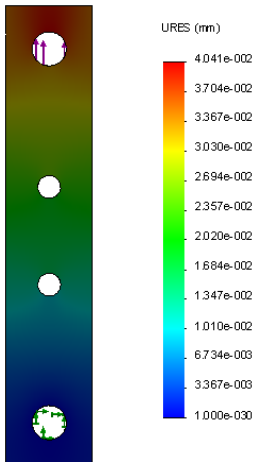


Figura 46 - Representação da peça de ligação viga de apoio superior – liga de apoio inferior

Condição fronteira

Tabela 18 - Simulação de tensões e deslocamentos da peça de ligação viga de apoio superior – liga de apoio inferior

<p>Tipo de solitação</p>	 <p>I –Actuação de força</p> <p>II- Encastrado</p> <p>A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido positivo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>152</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0,12</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0,35</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>44,733x 10⁻⁶</p>	<p>m³</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>11293</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>18094</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>3,551</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>1,184</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0,04</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0</p>	<p>mm</p>

4.2.5 - Viga de apoio inferior

Para a viga de apoio inferior (Figura 47) foi efectuada a simulação para a situação mais crítica, nomeadamente quando o momento provocado pela força é maior.

Situação mais crítica:

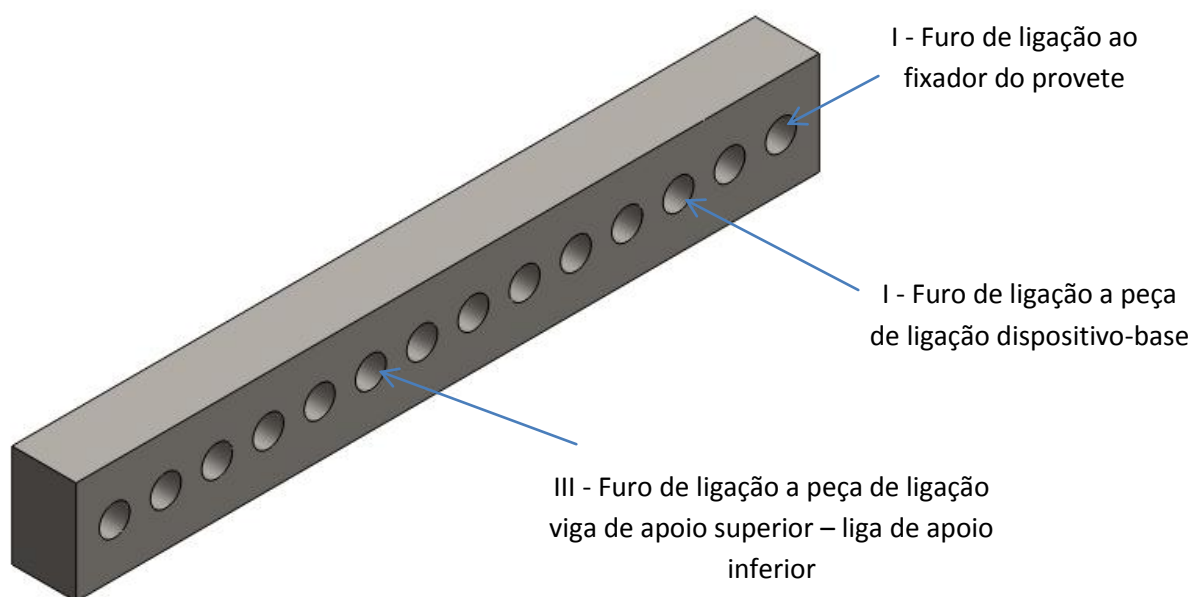
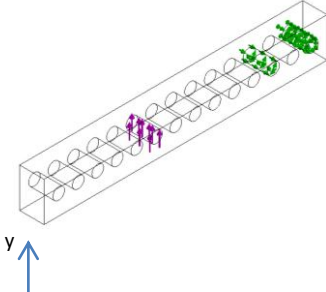
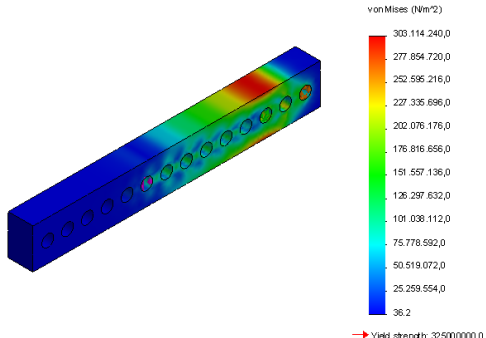
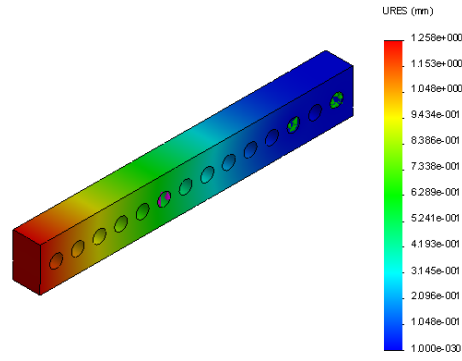


