



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS DESLOCAMENTOS E DAS CARGAS CRÍTICAS DE “BENDING-BUCKLING” EM PLACAS COMPÓSITAS

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Sistemas de Produção

Autor

Valmiqui Quéli Costa Pereira da Silva

Orientadores

Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro

Professor Doutor Luís Manuel Ferreira Roseiro

Júri

Presidente Professor Doutor José Maria Osório de Sousa Cirne
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogal Professora Doutora Maria Augusta Neto
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



**Instituto Superior de
Engenharia de
Coimbra**

Coimbra, Julho, 2012

“Só aqueles que têm paciência para fazer coisas simples com perfeição é que irão adquirir habilidade para fazer coisas difíceis com facilidade”

Johann Christoph Von Schiller

Aos meus pais, por tudo.

Agradecimentos

Finalizada uma etapa particularmente importante da minha vida, não poderia deixar de expressar o mais profundo agradecimento a todos aqueles que me apoiaram nesta longa caminhada e contribuíram para a realização deste trabalho:

À Professora Doutora Ana Amaro, pela orientação e esclarecimentos prestados, pela disponibilidade, esforço despendido na realização deste trabalho e pela leitura crítica e sugestiva do texto.

Ao Professor Doutor Luís Roseiro, pelo apoio constante ao longo desta dissertação, pelas elevadas competências científicas que possui e, principalmente, pela confiança transmitida desde a fase inicial, assim como, a sua disponibilidade e esforço para me disponibilizar todos os meios necessários para a realização deste trabalho.

Às pessoas do ISEC que me ajudaram nas diferentes fases do trabalho, nomeadamente: O Professor Carlos Alcobia, pela ajuda, disponibilidade e preciosas informações na programação e instalação do sistema de aquisição de dados; O Professor Pedro Beirão pela ajuda e tempo despendido na previsão e implementação do circuito pneumático; A Engenheira Linda Pinto, pela ajuda na integração, conhecimento do laboratório e disponibilidade em ajudar; O Senhor Arménio, pela experiência que possui e ajuda na criação das peças projetadas. Ainda uma palavra de apreço ao ISEC e FCTUC, pela possibilidade de realização do presente trabalho e por todos os meios colocados à disposição.

A toda a minha família, em especial aos meus Pais e irmãos, pela oportunidade que me deram, pelo apoio e confiança nas minhas capacidades. Sem vocês não conseguiria chegar até aqui.

À minha namorada Carolina, pela força, incentivo, dedicação, paciência, encorajamento, e por tornar os momentos maus simplesmente em momentos menos bons. Obrigado pela enorme ajuda e por estares sempre comigo pois sem ti não teria sido fácil. Obrigado por tudo.

Aos meus amigos, os que me dão vontade de aqui escrever o seu nome, pelo apoio, incentivo, e por aqueles bons momentos que passamos.

A todos, o meu muito obrigado.

Resumo

A crescente utilização de materiais compósitos torna essencial a sua caracterização bem como o conhecimento mais profundo do seu comportamento quando submetidos a esforços. Quando sujeitos à flexão, os laminados compósitos apresentam um comportamento instável de elementos estruturais, esta instabilidade origina a encurvadura da estrutura. Este efeito conjugado é designado por *Bending-Buckling* e atualmente não está muito aprofundado na literatura.

O objetivo desta dissertação é o desenvolvimento/melhoria de um mecanismo experimental que permita solicitar laminados de fibra de vidro e fibra de carbono por forma a produzir o efeito de *bending-buckling*. De modo a ser possível uma posterior comparação dos valores experimentais obtidos com valores numéricos, é necessário quantificar as cargas e os deslocamentos envolvidos na solicitação do laminado.

Com a análise dos resultados experimentais foi possível concluir que as propriedades das fibras, a sua orientação e o número de camadas nos laminados compósitos têm especial influência nos valores de carga crítica de *bending-buckling*.

Palavras-chave: Material Compósito, Fibra de Vidro/Carbono, Encurvadura por Flexão, Laminado, Carga Crítica de Encurvadura.

Abstract

The increasing use of composite materials makes essential its characterization as well as deeper knowledge of their behavior when subjected to stresses. When subjected to bending, the laminate presents an unstable behavior of the structural elements. That instability causes the buckling of the structure. This combined effect is called bending-buckling, and has not yet deeply addressed in the literature.

The aim of this dissertation is the development / improvement of an experimental mechanism to subject the glass/epoxy and carbon/epoxy laminates to the effect of bending-buckling. In order to make possible a subsequent comparison of the experimental values to the numerical ones, it is necessary measure the critical load and displacements involved.

Experimental results concluded that the fiber proprieties, their orientation and the number of layers in the laminates have special influence on its critical load of bending-buckling.

Keywords Composite Materials, Bending-Buckling, Glass/Epoxy, Carbon/Epoxy, Laminate, Critical Load of Bending-Buckling.

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	viii
Simbologia e Siglas	ix
Simbologia.....	ix
Siglas	ix
1. ENQUADRAMENTO	1
2. ESTADO DA ARTE	3
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	17
3.1. Processamento dos laminados de material compósito	17
3.2. Placas ensaiadas	18
3.3. Esquema do bastidor de ensaio	19
3.4. Equipamento utilizado	21
3.4.1. Atuador pneumático	21
3.4.2. Válvula distribuidora de caudal	22
3.4.3. Painel de controlo	23
3.4.4. Extensómetros	24
3.4.5. Célula de carga	25
3.4.6. Sensor de deslocamento linear	26
3.4.7. Fonte de alimentação	26
3.4.8. Placa de aquisição de dados.....	27
4. ANÁLISE EXPERIMENTAL	29
4.1. Bastidor de ensaios	29
4.2. Equipamento concebido.....	30
4.3. <i>Software</i> desenvolvido	32
4.3.1. Programa LabView	32
4.3.2. Programa Festo FluidSIM-P	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1. Resultados	37
5.1.1. Laminado FV.1	38
5.1.2. Laminado FV.2	40
5.1.3. Laminado FV.3	43
5.1.4. Laminado FC	44
5.1.5. Comportamento dos laminados	46

5.2. Discussão dos resultados	47
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
BIBLIOGRAFIA	52
ANEXO A	54
ANEXO B	55
ANEXO C	56
ANEXO D	57
ANEXO E.....	58
ANEXO F.....	59
ANEXO G	60
ANEXO H	61
ANEXO I.....	62
ANEXO J.....	63
ANEXO K	64
ANEXO L.....	65
ANEXO M.....	66
ANEXO N	67
ANEXO O	68
ANEXO P.....	69
ANEXO Q	70
ANEXO R	71
ANEXO S.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fases de um compósito (Daniel & Ishai, 1994).	4
Figura 2 Porta de avião-um único componente (<i>Eurocopter</i> , 2004).	5
Figura 3 Classificação dos compósitos segundo o reforço (Daniel & Ishai, 1994).	7
Figura 4 Influência da orientação das fibras na tensão de rutura de um material compósito reforçado com fibras de fibra de vidro E (Askeland, D. R. (1998).	8
Figura 5 Lâmina unidirecional e eixos principais de coordenadas (Daniel & Ishai, 1994).	9
Figura 6 Empilhamento de laminados: (a) unidirecional; (b) multidirecional (Smith, 1998).	10
Figura 7 Principais tipos de tecido utilizados como reforço nos materiais compósitos: a) "plain"; b) "twill"; c) "satin"; d) "basket"; (SPHandbook, 2010).	13
Figura 8 Modo como é constituída uma malha (SPHandbook, 2010).	14
Figura 9 Laminado encastrado-livre sujeito à flexão.	15
Figura 10 Um dos sistemas para processamento de laminados em autoclave, no INEGI-Porto.	17
Figura 11 Serra de disco de dentes diamantados para corte dos laminados.	18
Figura 12 Modelo 3D do bastidor projetado.	20
Figura 13 Representação do encastramento, dos pontos onde vão ser aplicados os sensores e do sistema de eixos escolhido.	20
Figura 14 Representação esquemática do modo de funcionamento de um atuador pneumático.	21
Figura 15 Atuador pneumático da marca <i>SMC</i> e respetivas válvulas reguladoras de caudal.	22
Figura 16 Válvula distribuidora de caudal 5/2 da marca <i>Festo</i> .	23
Figura 17 Simbologia da válvula 5/2.	23
Figura 18 Painel de ligações da marca <i>Festo</i> .	24
Figura 19 Extensómetro utilizado, marca <i>HBM</i> .	24
Figura 20 Célula de carga de tração-compressão da marca <i>AEP Transducers</i> .	25
Figura 21 Sensor de deslocamento linear marca <i>MegaTron</i> .	26
Figura 22 Fonte de alimentação da marca <i>Velleman</i> .	27
Figura 23 Placa de aquisição de dados e respetivo "chassis" da marca <i>National Instruments</i> .	28
Figura 24 Aparato experimental.	29

Figura 25 Elementos concebidos: a) apoio atuador linear; b) roldana; c) apoio roldana; d) apoio carril; e) fixador do apoio da roldana ao bastidor; f) apoio do encastramento; g) encastramentos para os diferentes laminados; h) ponteiras.	31
Figura 26 Extremidade de aplicação da carga no laminado.	31
Figura 27 Esquema da NI representativo da lógica da aquisição de dados.	32
Figura 28 Interface do programa <i>LabView</i> criado.	33
Figura 29 Conexões dos diferentes sensores à ficha da placa de aquisição.	33
Figura 30 Painel do DAQ Assistant onde são configurados os sensores.	34
Figura 31 Calibração da célula de carga.	35
Figura 32 Interface do programa <i>FluidSIM</i> criado.	36
Figura 33 Local de aplicação dos extensómetros e sensores de deslocamento linear no laminado FV.2.	40
Figura 34 Deslocamento vertical para o início da encurvadura, laminado FV.3.	46
Figura 35 Ficha técnica referente ao atuador pneumático utilizado.	54
Figura 36 Características técnicas dos extensómetros utilizados.	55
Figura 37 Características técnicas referentes à célula de carga utilizada.	56
Figura 38 Ficha técnica dos sensores de deslocamento linear utilizados.	57
Figura 39 Ficha técnica das placas de aquisição de dados utilizadas.	58
Figura 40 Desenho do fixador traseiro para o atuador pneumático.	59
Figura 41 Desenho do apoio frontal do atuador linear.	60
Figura 42 Desenho da roldana.	61
Figura 43 Desenho do apoio da roldana.	62
Figura 44 Desenho dos fixadores do carril ao bastidor.	63
Figura 45 Desenho do fixador do apoio da roldana ao bastidor.	64
Figura 46 Desenho do apoio dos encastramentos ao bastidor.	65
Figura 47 Desenho do apoio dos laminados ao encastramento.	66
Figura 48 Desenho para o apoio de laminados de 2,2 mm ao encastramento.	67
Figura 49 Desenho para o apoio de laminados de 4,4 mm de espessura ao encastramento.	68
Figura 50 Desenho da ponteira aplicada no atuador pneumático.	69
Figura 51 Desenho das ponteiras aplicadas na célula de carga.	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Propriedades de fibras utilizadas como reforço (Berthelot,1998).	11
Tabela 2 Características e designação das placas ensaiadas.....	19
Tabela 3 Velocidade de aplicação de carga para os laminados ensaiados.	38
Tabela 4 Deslocamento vertical médio na extremidade livre antes do início da encurvadura.	46
Tabela 5 Valores de carga crítica para os laminados ensaiados.	48
Tabela 6 Resultados de deslocamento e carga crítica para o laminado FV.1.....	71
Tabela 7 Resultados de deslocamento e carga crítica para o laminado FV.2.....	71
Tabela 8 Resultados de deslocamento e carga crítica para o laminado FV.3.....	72
Tabela 9 Resultados de deslocamento e carga crítica para o laminado FC.....	72