Figura 47 - Representação da viga se apoio superior

Tabela 19 - Simulação de tensões e deslocamentos na viga de apoio inferior

<p>Tipo de solicitação</p>	 <p>I +II –Apoio duplo</p> <p>III- Actuação de força F_c</p> <p>A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido positivo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>303</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>1.97</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>250.42×10^{-6}</p>	<p>m^3</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Jacobiano de 4 nós</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>25957</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>40164</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>5.625</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>1.875</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>1.2</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0</p>	<p>mm</p>

4.2.6 - Peça de ligação dispositivo-base

A simulação para da peça de ligação dispositivo-base (Figura 48) foi feita à semelhança da peça de ligação viga de apoio superior – liga de apoio inferior (ver secção 4.2.4).

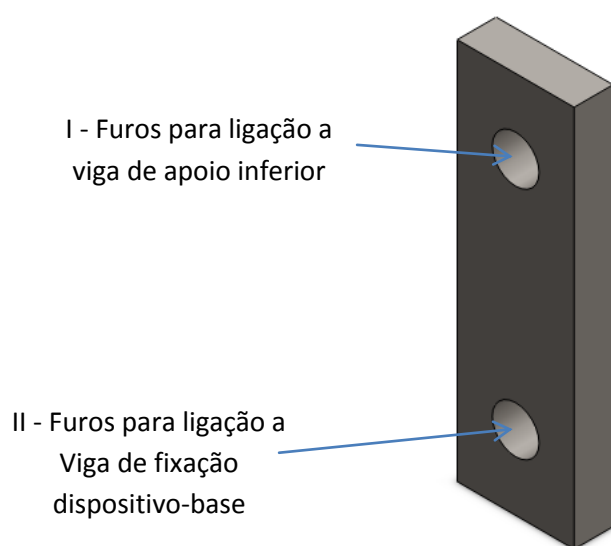
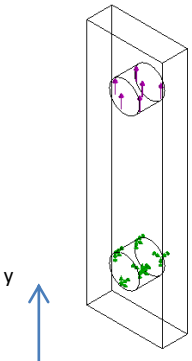
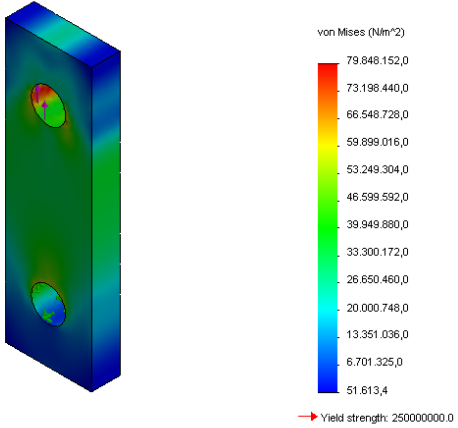
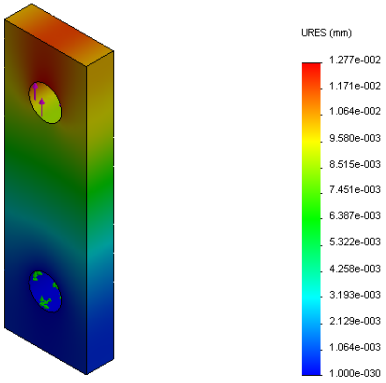


Figura 48 - Representação da peça de ligação dispositivo-base

Tabela 20 - Simulação de tensões e deslocamentos na peça de ligação dispositivo-base

<p>Tipo de sollicitação</p>	 <p>I – Actuação de força II- Encastrado</p> <p>A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido positivo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>80</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0.05</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0.36</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>45.659×10^{-6}</p>	<p>m³</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>10345</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>16463</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>3.596</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>3.596</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0.013</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0</p>	<p>mm</p>

4.2.7 - Viga de fixação dispositivo-base

Na viga de fixação dispositivo-base (Figura 49) as simulações são efectuadas em dois pontos de trabalho mais criticos.

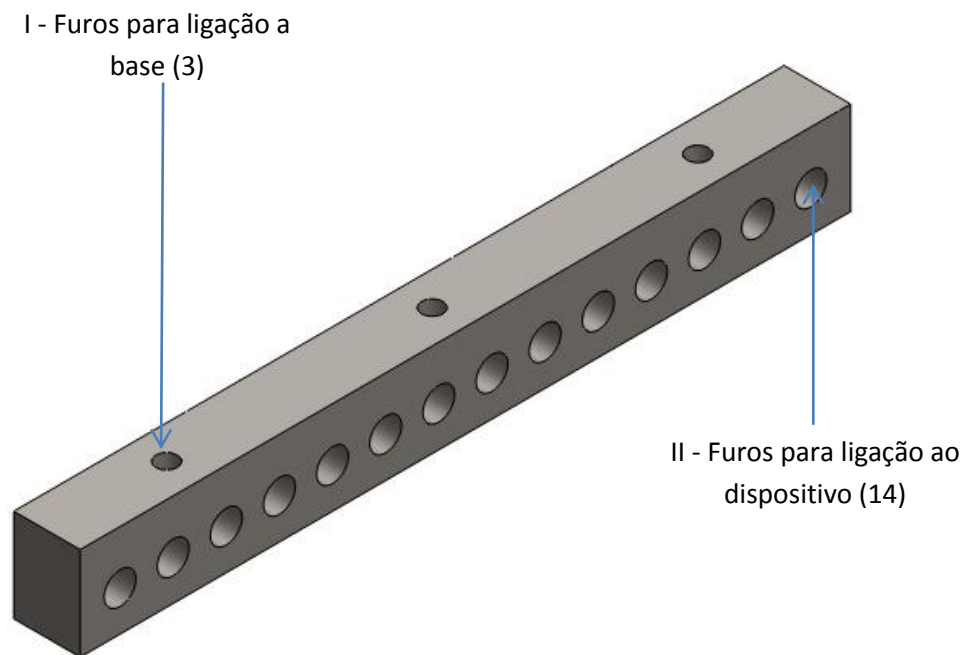
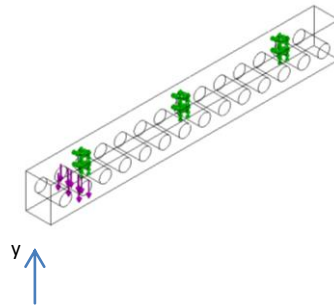
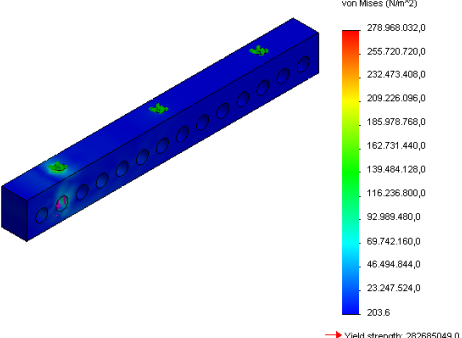
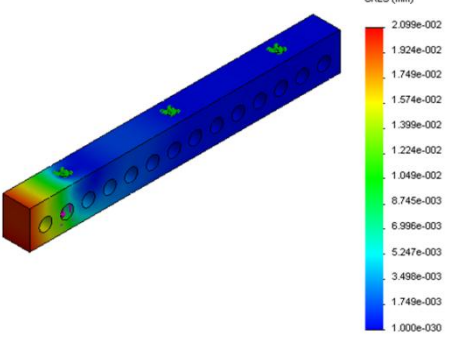


Figura 49 - Representação da viga de fixação dispositivo-base

A força actua nos furos de ligação ao dispositivo.

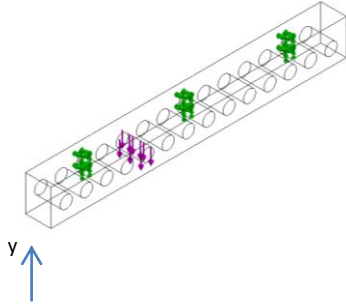
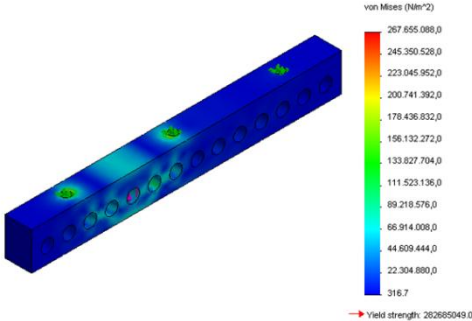
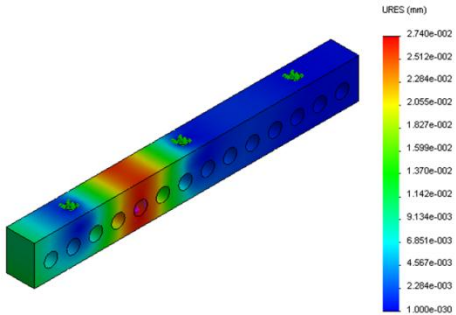
Condição fronteira nº 1