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

h – Altura da viga

l – Comprimento

t – Espessura da viga

E – Módulo de Elasticidade

G – Módulo de Rigidez

I – Momento de inércia

P – Carga

ε – Deformação

σ – Tensão

Siglas

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

ISEC – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

NI – National Instruments

1. ENQUADRAMENTO

Os desafios tecnológicos permanentes nas mais diversas áreas industriais exigem novos materiais que consigam satisfazer determinados requisitos. Combinações de materiais convencionais, polímeros, cerâmicos e metálicos, culminaram no aparecimento de materiais, com novas propriedades mecânicas e químicas, capazes de satisfazer os mais diversos tipos de projetos. A estes novos materiais foi dado o nome de materiais compósitos.

O interesse neste tipo de materiais está ligado principalmente a fatores económicos e de desempenho. Fatores económicos devido ao facto de normalmente estes materiais possuem uma menor massa específica relativamente aos materiais convencionais, por exemplo na indústria aeronáutica este fator tem um impacto direto, leva a uma economia de combustível e a um aumento de carga útil. O custo de produção de alguns componentes também pode ser reduzido, isto devido ao facto de se conseguir reduzir o número de peças. Relativamente ao desempenho os materiais compósitos possuem elevados índices de resistência e rigidez específica. Dada a procura constante de materiais com melhores propriedades, principalmente mecânicas, estes materiais tornam-se particularmente importantes.

Pelas suas características os materiais compósitos alargam o número de opções a projetistas e engenheiros. Dada a sua crescente utilização torna-se essencial a sua caracterização. Neste contexto o conhecimento do comportamento deste tipo de materiais quando solicitados a esforços dos mais variados tipos é primordial.

Quando uma placa é sujeita a esforços de flexão, a partir de certo valor de carga iniciam-se deslocamentos transversais, que vão provocar encurvadura devido à compressão a que as camadas do compósito ficam sujeitas. Este efeito conjugado designa-se por *bending-buckling*. Assim, o objetivo do presente estudo é determinar os valores de carga a partir dos quais o fenómeno de *bending-buckling* se inicia e averiguar qual a influência da orientação das fibras, espessura e propriedades do laminado nesta carga crítica.

De modo a produzir o efeito desejado foi necessário projetar e configurar uma bancada que permitisse solicitar as placas a ensaiar ao esforço desejado. Houve a necessidade de desenvolver e executar vários elementos estruturais para a fixação de componentes à estrutura, bem como o desenvolvimento de um programa de *software* que permitisse a aquisição dos dados experimentais. Foram realizados ensaios em laminados com diferentes configurações de vidro-epóxico e de carbono-epóxico.

A presente dissertação está dividida em seis capítulos, sendo que neste capítulo inicial é feita uma introdução ao tema e trabalhos a desenvolver. No segundo capítulo, ESTADO DA ARTE, caracterizam-se de um modo geral os materiais compósitos, incidindo depois essa análise sobre os laminados em estudo. Posteriormente, é feita referência ao comportamento instável que pode ocorrer nos laminados compósitos, mais concretamente ao efeito conjugado de *bending-buckling*. O terceiro capítulo, PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, é dedicado ao estudo experimental, sendo também descrita qual a origem dos laminados a ensaiar, e feita uma referência aos equipamentos utilizados nos ensaios. O quarto capítulo, ANÁLISE EXPERIMENTAL, descreve os elementos projetados bem como o programa de *software* desenvolvido. No quinto capítulo, RESULTADOS E DISCUSSÃO, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. No sexto capítulo, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS, é feita uma análise global ao trabalho, com apresentação das conclusões, dificuldades e propostas para trabalhos futuros.

No final é feita a referência à bibliografia consultada.

2. ESTADO DA ARTE

Um material compósito é constituído por dois ou mais constituintes diferentes, contudo esta definição não é globalmente aceite. Numa escala atómica todos os materiais podem ser considerados compósitos, visto que são formados por compostos atómicos diferentes. Se apenas se tiver em consideração uma escala macroscópica, os materiais com constituintes diferentes que possam ser facilmente identificados macroscopicamente são considerados materiais compósitos. Deste modo, as dificuldades em classificar um material como compósito residem nas limitações de escala que se impõem aos constituintes do material. Em termos de engenharia, considera-se que um material compósito é um material com diferentes constituintes que se distinguem, preferencialmente, à escala macroscópica (Smith, 1998). Segundo este autor, a definição de um material compósito é a seguinte: *“Um material compósito é formado por uma mistura ou combinação de dois ou mais micro ou macro constituintes que diferem na forma e na composição química, e que, na sua essência, são insolúveis uns nos outros”*.

Os materiais compósitos são tipicamente constituídos por uma matriz, de fase contínua, e um reforço, de fase dispersa (Figura 1). O material da matriz funciona como aglomerante, envolve os outros constituintes mantendo-os na sua posição relativa, permite alguma ductilidade ao compósito, assegura a transmissão e distribuição dos esforços mecânicos ao material de reforço, protegendo também as suas superfícies. Em relação ao material de reforço este pode ser constituído por fibras (contínuas ou descontínuas) e por partículas, estes materiais vão suportar a maioria dos esforços a que o compósito está sujeito e normalmente apresentam elevada resistência e rigidez.

As propriedades dos materiais compósitos dependem de propriedades físicas das fases constituintes, bem como das suas quantidades relativas e geometria da fase dispersa (reforço).

De um modo geral, para o reforço representar uma vantagem para o compósito, este deve ser mais forte e rígido do que a matriz. Deste modo, a boa interação entre a matriz e o reforço pode ser garantida pela criação de uma interface (Figura 1). A interface permite aumentar a capacidade de impregnação e adequar a rigidez do reforço com a

ductilidade da matriz. Esta interface é normalmente conseguida pelo pré-revestimento das fibras com um filme fino de material que se adapte tanto à matriz como às fibras utilizadas (Daniel & Ishai, 1994).

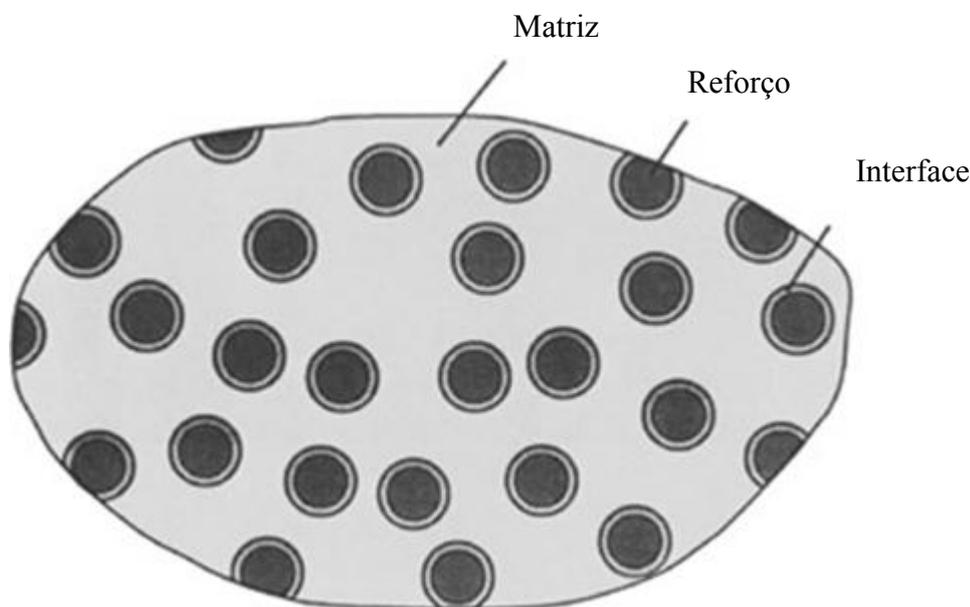


Figura 1 Fases de um compósito (Daniel & Ishai, 1994).

Da combinação dos diferentes materiais para a matriz e reforço obtém-se uma cooperação mútua, em que o material compósito apresenta melhores propriedades e características que as de cada constituinte separadamente. Exemplos desta sinergia entre os materiais são os compósitos de origem natural: a madeira e os ossos. A madeira é constituída por fibras de celulose dispostas numa matriz de lenhina, os ossos têm uma matriz mineral, formada essencialmente por cálcio, a envolver as proteínas de colagénio.

Segundo Griffith (1921), as fibras apresentam propriedades muito superiores às dos materiais que as originaram na forma maciça. Este autor constatou que o vidro na forma maciça apresentava tensões de rotura de cerca de 170 MPa, enquanto fibras de vidro com cerca de 20 μm de diâmetro chegavam a tensões de rotura de 3500 MPa, tendo concluído que o uso de fibras é uma das principais razões para a grande melhoria nas características mecânicas dos compósitos.

Os materiais compósitos apresentam excelentes características químicas, físicas e mecânicas por unidade de massa, com vantagens claras em relação aos materiais convencionais, nomeadamente a resistência, a rigidez, resistência à fadiga, ao impacto e à

corrosão. Para comparação com os metais são usados dois parâmetros para medir as vantagens mecânicas relativas dos materiais compósitos: a resistência específica, traduzida pela relação entre a resistência e a massa específica; e a rigidez específica, traduzida pela relação entre o módulo de elasticidade e a massa específica. Estas duas propriedades são, normalmente, elevadas nos materiais compósitos. Por exemplo, a tensão de ruptura de um compósito unidirecional de “carbono-epóxico” é da mesma ordem de grandeza do aço, mas a sua resistência específica é três vezes superior. Assim, os materiais compósitos permitem ainda construir estruturas mais leves com igual, ou melhor desempenho (Kaw, 1997).