Tabela 21 - Simulação de tensões e deslocamentos na viga de fixação dispositivo-base da CF 1

<p>Tipo de solicaçãoção</p>	 <p>I – Apoio duplo (Fig.) II- Actuação de força F_c A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido negativo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>279</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0.36</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>45.659×10^{-6}</p>	<p>m^3</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>10345</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>16463</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>3.596</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>1.875</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0.02</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0</p>	<p>mm</p>

Condição fronteira nº 2

Tabela 22 - Simulação de tensões e deslocamentos na viga de fixação dispositivo-base da CF 2

<p>Tipo de sollicitação</p>	 <p>I – Apoio duplo (Fig.) II- Actuação de força F_c A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido negativo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>267</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0,36</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>$45,659 \times 10^{-6}$</p>	<p>m^3</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>10345</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>16463</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>3.596</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>1.875</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0,027</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0</p>	<p>mm</p>

4.2.8 - Base

No caso da base (Figura 50), o critério utilizado para a simulação efectuada foi a aplicação da força no furo mais afastado dos pontos que ligam à MTS, onde o momento aplicado é maior.

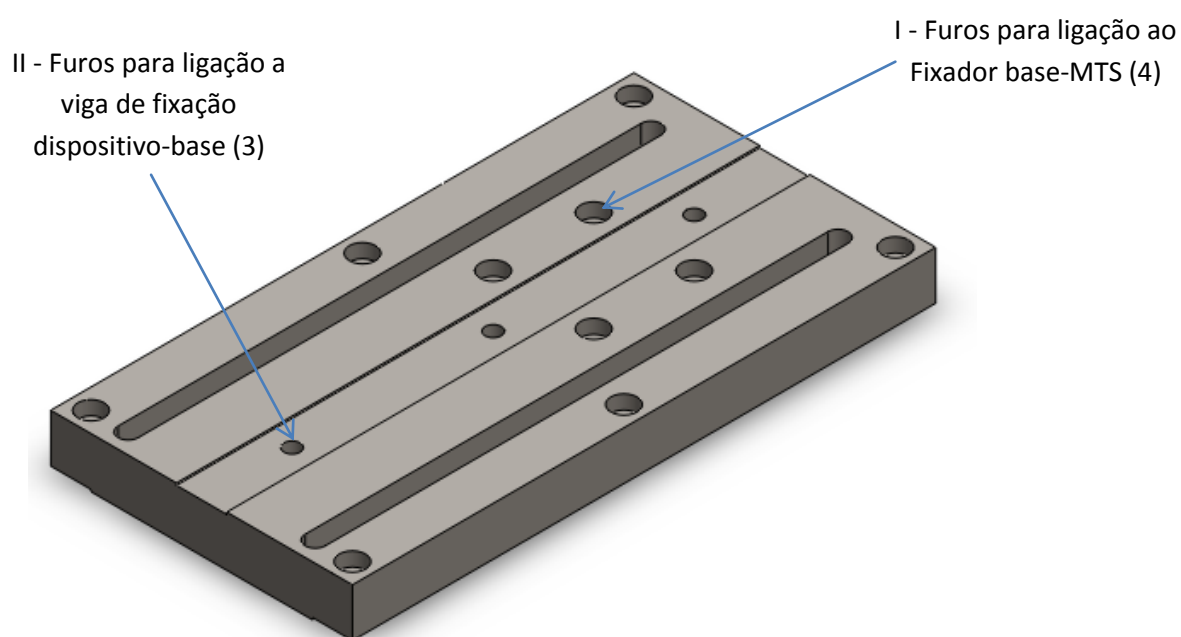
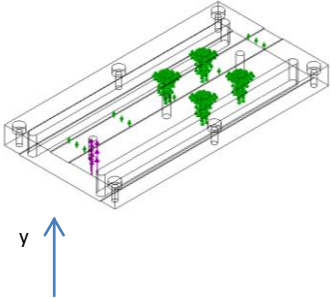
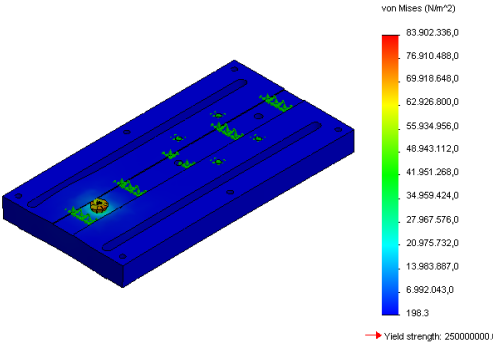
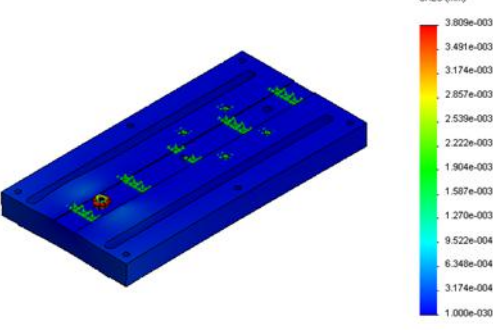