Os materiais compósitos alargam o leque de opções em termos de engenharia, os novos materiais permitem atingir melhores valores de parâmetros, dependendo dos requisitos do novo material, como a massa, durabilidade, rigidez, fadiga, bem como uma maior flexibilidade em termos de forma e conceção. Em termos de conceção o uso de moldes permite uma maior complexidade da peça produzida, podendo em algumas situações reduzir significativamente o número de peças de alguns componentes. (de Moura *et al.*, 2005). Como exemplo apresenta-se na Figura 2 uma porta de avião, da empresa *Eurocopter*, constituída por um único componente.



Figura 2 Porta de avião-um único componente (*Eurocopter*, 2004).

Outras vantagens dos materiais compósitos são a resistência a altas temperaturas, à corrosão e ao desgaste. Estas características podem conduzir a custos mais baixos de ciclo de vida do produto. Avanços tecnológicos permitem diminuir o custo de matérias-primas de processamento, o que vai possibilitar uma substituição dos materiais tradicionais por compósitos. Estes materiais além de continuarem a ter uma aplicação privilegiada em mercados avançados (militar, espacial e aeronáutica), prevê-se que substituam de forma crescente os materiais em aplicações de engenharia como na construção civil (como por exemplo na construção de pontes) e nos transportes (automóveis maioritariamente constituídos por materiais compósitos). Espera-se também uma contribuição em problemas específicos nos vários ramos do mercado, nomeadamente na medicina (próteses) (Marques, 2012).

Os materiais compósitos normalmente são classificados pela matriz e pelo reforço. No que se refere à matriz esta pode ser metálica, cerâmica ou polimérica.

A matriz confere estrutura ao material compósito, assegura a distribuição de carga pelas fibras e protege as suas superfícies. A facilidade de processamento (flexibilidade arquitetónica) juntamente com a sua baixa densidade (e resistência química), fazem com que os materiais compósitos de matriz polimérica sejam atualmente os que têm um maior campo de aplicações, e que estão sujeitos a um maior desenvolvimento (Smith, 1998).

A classificação de materiais compósitos pelo tipo de reforço utilizado divide-se em três categorias: fibras contínuas, fibras descontínuas (*whiskers*) e partículas. Na Figura 3 apresenta-se um diagrama onde se identificam os vários tipos de fibras, bem como a nomenclatura usada na identificação do material compósito obtido.

Os compósitos de partículas podem conter partículas de diferentes tamanhos e formas dispersas na matriz. Se houver uma dispersão e tamanhos uniformes das partículas na matriz, os materiais compósitos de partículas podem ser considerados como quase homogéneos numa macroescala. Compósitos com fibras descontínuas contêm fibras curtas como reforço. Estas fibras podem ter uma orientação perfeitamente definida ou ser totalmente aleatória. Compósitos de fibras contínuas têm como reforço fibras longas e são mais eficientes na relação espessura-resistência, se a carga for aplicada segundo a direção das fibras. As fibras contínuas podem ser unidireccionais (todas paralelas), perpendiculares

(tecidos) ou orientadas entre si formando ângulos definidos (multidirecionais) (Daniel & Ishai, 1994).

As fibras podem apresentar um desempenho diminuído no compósito devido a vários fatores. Assim, a performance do compósito é influenciada pelo comprimento, forma, orientação e composição das fibras. O arranjo inter-fibras, a concentração e distribuição influenciam de um modo significativo a resistência dos compósitos reforçados com fibras. De um modo geral, a melhor combinação das propriedades dos compósitos reforçados com fibras é obtida quando a sua distribuição é uniforme. Isto verifica-se para todos os tipos de fibras (contínuas, descontínuas e partículas).

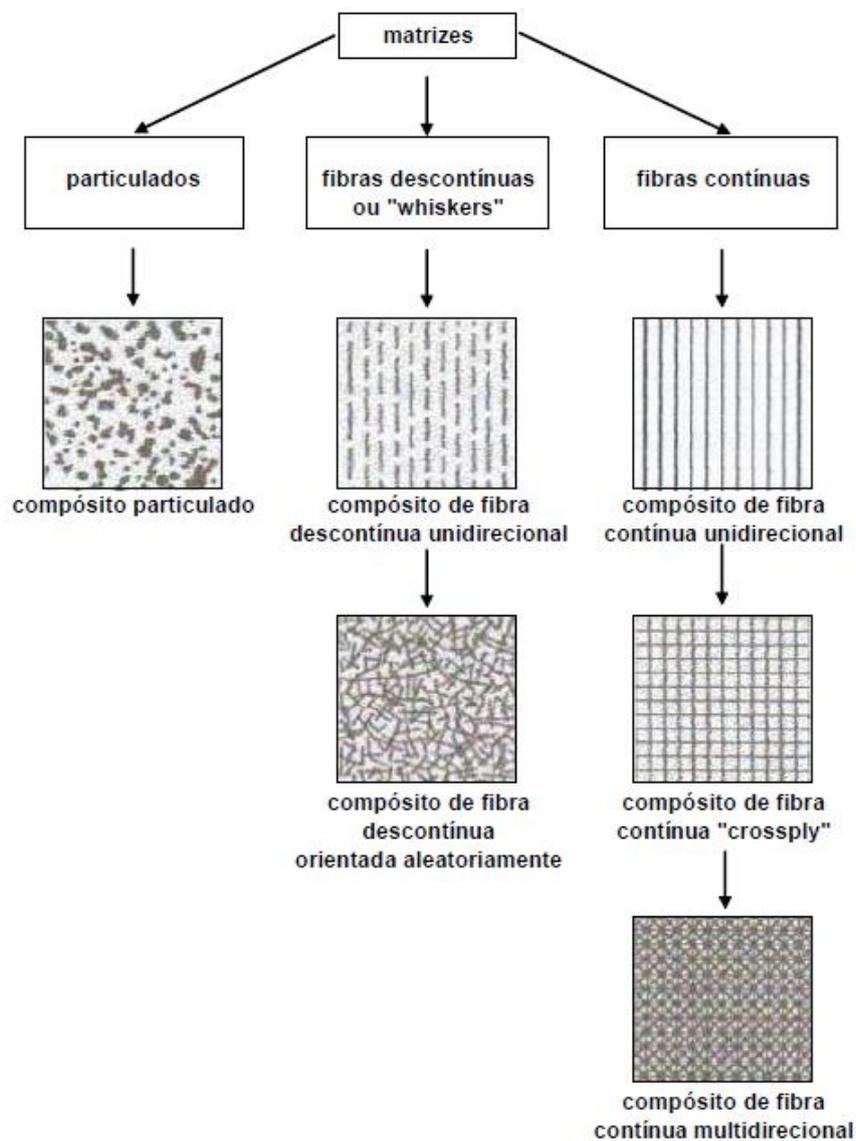


Figura 3 Classificação dos compósitos segundo o reforço (Daniel & Ishai, 1994).

No que respeita à orientação das fibras, podem-se distinguir duas configurações: um alinhamento definido e um alinhamento completamente aleatório. A orientação da fibra é particularmente importante nas propriedades mecânicas do compósito, as fibras contínuas alinhadas têm uma resistência à tração muito superior quando a carga é aplicada segundo a direção das fibras. Na Figura 4 pode-se verificar a influência da orientação das fibras, relativamente ao reforço, na tensão de rutura.

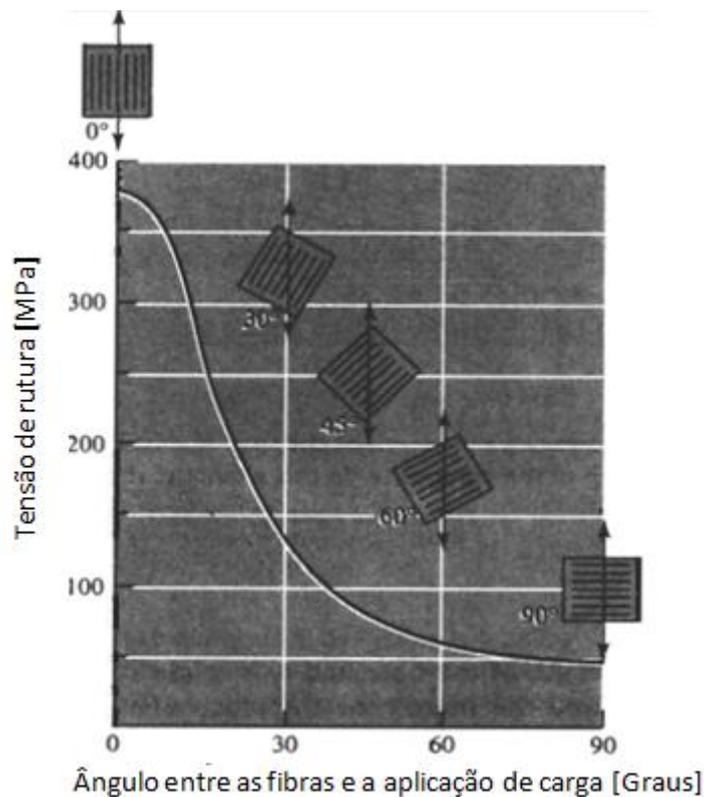


Figura 4 Influência da orientação das fibras na tensão de rutura de um material compósito reforçado com fibras de fibra de vidro E (Askeland, D. R. (1998).

Devido à influência da orientação das fibras nas propriedades mecânicas, é comum os materiais compósitos se encontrarem sob a forma de laminados. Um laminado é constituído por duas ou mais lâminas empilhadas.

Uma lâmina é uma camada de fibras envolvidas numa matriz, no caso de as fibras serem unidirecionais é denominada como lâmina unidirecional. Uma lâmina é um material ortotrópico (características simétricas relativamente a três planos) com o eixo principal segundo a orientação das fibras (Figura 5) (Daniel e Ishai, 1994).

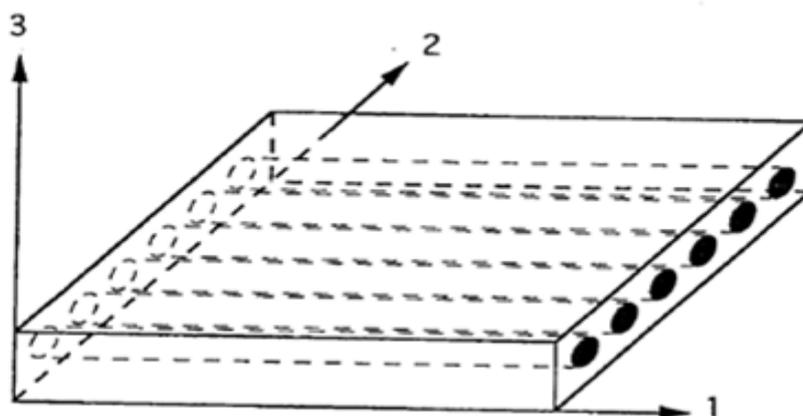


Figura 5 Lâmina unidirecional e eixos principais de coordenadas (Daniel & Ishai, 1994).