Figura 50 - Representação da base

Condição fronteira

Tabela 23 - Simulação de tensões e deslocamentos na base

<p>Tipo de sollicitação</p>	 <p>I – Encastrado II- Actuação de força A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido positivo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>83</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>7.25</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>924x 10⁻⁶</p>	<p>m³</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>25957</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>40164</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>19.48</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>3.90</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0.0038</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0</p>	<p>mm</p>

4.2.9 - Fixador base-MTS

Este componente (Figura 51) fará a ligação da base à MTS. Para simular as tensões aplicadas foi aplicada a condição fronteira de encastramento ao furo roscado de ligação à MTS, e a força distribuída nos furos que fazem a ligação à base.

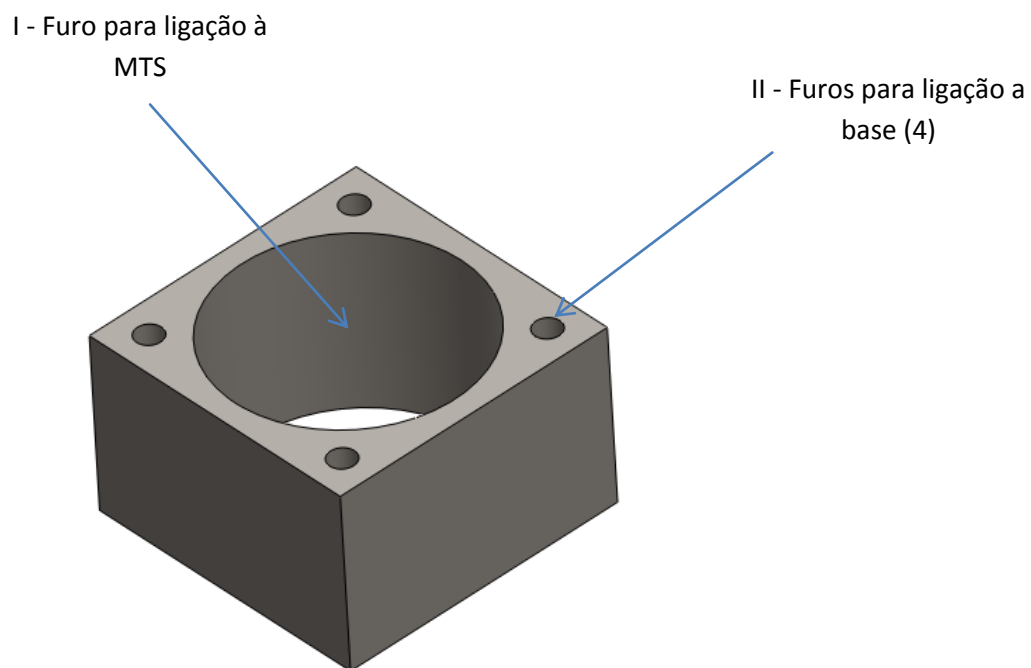
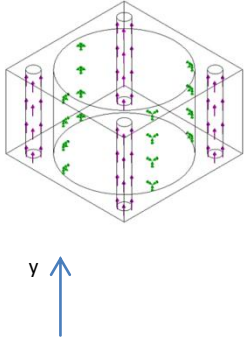
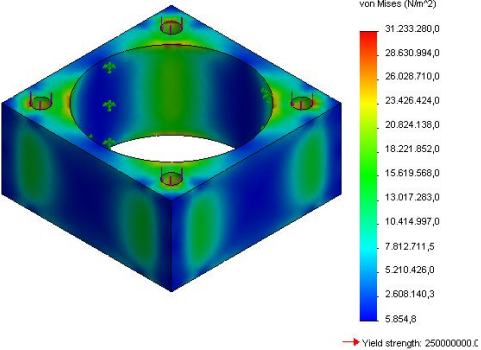
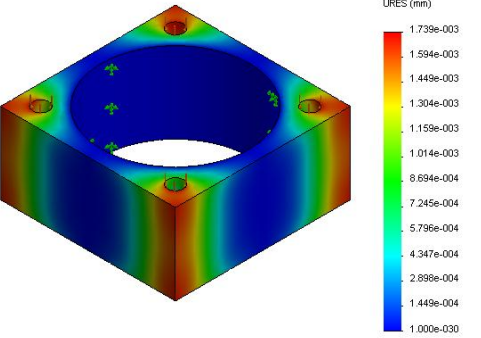


Figura 51 - Representação do fixador base-MTS

Condição fronteira

Tabela 24 - Simulação de tensões e deslocamentos na Fixação base -MTS

<p>Tipo de sollicitação</p>	 <p>I – Encastrado</p> <p>II- Actuação de força</p> <p>A força tem a direcção do eixo dos yy e sentido positivo</p>		
<p>Análise de Tensões</p>	<p>Propriedades e Resultados obtidos</p>		
	<p>Tensão máxima</p>	<p>31</p>	<p>MPa</p>
	<p>Tensão mínima</p>	<p>0</p>	<p>MPa</p>
	<p>Massa</p>	<p>0,41</p>	<p>kg</p>
	<p>Volume</p>	<p>52×10^{-6}</p>	<p>m^3</p>
	<p>Elemento finito utilizado</p>	<p>Elementos sólidos 3D tetraédricos</p>	
<p>Análise de deslocamentos</p>	<p>Nº total de elementos</p>	<p>16443</p>	<p>elementos</p>
	<p>Nº total de nós</p>	<p>26559</p>	<p>nós</p>
	<p>Tamanho máximo de cada elemento</p>	<p>3,736</p>	<p>mm</p>
	<p>Tamanho mínimo de cada elemento</p>	<p>1,245</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento máximo</p>	<p>0.0017</p>	<p>mm</p>
	<p>Deslocamento mínimo</p>	<p>0</p>	<p>mm</p>

5 - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

5.1 - Conclusões

Desenvolveu-se um dispositivo para avaliar a tenacidade de juntas adesivas DCB em modo misto I + II. O dispositivo é baseado sobre o dispositivo desenvolvido por Frenlund-Spelt.

O desenvolvimento do dispositivo consistiu na simulação numérica do dispositivo através do programa de elementos finitos SolidWorks e ABAQUS. O programa SolidWorks foi usado para projectar o dispositivo global e o programa ABAQUS foi usado para determinar as constantes das molas correspondente ao adesivo a introduzir no programa SolidWorks.

Os resultados numéricos foram numa primeira fase validados através da comparação do diagrama de forças actuando sobre o provete DCB obtido numericamente com aquele obtido teoricamente usando conceitos da resistência dos materiais.

numa segunda fase, cada componente do dispositivo foi projecto de modo a garantir que o nível de tensão atingido esteja sempre abaixo da tensão de cedência do material escolhido (aço tratado) para fabricar o dispositivo.

O dispositivo está neste momento a ser maquinado nas oficinas mecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP.

5.2 – Trabalhos Futuros

Estudo do modo misto, utilizando o dispositivo desenvolvido.

Estudo do modo III, utilizando o mesmo dispositivo. Para que isso seja possível, fez-se um esboço do que poderia ser uma forma de efectuar ensaios em modo III, executando a mudança de uma peça apenas – o fixador do provete de ensaio (Figura 52).