O empilhamento das lâminas conduz à obtenção de placas ou cascas, genericamente designadas por laminados. Os laminados podem ser constituídos por lâminas com espessuras diferentes e, em casos específicos, com materiais diferentes, quando isto se verifica são chamados de laminados híbridos (por exemplo: compósito híbrido com laminas de vidro-epóxico, laminas de carbono epóxico, e aramida epóxico acamados numa sequência específica).

No caso de as camadas de fibras estarem orientadas na mesma direção, ou seja, os ângulos formados entre as fibras dos laminados ser de zero graus, o laminado denomina-se unidirecional. Se as camadas de fibras que constituem o laminado têm orientações diferentes, ou seja, as camadas são sobrepostas com ângulos de orientação de fibras diferente de zero, o compósito resultante designa-se por laminado multidirecional. Na Figura 6 está um exemplo de um laminado com oito camadas, na situação (a) as fibras estão todas orientadas a zero graus-unidirecional, na situação (b) o laminado tem na mesma oito camadas mas as fibras estão orientadas a $[0,90,+45,-45]_S$. (a letra *S* designa simetria no empilhamento relativamente à última lâmina mencionada). Por norma, os ângulos entre os laminados são medidos a partir da orientação das fibras do eixo principal (longitudinal) no sentido anti-horário (Daniel e Ishai, 1994).

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de laminados de matriz polimérica, sendo um reforçado com fibras de vidro e, outro com fibras de carbono.

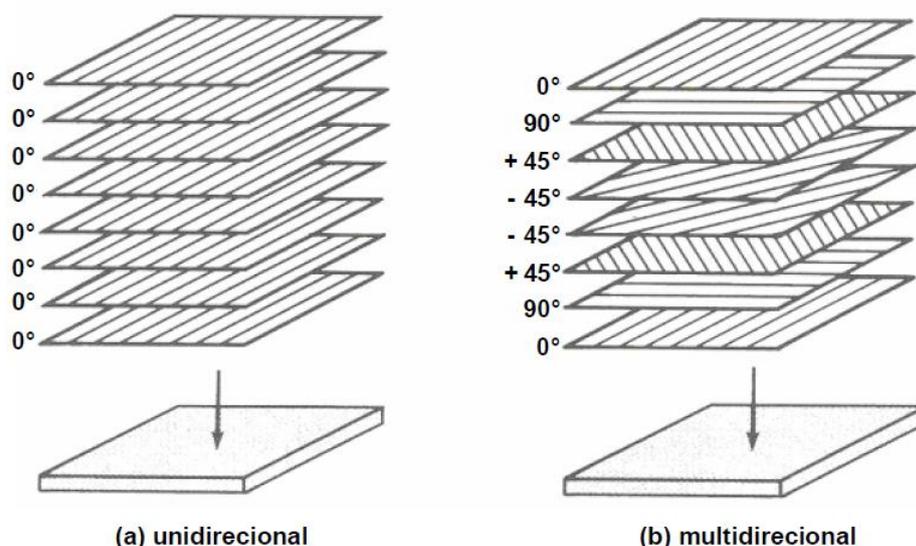


Figura 6 Empilhamento de laminados: (a) unidirecional; (b) multidirecional (Smith, 1998).

Um material polimérico pode ser considerado como sendo constituído por muitas partes - a palavra polímero é originária do grego (poli: muitas, mero: parte). Estas partes estão unidas ou ligadas quimicamente entre si, de modo a formar um sólido, dependendo do modo como estão ligados química e estruturalmente os polímeros dividem-se em duas categorias principais: termoplásticas e termoendurecíveis.

Os termoplásticos necessitam de calor para serem conformados e endurecem quando são arrefecidos. Podem ser reaquecidos várias vezes e reenformados em novas formas sem que ocorra uma alteração significativa das suas propriedades. Os polímeros termoendurecíveis, ao contrário dos termoplásticos, não podem ser reprocessados, depois de aquecidos assumem uma forma permanente, na cura (endurecimento) ocorre uma reação química, não podendo por isso ser reaquecidos e reenformados noutra forma, uma vez que se degradam ou decompõem a temperaturas demasiado altas. Os materiais termoendurecíveis não podem ser reciclados. (Smith, 1998)

A matriz utilizada nos laminados ensaiados é uma matriz polimérica de resina epóxida. Este tipo de resinas insere-se na categoria dos polímeros termoendurecíveis. Caracterizam-se por terem uma boa estabilidade dimensional, resultado da sua baixa contração durante a cura (2 a 3%), boa adesão a outros materiais (antes da cura têm viscosidades reduzidas, o que facilita a impregnação dos reforços), boas propriedades de isolamento elétrico, boa resistência química e ao meio ambiente e boas propriedades

mecânicas. Devido às suas características, as resinas epóxicas são o material predominante para a matriz dos componentes de elevado desempenho, como no caso dos compósitos reforçados com fibras (Smith, 1998).

Em relação às fibras utilizadas como reforço, as mais utilizadas são as de vidro, de carbono e de aramido (*kevlar*). Na Tabela 1 comparam-se as propriedades dos tipos de fibras mencionados.

Tabela 1 Propriedades das fibras utilizadas como reforço (Berthelot,1998).

Propriedade	Vidro E (HTS)	Carbono (Tipo HS)	Aramido (Kevlar 49)
Resistência à Tração [MPa]	3400	3000 – 4000	3000
Módulo de elasticidade [GPa]	73	230	120
Alongamento [%]	4.4	0.6 – 1.2	1.9
Densidade [g/cm ³]	2.60	1.75	1.45

As fibras de vidro apresentam uma menor resistência à tração, um módulo de elasticidade mais baixo, maior massa específica e um maior alongamento que as restantes. Contudo, devido à sua versatilidade, facilidade de produção e baixo custo, as fibras de vidro são o material mais utilizado como reforço de materiais compósitos. No presente trabalho vão-se utilizar laminados de fibra de vidro e laminados de fibra de carbono, sendo sobre estes que vai recair uma maior caracterização.

Como referido, as fibras de vidro são o tipo de reforço mais utilizado e o mais económico. A técnica mais comum para a sua produção é o estiramento de vidro fundido através de uma fileira com orifícios de dimensões muito precisas. As fibras são sujeitas a tratamentos superficiais à saída da fileira, que varia conforme o fim a que se destinam (revestimento têxtil para o fabrico de tecidos sem o risco de danificação da fibra; revestimento plástico para permitir a compatibilização da fibra com as diferentes matrizes a que se destina). Atualmente são produzidos pelo menos três tipos de fibras sob a forma de fio, casos dos tipos E,S e R. As fibras do tipo S e R são produzidas a partir de vidro de alta resistência, daí terem custos bastante elevados e serem apenas utilizadas nas indústrias

mais exigentes (aeronáutica), por esse motivo as fibras de vidro mais comuns são as do tipo E (de Moura *et al.*, 2005).

A fibra de carbono pode ser obtida a partir de vários compostos orgânicos, mais concretamente através da sua decomposição térmica, também conhecida por pirólise. Atualmente, os compostos orgânicos utilizados para a obtenção de fibras de carbono são a celulose, o poliácridonitrilo (*PAN*) e o alcatrão (“*pitch*” – resíduo da destilação do petróleo ou do alcatrão).

A técnica mais comum para a produção de fibras de carbono é a sua obtenção a partir do *PAN*, de um modo geral o seu processamento engloba as seguintes etapas: estabilização, carbonização e grafitação. Na etapa de estabilização, as fibras de *PAN* são tracionadas de modo a obter um alinhamento das redes fibrilares no interior de cada fibra, sendo posteriormente oxidadas ao ar livre a cerca de 220°C enquanto permanecem tracionadas. A segunda etapa designa-se por carbonização, é um tratamento térmico que consiste em aquecer as fibras de *PAN* estabilizadas até que se transformam em fibras de carbono por eliminação do oxigénio, hidrogénio e azoto da fibra originária. Este processo é geralmente realizado numa atmosfera inerte, com temperaturas entre os 1000°C e 1500°C. A terceira e última fase consiste na grafitação, este processo é um tratamento térmico feito a temperaturas na ordem dos 1800°C e tem como objetivo aumentar o módulo de elasticidade, é feito em atmosfera neutra e obtém-se um elevado grau de orientação da estrutura. Posteriormente, as fibras podem ser sujeitas a um tratamento superficial. Neste processo as fibras são colocadas numa atmosfera de ácido nítrico ou ácido sulfúrico, e as superfícies são modificadas de forma a se obter elevada adesão entre as fibras e a resina empregue com matriz (Smith, 1998; de Moura *et al.*, 2005).

Relativamente à disponibilidade no mercado, as fibras em forma de fio podem apresentar várias formas: *roving*, mantas, tecidos 2D e 3D, malhas e entrelaçados

O *roving* é um cordão de filamentos contínuos enrolado numa bobine, pode destinar-se à produção de fibras descontínuas, tecidos, ou ser processado para a obtenção de mantas, malhas ou híbridos.

As mantas possuem as fibras distribuídas aleatoriamente e agregadas com um material ligante, este material deve ser solúvel na impregnação. Desta forma, as fibras dispersas na manta podem ser contínuas ou descontínuas.

Os tecidos são compostos por fibras contínuas, e podem ser de vários tipos: entrelaçados, unidirecionais e híbridos. Os tecidos entrelaçados consistem num arranjo de fibras orientadas perpendicularmente entre si, e podem ter diferentes configurações de modo a suprir algumas das desvantagens dos compósitos unidirecionais (estabilidade geométrica e resistência mecânica uniforme em duas direções). A Figura 7 mostra alguns dos padrões em tecidos mais utilizados nos materiais compósitos. Os tecidos unidirecionais possuem as fibras todas orientadas na mesma direção, os tecidos híbridos são uma combinação de diferentes tipos de fibras (vidro, carbono, aramida) de modo a obter compósitos com algumas vantagens relativamente aos compósitos tradicionais, nomeadamente minimização de distorções térmicas, melhor resistência mecânica, rigidez, ou ainda reduções na densidade e custo do material (De Moura *et al.*, 2005).