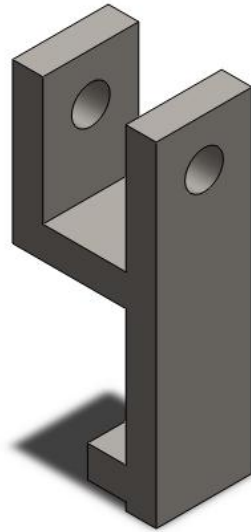


Figura 52 - Fixador da barra de ensaio para modo III

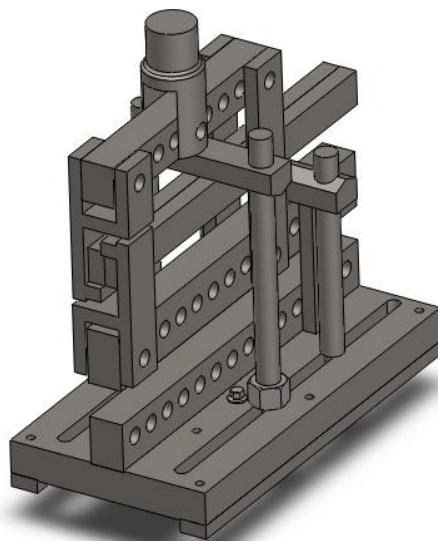


Figura 53 - Dispositivo adaptado para ensaio modo III

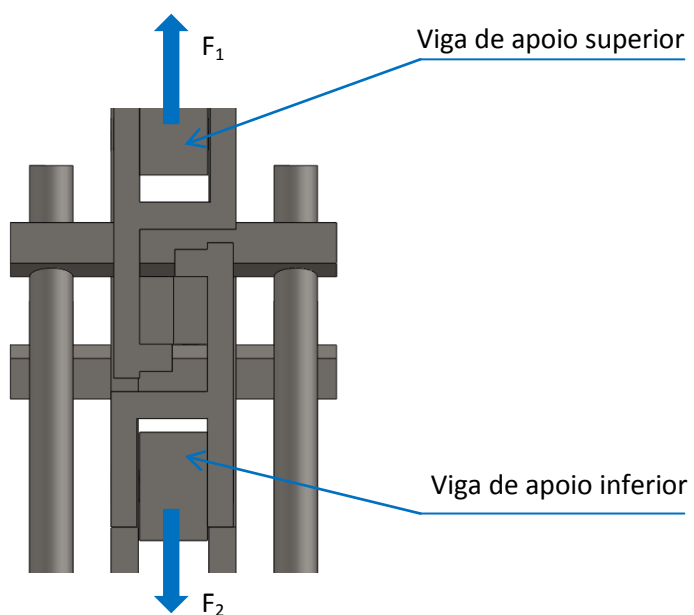


Figura 54 - Modo como actuam as forças com adaptação para modo III

Como podemos ver nas Figuras 53 e 54, esta adaptação tem a vantagem de utilizar provetes normalizados DCB.

Referências

- [1] – da Silva, L. F., de Moura, M. F. S. F. e de Magalhães, A. G. (2007). Juntas Adesivas Estruturais, Publindústria, Porto.
- [2] – G. Fernlund & J. K. Spelt (1994). Mixed mode fracture characterization of joints, *Composites Science and Technology*, 50: 441-449.
- [3] - Nicholson, C. (1991), History of adhesives, Bearing Specialist Association Educational Services Committee Report Vol. 1, Issue 2 : 1-4.
- [4] – Fay, P. A. (2005). History of Adhesive Bonding, in R. D. Adams (ed.), *Adhesive Bonding Science, Technology and Applications*, CRC Press Woodhead Publishing.
- [5] – Esteves, V. H. C. (2010). Determinação da Tenacidade de um Adesivo em Solicitações de Modo Misto (I + II), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [6] – Tong, L. e Steven, G. P. (1999). *Analysis and Design of Structural Bonded Joints*, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.
- [7] – Dillard, D. A. (2005). Fracture Mechanics of Adhesive Bonds, in R. D. Adams (ed.), *Adhesive Bonding Science, Technology and Applications*, CRC Press Woodhead Publishing.
- [8] – Broek, D. (1986). *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, 4th rev., M. Nijhoff; Distributors for the U.S. and Canada, Kluwer Academic, Dordrecht; Boston Hingham, Mass., U.S.A.,
- [9] – Griffith, A. A. (1921). The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, *Philosophical Transactions of the Royal Society A221*: 163 – 198.

- [10] – Kinloch, A. J. (1987). *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*, Chapman & Hall, London.
- [11] – Dillard, D. A., Singh, H. K., Pohlit, D. J. e Starbuck, J. M. (2009). Observations of Decreased Fracture Toughness for Mixed Mode Fracture Testing of Adhesively Bonded Joints, *Journal of Adhesion Science and Technology* 23(10-11): 1515–1530.
- [12] – de Moura, M. F. S. F., Goncalves, J. P. M., Chousal, J. A. G. e Campilho, R. D. S. G. (2008). Cohesive and Continuum Mixed-Mode Damage Models Applied to the Simulation of the Mechanical Behaviour of Bonded Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 28(8): 419–426.
- [13] – Benbow, J. J., Roesler, F. C., (1957), Experiments on Controlled Fractures *Proceedings of the Physical Society, Section B*, 70 (2): 201-211
- [14] – Gilman, J. J., in *Fracture*, Averback, B. L., et al. (editors), (1959) John Wiley, New York: 193-221.
- [15] – Blackman, B., Dear, J. P., Kinloch, A. J., Osiyemi, S., The calculation of adhesive fracture energies from double-cantilever beam test specimens, *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 10, No. 5, March 1, 1999: 253-256.
- [16] – Irwin, G.R., Kies, (1954), Critical Energy Rate Analysis of Fracture Strength”. *Welding Journal (Research Supplement, Vol. 33)*, p. 193s.
- [17] – Campilho, R. D. S. G. (2009). *Repair of Composites and Wood Structures*, Ph.D. Thesis, Porto, Portugal: Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [18] – ASTM-D3433-99 (2001). Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints, *Annual book of ASTM standards West Conshohocken, ASTM 15.06*: 225 – 231.
- [19] – Mostovoy, S., Crosley, P. B. e Ripling, E. J. (1967). Use of Crack - Line Loaded Specimens for Measuring Plane - Strain Fracture Toughness, *Journal of Materials* 2(3): 661 – 81.

- [20] –Adams R.D. (Editor), Engineered Materials Handbook, Adhesives and Sealants, Vol. 3, Materials Park, OH: ASM International, 1995:325.
- [21] – Blanco, N., Gamstedt, E, K., Costa, J., Trias, D.; (2006), Analysis of the mixed-mode end load split delamination test, *Composite Structures*, 76(1-2):14-20.
- [22] – Silva, M. A. L., de Moura, M. F. S. F., Morais J. J. L., de Morais, A. B., Estudo por elementos finitos po provete End loaded Split (ELS), para determinação experimental de G_{IIc} na espécie de madeira *Pinus pinaster Ait.* (2006), *Mecânica Experimental* N.º 12.
- [23] - Wang, Y. e Williams, J. G. (1992). Corrections for Mode II Fracture Toughness Specimens of Composite Materials, *Composites Science Technology* 43: 251 – 256.
- [24] – Oliveira, J. M. Q., de Moura, M. F. S. F, Morais, J. J. L.,(2009), Application of the end loaded split and single leg bending tests to the mixed mode fracture characterization of wood, *Holzforschung*, Vol. 63: 597-602.
- [25] – Zile, E., Tamuzs, V., (2005) Mode II delamination of unidirectional carbon, fiber/epoxy composite in four-point bend end-notched flexure tests, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 41, No. 5
- [26] – Schuecker C., Davidson, B. D., (2000), Evaluation of the accuracy of the four-point bend end-notched flexure test for mode II delamination toughness determination, *Composites Science and Technology*, 60, 11 :2137 - 2146.
- [27] – Nicoli E., et al., Development of mode I and II fracture envelopes of adhesively bonded material systems, Proc. 32nd Annual Meeting of the Adhesion Society, K. M. Liechti (Ed.). The Adhesion Society, Blacksburg, VA (2009).
- [28] – Park, S. e Dillard, D. A. (2007). Development of a Simple Mixed - Mode Fracture Test and the Resulting Fracture Energy Envelope for an Adhesive Bond, *International Journal of Fracture* 148(3): 261–271.

- [29] –Adams, D., (2009), Mixed-mode fracture toughness of composites, High-Performance Composites, 9: 11-13.
- [30] – Crews, J. H. e Reeder, J. R. (1988). A Mixed - Mode Bending Apparatus for Delaminations Testing, NASA TECHNICAL MEMORANDUM 100662.
- [31] – Kanninen, M. F. (1973). Augmented Double Cantilever Beam Model for Studying Crack-Propagation and Arrest, International Journal of Fracture 9(1): 83–92.
- [32] - Szekrenyes, A. e Uj, J. (2007). Over - Leg bending Test for Mixed - Mode I/II Interlaminar Fracture in Composite Laminates, International Journal of Damage Mechanics 16(1): 5–33.
- [33] – de Xie et al, (2005) Failure analysis of adhesively bonded structures: from coupon level data to structural level predictions and verification, International Journal of Fracture (2005) 134:231–250
- [34] – Chaves F. J.P., de Moura, M.F.S.F., da Silva L.F.M., Dillard D.A. (2010), Numerical analysis of the dual actuator load test applied to fracture characterization of bonded joints, International Journal of Solids and Structures 48 (2011) 1572–1578
- [35] – C. Moura Branco, J. Martins Ferreira, J. Domingues da Costa, A. Silva Ribeiro, Projecto de Órgãos de Máquinas, Fundação Calouste Gulbenkian

Anexos

Desenhos técnicos dos componentes do dispositivo