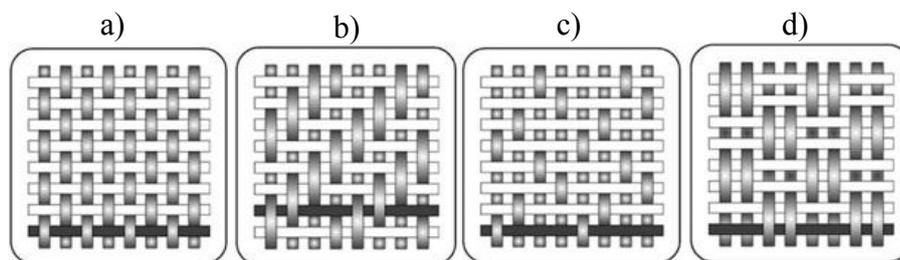


Figura 7 Principais tipos de tecido utilizados como reforço nos materiais compósitos: a) "plain"; b) "twill"; c) "satin"; d) "basket"; (SPHandbook, 2010).

As fibras disponíveis na forma de malha caracterizam-se pela ligação entre as várias camadas de fibras. Esta forma permite uma melhor distribuição das cargas pelas fibras. Quando as camadas de fibras têm várias direções, as malhas podem originar materiais com propriedades quase isotrópicas, Figura 8.

Além, dos tipos de fibras referidos anteriormente ainda se podem encontrar tecidos de fibras 3D e entrelaçados. Os tecidos 3D distinguem-se dos anteriores por possuírem fibras orientadas segundo a sua espessura. Podem ter diversas orientações, permitindo deste modo a obtenção de perfis com fins estruturais.

No que respeita às fibras em forma de entrelaçados, estas podem ser tubulares ou planas, a sua resistência específica é bastante elevada e, devido ao seu processo de conformação, normalmente são mais dispendiosas que as formas de fibras descritas anteriormente.

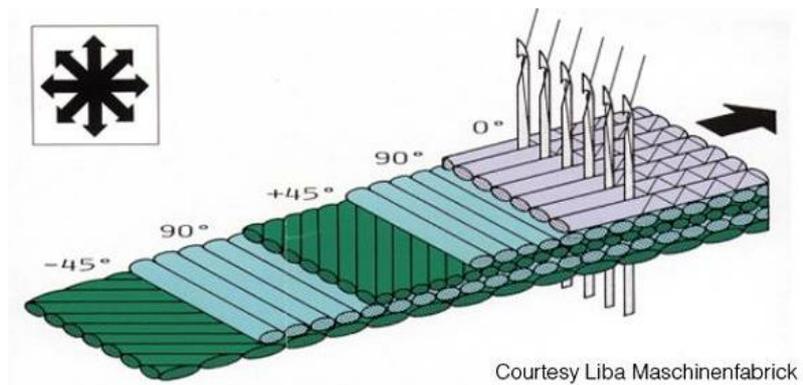


Figura 8 Modo como é constituída uma malha (SPHandbook, 2010).

As fibras de carbono são caracterizadas por apresentarem uma baixa massa específica associada a elevada resistência mecânica e rigidez. Estas características, e o seu custo de produção elevado, fazem com que as fibras de carbono sejam utilizadas em compósitos de elevado desempenho, nomeadamente na indústria aeronáutica, espacial, desporto e medicina. Hoje em dia materiais compósitos com este tipo de fibras são cada vez mais usuais, o que conseqüentemente aumenta uma procura pelo material, aumentando a sua produção e exigindo novas técnicas de fabrico, e naturalmente uma redução no seu preço.

Dadas as suas características, os materiais compósitos marcam uma presença cada vez mais acentuada nos diferentes ramos industriais, podendo ser encontrados facilmente no dia-a-dia em componentes de automóveis, próteses, equipamentos desportivos, telemóveis, computadores portáteis, entre muitos outros.

Sempre que uma estrutura está sujeita à ação de forças tem de se garantir a sua estabilidade, isto é, tem de se garantir que a estrutura consegue suportar determinados valores de carga sem sofrer uma mudança abrupta na sua configuração. O problema da instabilidade coloca-se sempre que existem esforços de compressão na estrutura, é portanto fundamental um conhecimento do comportamento do material, bem como dos valores de carga crítica para os quais se inicia esta instabilidade.

Este trabalho tem como objetivo estudar a instabilidade que ocorre em laminados sujeitos a solicitações de flexão. Quando sujeitos a este tipo de esforços, e a partir de um certo valor de carga (carga crítica), os laminados tendem a sofrer uma distorção transversal, ou seja, originam-se deslocamentos segundo uma direção

perpendicular à da carga aplicada (encurvadura). Este efeito conjugado de encurvadura e flexão designa-se por *bending-buckling* (Figura 9).

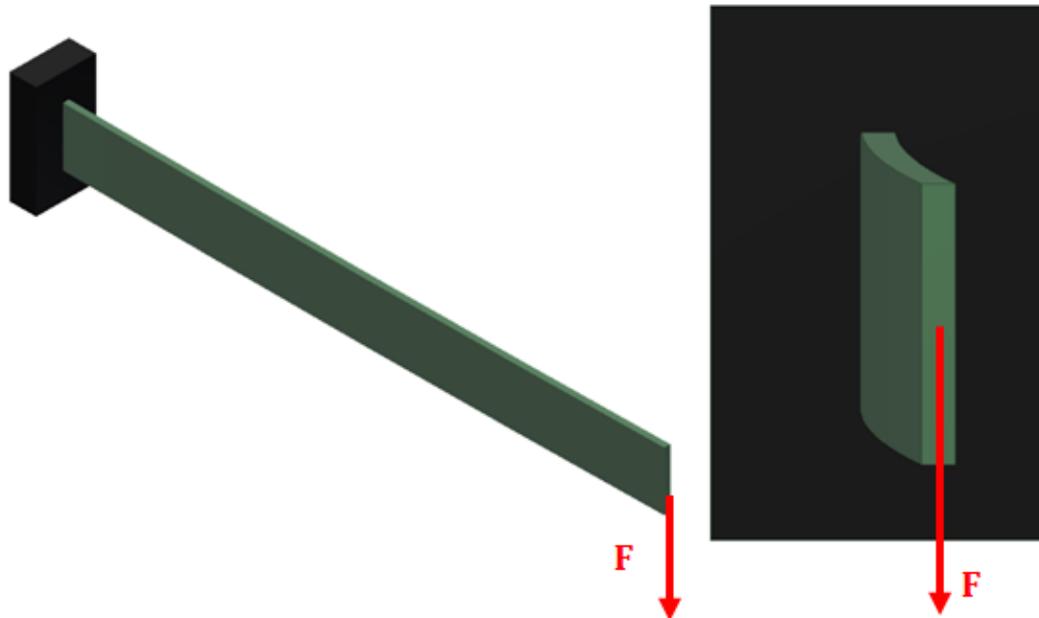


Figura 9 Laminado encastado-livre sujeito à flexão.

Para esforços de compressão a carga crítica de encurvadura pode ser determinada através da fórmula de Euler (1):

$$P = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad (1)$$

em que E é o Módulo de Elasticidade, I é o momento de inércia da secção e l o comprimento do provete em análise.

Para placas isotrópicas sujeitas à flexão a equação (2) permite determinar a carga crítica de encurvadura (Den Hartog, 1952):

$$P = \frac{4,17}{l^2} \sqrt{\frac{GEh^2t^6}{36}} \quad (2)$$

em que G é o Módulo de Rigidez, E é o Módulo de Elasticidade, h , t e l são respetivamente a altura, espessura e comprimento da viga. No caso de materiais não isotrópicos, a equação (2) não deve ser aplicada.

No presente trabalho foram realizados ensaios experimentais em diferentes laminados de fibra de vidro e fibra de carbono, com o objetivo de determinar a carga a partir da qual ocorre o efeito *bending-buckling*.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Processamento dos laminados de material compósito

Os laminados de vidro-epóxico e de carbono-epóxico ensaiados foram processadas por autoclave no INEGI, Porto (Figura 10). O processo de moldação por autoclave consiste em aplicar simultaneamente pressão, vácuo e temperatura.



Figura 10 Um dos sistemas para processamento de laminados em autoclave, no INEGI-Porto.

O fabrico de compósitos laminados normalmente engloba três fases. A primeira consiste em obter uma banda com feixes paralelos de fibras envolvidos por resina, parcialmente curada para garantir a consistência e maneabilidade pretendidas. Esta banda é designada por pré-impregnado e deve ser armazenada e mantida a baixa temperatura para garantir que a resina não perde as suas propriedades.

Numa segunda fase corta-se o pré-impregnado em peças que são colocadas umas sobre as outras num molde com a forma pretendida. É, neste momento, que se define o número e orientação das camadas desejados para o laminado.

A terceira e última fase consiste na consolidação do laminado. Após a preparação da sequência de empilhamento pretendida, o laminado é fechado numa embalagem na qual se faz vácuo com o objetivo de remover o ar que possa haver entre as camadas. Seguidamente o laminado é colocado no interior da autoclave para se fazer a cura final da resina epóxida.

Neste trabalho foram utilizados laminados com 16 e 32 camadas. O ciclo de cura foi feito, como referido, em autoclave e consistiu num aquecimento-arrefecimento à velocidade de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$, patamar de cura 130°C durante 1 hora e pressão constante a 2 bar. O volume de fibra nos laminados ensaiados é de 44.5 %.

3.2. Placas ensaiadas

As placas ensaiadas foram obtidas pelo corte dos laminados referidos anteriormente. O corte foi feito com uma serra circular de disco adiamantado, com 2mm de diâmetro (Figura 11). Este disco possui ranhuras que promovem a dissipação do calor, evitando deste modo a deterioração da matriz epóxida.



Figura 11 Serra de disco de dentes diamantados para corte dos laminados.

Foram ensaiadas diversas placas cujas características e designação são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 Características e designação das placas ensaiadas.

Material	Número de camadas	Orientação	Dimensão [mm]	Designação
Vidro-Epóxico	16	$[0_2/90_2]_{2S}$	220x22x2.2	FV.1
Vidro-Epóxico	16	$[0/90/0/90]_{2S}$	220x22x2.2	FV.2
Vidro-Epóxico	32	$[45_2/90_2/-45_2/0_2]_{2S}$	220x22x4.4	FV.3
Carbono-Epóxico	16	$[0]_{16}$	220x22x2.2	FC

3.3. Esquema do bastidor de ensaio

Com o objetivo de melhorar um mecanismo já existente, foi recolhida informação acerca do modo como as placas eram submetidas ao esforço conjugado de *bending-buckling* e com a ajuda do programa de modelação 3D *Inventor 2012* foi projetado um novo sistema para as solicitar.

No projeto da bancada de ensaios foi implementado um atuador pneumático para aplicar a carga de forma constante, e um carril deslizante capaz de suportar e manter alinhada a célula de carga. Atendendo à massa da célula de carga (600 gramas), optou-se por colocar o sistema de aplicação de carga na horizontal e a ligação ao laminado na vertical. A alteração da direção da carga foi feita através de uma roldana com atrito desprezível. Na Figura 12 está representado o modelo 3D projetado para solicitar o laminado.

Para a aquisição de dados optou-se pela recolha em vários pontos da placa em simultâneo, através de sensores de deslocamento linear (potenciómetros), e da colocação de extensómetros lineares ao longo da linha neutra da placa (Figura 13).

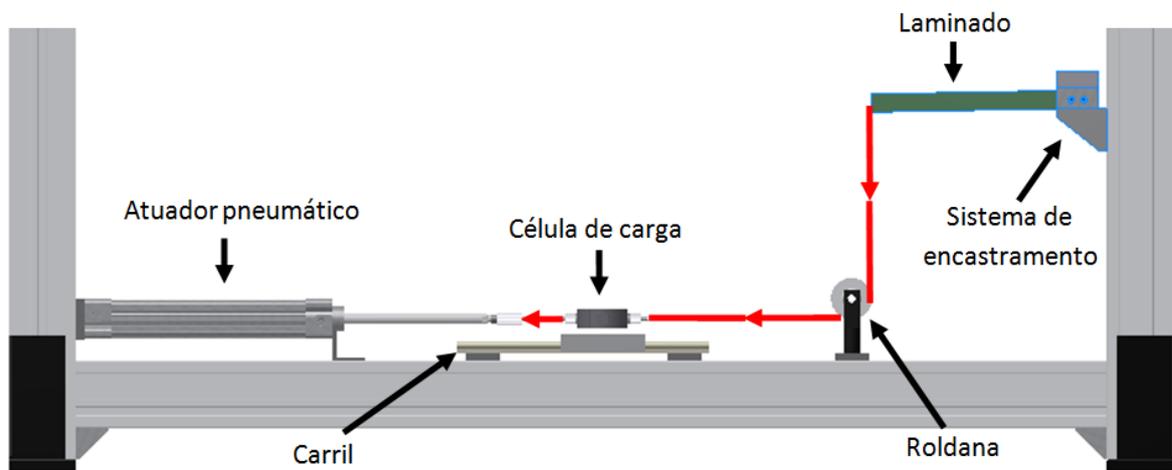


Figura 12 Modelo 3D do bastidor projetado.

Na Figura 13 identifica-se o sistema de eixos escolhido e a localização dos pontos de medição considerados:

- Ponto A-Extremidade livre da placa. Deslocamento nas direções de Y e Z;
- Ponto B- Centro da placa. Deslocamento na direção de Y;
- Pontos C; D; E; F- Deformação na direção de X.

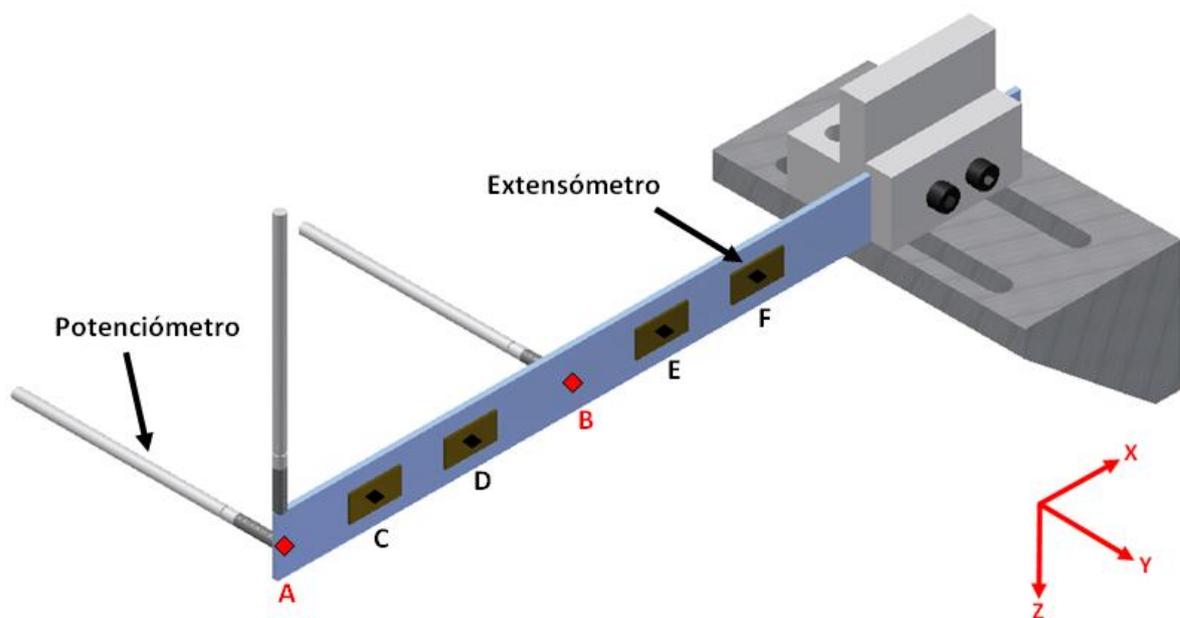


Figura 13 Representação do encastramento, dos pontos onde vão ser aplicados os sensores e do sistema de eixos escolhido.

O ensaio experimental consiste na aplicação de uma força gradual na extremidade livre da placa (Figura 13 ponto A) segundo a direção e sentido do eixo Z e determinar, através dos sensores, o momento em que se inicia o deslocamento segundo a direção de Y. Desta forma é possível determinar os valores da carga crítica de *bending-buckling* para as diferentes placas ensaiadas.

De modo a recolher a informação da célula de carga, dos sensores de deslocamento linear e dos extensómetros, foi necessário desenvolver um sistema integrado de aquisição de dados em tempo real. Para tal foram utilizadas duas placas NI (modelo 9219) e a programação foi feita em *LabView*.

3.4. Equipamento utilizado

3.4.1. Atuador pneumático

Um atuador pneumático é um elemento que utiliza o ar comprimido como fonte de energia. A energia contida no ar é utilizada para efetuar movimentos retilíneos ou rotativos conforme o tipo de atuador. Na Figura 14 está exemplificado, de modo resumido, o funcionamento de um atuador pneumático linear. Se o ar comprimido entrar pela câmara do lado direito faz com que a haste recue, caso o ar comprimido entre pela câmara do lado esquerdo faz com que esta avance.

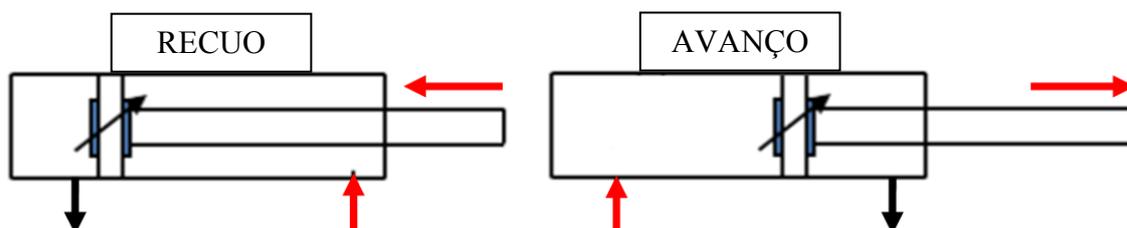


Figura 14 Representação esquemática do modo de funcionamento de um atuador pneumático.

O sentido de atuação da haste é feito através de uma válvula que direciona o fluxo de ar comprimido para a câmara direita ou esquerda, permitindo fazer o avanço e recuo do atuador. O funcionamento desta válvula, designada por válvula distribuidora de caudal, está descrito no subcapítulo 3.4.2.

A introdução de um atuador pneumático no sistema experimental surgiu devido à necessidade da carga ter de ser aplicada de forma constante e gradual. O atuador utilizado é o que está representado na Figura 15, com a designação comercial *SMC CP96SDB32-200*. Este tem a particularidade de possuir sensores eletromagnéticos que emitem um sinal elétrico à válvula distribuidora de caudal, permitindo deste modo a inversão do sentido de trabalho no momento pretendido. A velocidade de avanço ou recuo é regulada através de válvulas reguladoras de caudal. Estas válvulas, que são colocadas nos orifícios de entrada/saída de ar do atuador (assinaladas na Figura 15), criam uma resistência à passagem de caudal, permitindo deste modo o ajuste para a velocidade pretendida. Todo o sistema pneumático é alimentado por uma válvula reguladora de pressão que tem como principal tarefa manter constante a pressão de trabalho. No presente trabalho a pressão foi mantida a 6 bar.

As especificações do atuador pneumático podem ser consultadas no Anexo A



Figura 15 Atuador pneumático da marca *SMC* e respetivas válvulas reguladoras de caudal.

3.4.2. Válvula distribuidora de caudal

Tal como já foi referido no subcapítulo 3.4.1, as válvulas distribuidoras de caudal têm como principal função orientar a direção que o ar comprimido deve seguir com o objetivo de fazer o atuador pneumático avançar ou recuar.

A válvula utilizada, da marca *Festo* (Figura 16) é de 5 vias (entrada/saída do ar) e 2 posições (estado da válvula).

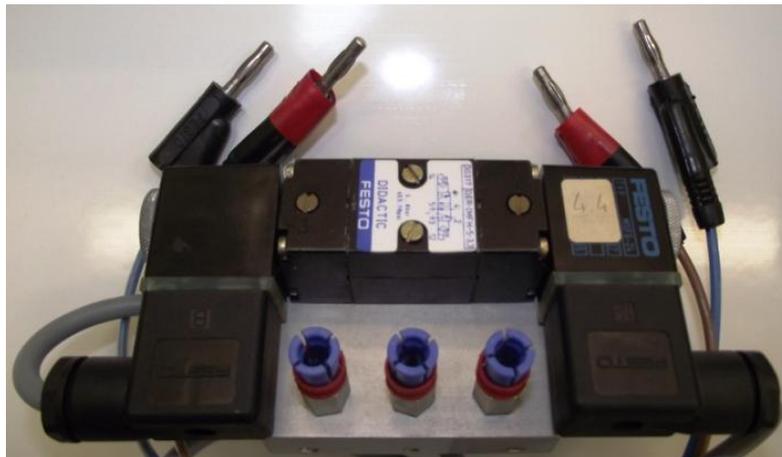


Figura 16 Válvula distribuidora de caudal 5/2 da marca Festo.

O acionamento da válvula distribuidora é feito através de um sinal elétrico proveniente dos sensores eletromagnéticos que se encontram no atuador pneumático. Estes sensores permitem que a válvula mude de posição e, conseqüentemente, a orientação do fluxo de ar. A sua simbologia está representada na Figura 17.

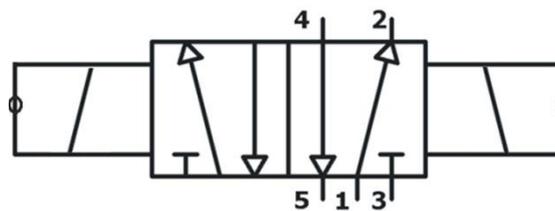


Figura 17 Simbologia da válvula 5/2.

3.4.3. Painel de controlo

Para fazer todas as ligações elétricas necessárias ao controle do sistema pneumático foi necessária a inclusão de um painel (Figura 18).

Através da ajuda do *software* da marca *Festo*, foi criado um programa (ver subcapítulo 4.3.2) para simular o funcionamento do circuito pneumático pretendido e saber quais as ligações, tanto elétricas como pneumáticas, a efetuar.

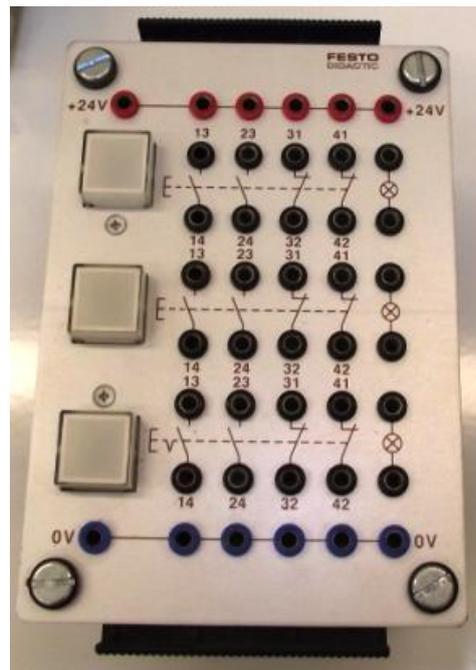


Figura 18 Painel de ligações da marca Festo.

3.4.4. Extensómetros

Os extensómetros são dispositivos utilizados para medir deformações. O seu princípio de funcionamento consiste numa variação da resistência elétrica quando sujeito a uma deformação. Um extensómetro é constituído por um fio metálico com uma determinada resistência elétrica e uma película que o suporta. Esta película permite a ligação do extensómetro à zona de medição. Quando o comprimento da secção que contém o fio aumenta (Figura 19) a resistência aumenta, quando esta secção diminui a resistência também diminui.

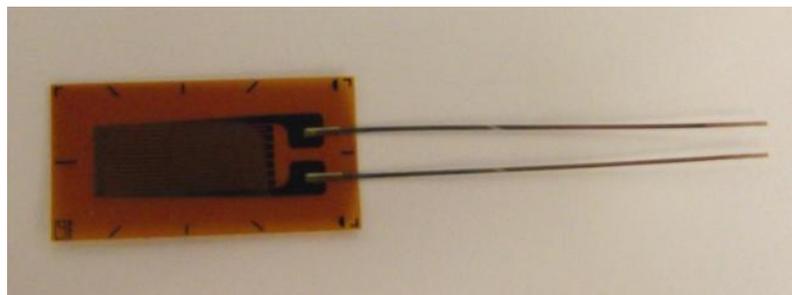


Figura 19 Extensómetro utilizado da marca HBM.

No caso em estudo foram quatro extensômetros iguais aos da Figura 19, colados ao longo da linha de eixo (ver Figura 13). Os extensômetros vão funcionar como sensores, ou seja, permitem identificar o aparecimento de deformações segundo o comprimento da placa (Figura 13 eixo X), característico da existência do efeito de *bending-buckling*.

Os extensômetros utilizados têm a designação comercial *HBM 1-LY11-10/120* e as suas características estão disponíveis no Anexo B.

3.4.5. Célula de carga

De modo a quantificar a carga aplicada às placas em cada ensaio foi usada uma célula de carga. A célula de carga é um mecanismo eletromecânico projetado para a medição de esforços. Deforma-se dentro do regime elástico e, conforme a deformação a que fica sujeita, devolve um sinal elétrico equivalente à carga aplicada.

O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da sua resistência interna. Possui internamente quatro extensômetros ligados entre si segundo a ponte de *Wheatstone* e, a variação da resistência da ponte, em função da deformação dos extensômetros, é proporcional à força que a provoca. Através da medição do balanceamento da ponte é possível obter o valor da força aplicada. Antes de cada ensaio é necessário calibrar a célula de modo a definir o zero e conhecer os erros associados.

A célula de carga utilizada é da marca *AEP* (modelo TSTM.214.R3) (Figura 20), tem funcionamento à tração/compressão e as suas características estão enunciadas no Anexo C.



Figura 20 Célula de carga de tração-compressão da marca *AEP Transducers*.

3.4.6. Sensor de deslocamento linear

De modo a medir os deslocamentos em vários pontos em simultâneo, tal como representado na Figura 14, foram utilizados três potenciômetros resistivos, designação comercial *MegaTron RC13-75-G-1* (Figura 21). Este tipo de sensores tem comportamento passivo e o atrito entre a haste móvel e o corpo cilíndrico é desprezível, não interferindo deste modo com os deslocamentos da placa a ensaiar.



Figura 21 Sensor de deslocamento linear da marca *MegaTron*.

Este tipo de sensor é constituído por uma resistência elétrica variável, alimentada por uma determinada tensão e, conforme o posicionamento da haste móvel, vai corresponder com uma diferença de potencial. O curso da haste móvel é de 80mm e atendendo à resposta linear, sabendo a tensão a que está alimentado, determina-se o deslocamento da haste.

As especificações relativas a este sensor encontram-se no Anexo D.

3.4.7. Fonte de alimentação

Para alimentar os sensores de deslocamento linear, as válvulas distribuidoras de caudal e os sensores eletromagnéticos, recorreu-se a uma fonte de alimentação (Figura 22) de designação comercial *Velleman Ps-613*.



Figura 22 Fonte de alimentação da marca *Velleman*.

As fontes de alimentação são aparelhos eletrônicos com quatro componentes principais, nomeadamente um transformador, um regulador de tensão, um circuito retificador e um filtro. A fonte de alimentação é utilizada para transformar a energia elétrica da rede, sob a forma de corrente alternada, em energia elétrica de corrente contínua.

3.4.8. Placa de aquisição de dados

A placa de aquisição permite adquirir e converter os sinais analógicos, devolvidos pelos sensores, em sinais digitais. As placas utilizadas, da marca *National Instruments*, têm a designação de *NI-9219* (Figura 23).

Cada placa permite ligar até quatro sensores. Como neste estudo foram utilizados oito sensores em simultâneo, foi necessário o uso de duas placas. As placas são ligadas ao computador e as ligações a cada sensor são descritas no capítulo 4.3.1. Houve a necessidade de desenvolver um *software* de aquisição e tratamento de dados que vai ser descrito em pormenor no capítulo 4.3.1.



Figura 23 Placa de aquisição de dados e respetivo “chassis” da marca *National Instruments*.

As características técnicas da placa de aquisição de dados encontram-se disponíveis no Anexo E.

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1. Bastidor de ensaios

No subcapítulo 3.3 foi projetada uma configuração possível para o bastidor onde se iriam realizar os ensaios. A bancada experimental (Figura 24) ficou muito próxima da inicialmente projetada.

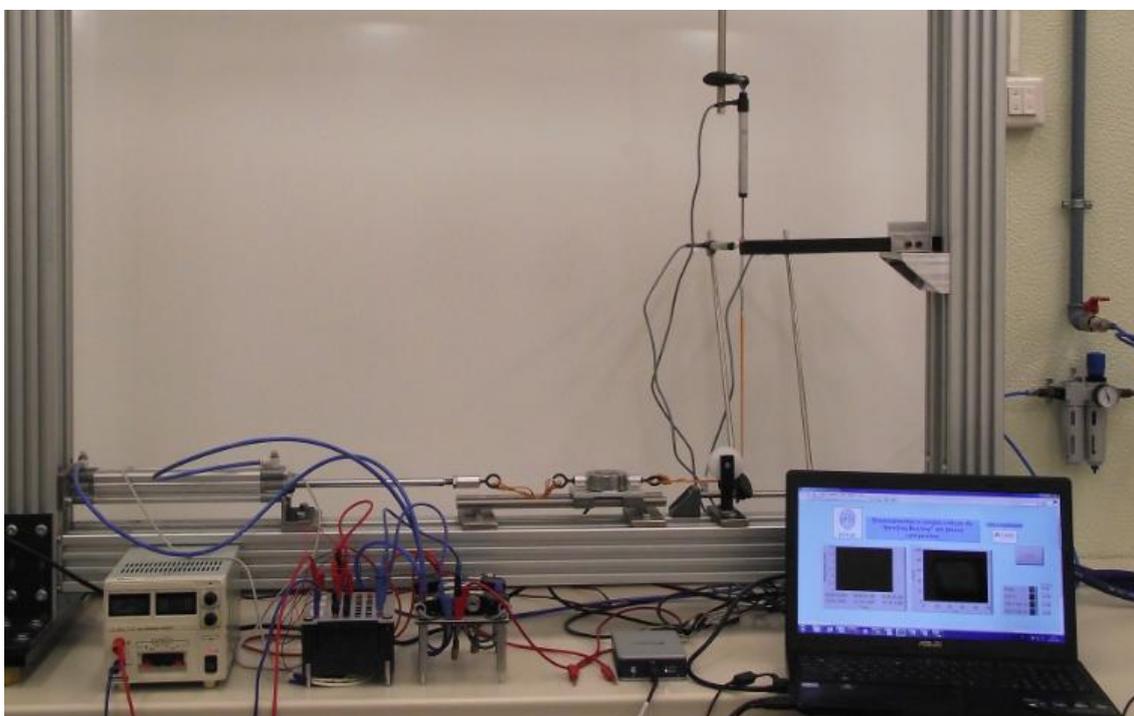


Figura 24 Aparato experimental.

De modo a implementar a configuração pretendida no bastidor surgiu a necessidade de projetar e executar diversos elementos de fixação dos componentes à estrutura.

Houve ainda a necessidade de desenvolver um *software* capaz de adquirir toda a informação devolvida pelos sensores em simultâneo. Nos ensaios onde são aplicados extensómetros ao laminado tem-se oito sensores, nomeadamente uma célula de carga, três

potenciômetros e quatro extensômetros, dos quais era necessário recolher informação em conjunto. Nos ensaios onde não se usam os extensômetros, apenas é utilizada uma placa de aquisição de dados. O programa de aquisição é necessariamente diferente da situação em que é necessário recorrer-se ao uso de duas placas *NI*. No subcapítulo 4.3.1 está descrito em pormenor o *software* desenvolvido.

4.2. Equipamento concebido

Os equipamentos concebidos foram projetados através do *software Inventor12*, onde se desenharam as peças em 3D, e posteriormente passou-se para um formato 2D onde se representam as vistas e cotas necessárias para a construção das mesmas.

A implementação de um mecanismo pneumático no sistema, bem como a introdução de uma guia linear, levaram à necessidade do desenvolvimento de elementos que permitissem a sua fixação na bancada de ensaio (Figura 25 (a) e (d)).

De modo a converter o deslocamento horizontal que o atuador pneumático impõe num deslocamento vertical foi construída uma roldana (Figura 25 b)). Esta roldana tem a particularidade de ter dois rolamentos incorporados no seu elemento móvel, o que diminuiria consideravelmente o atrito que aí poderia surgir, possibilitando deste modo uma transferência de carga praticamente sem perda, desde o atuador pneumático até ao laminado.

O sistema que permite o encastramento foi construído em alumínio e posteriormente maquinado (Figura 25 (f) e (g)). Deste modo garante-se a perpendicularidade entre estrutura-laminado e o conseqüente alinhamento e correta aplicação da carga.

Foram ainda desenvolvidas umas ponteiras (Figura 25 (h)), cujas dimensões foram impostas pelos diâmetros do veio e da rosca interior na célula de carga. Estes elementos permitiram posteriormente fazer a ligação entre atuador-célula de carga-laminado. De modo a simplificar e tornar esta conexão num mecanismo eficaz e de fácil implementação foi utilizado um cabo de alpinismo de 3 mm de espessura capaz de suportar esforços de tração até 800N. No local de aplicação da carga ao laminado foi utilizado um cabo de aço com diâmetro de 0,5mm e resistência à tração de 100N.

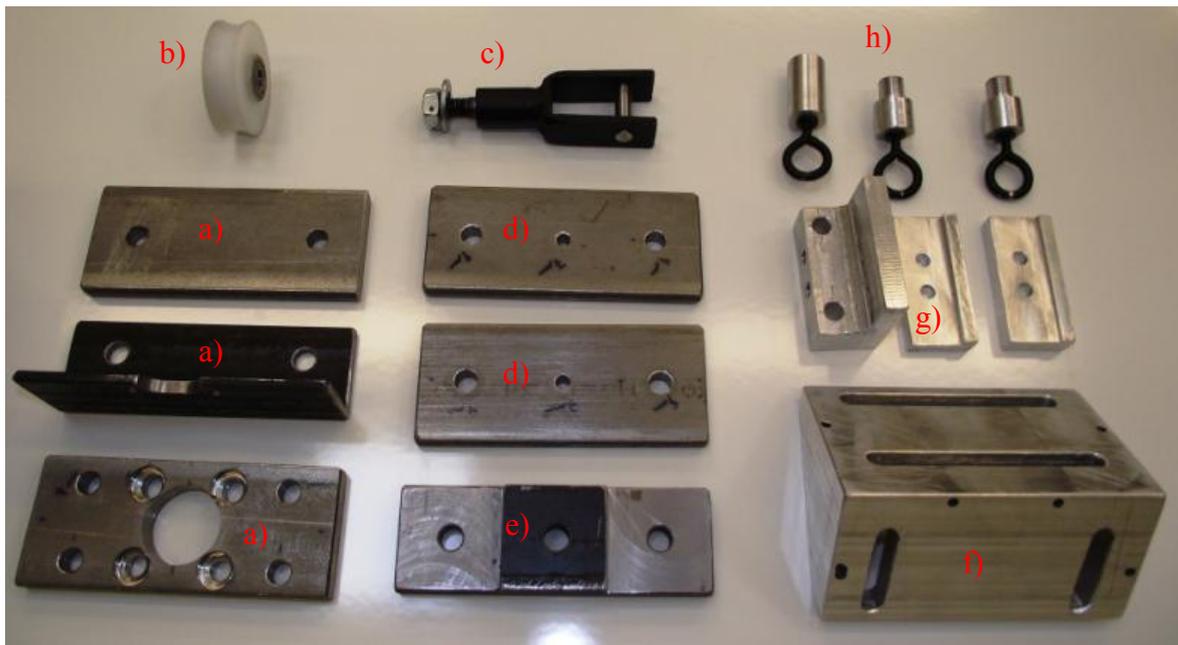


Figura 25 Elementos concebidos: a) apoio atuador linear; b) roldana; c) apoio roldana; d) apoio carril; e) fixador do apoio da roldana ao bastidor; f) apoio do encastramento; g) encastamentos para os diferentes laminados; h) ponteiras.

Na extremidade dos laminados foi introduzido um casquilho metálico. É neste local que se procede à transferência da carga aplicada ao laminado. O casquilho serve para aumentar a área de contacto entre o cabo e o laminado, e evita o esmagamento de fibras. De modo a danificar o menos possível o laminado o casquilho introduzido é de reduzidas dimensões, cerca de 2.4 mm de diâmetro exterior. Na Figura 26 estão apresentados dois laminados onde se podem ver os casquilhos.

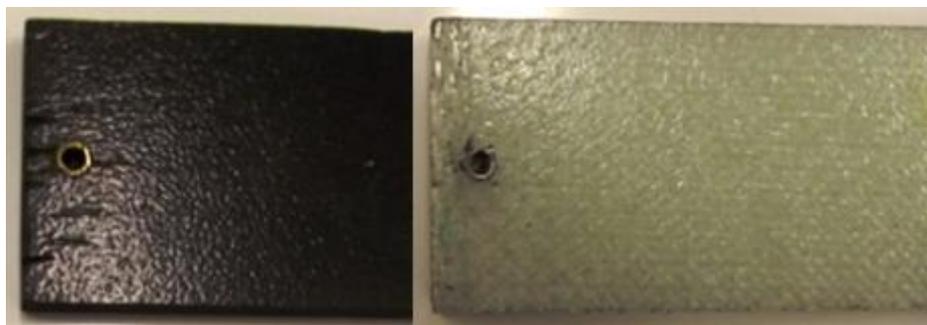


Figura 26 Extremidade de aplicação da carga no laminado.

Nos anexos F a Q encontram-se os desenhos 2D devidamente cotados referentes aos apoios do atuador linear, roldana, apoio da roldana, apoios do carril, fixador do apoio da roldana ao bastidor, apoio do encastramento, encastramentos para os diferentes laminados e ponteiras.

4.3. Software desenvolvido

4.3.1. Programa LabView

Os sensores utilizados para quantificar os deslocamentos e cargas envolvidas não possuem nenhuma interface que permita a visualização direta. O registo e quantificação dos valores obtidos nos ensaios também não são feitos de forma direta, uma vez que estes sensores, quando solicitados, devolvem um sinal analógico. Os sinais são recebidos numa placa de aquisição de dados (ver subcapítulo 3.4.8) e convertidos em sinais digitais. Na Figura 27 está uma representação esquemática da *NI* que representa o modo como os dados são adquiridos.



Figura 27 Esquema da *NI* representativo da lógica da aquisição de dados.

De modo a controlar, sincronizar e armazenar o registo de cada ensaio, foi desenvolvido um programa de aquisição na linguagem gráfica *LabView*.

Tendo como base o programa anteriormente desenvolvido (Filipe, 2010), foram criados dois programas distintos, sendo a escolha dependente da utilização ou não de extensómetros no sistema de aquisição. Na Figura 28 está exibido o interface criado para o programa de aquisição. Neste programa os valores de carga e deslocamento são representados gráfica e numericamente ao longo do tempo de ensaio, enquanto o registo de dados é feito num ficheiro para posterior tratamento em *Excel*.

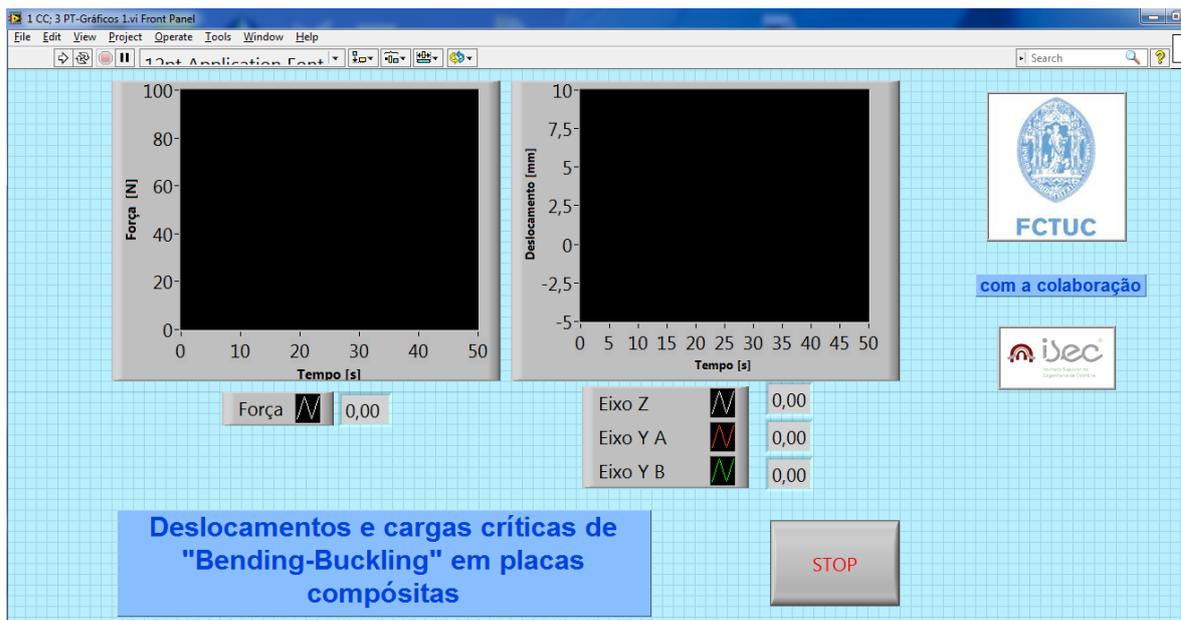


Figura 28 Interface do programa *LabView* criado.

A conexão dos terminais dos sensores utilizados é auxiliada pelo *DAQ Assistant*, que, conforme o tipo de sensor a utilizar devolve uma representação com as ligações a efetuar à placa de aquisição de dados (Figura 29).

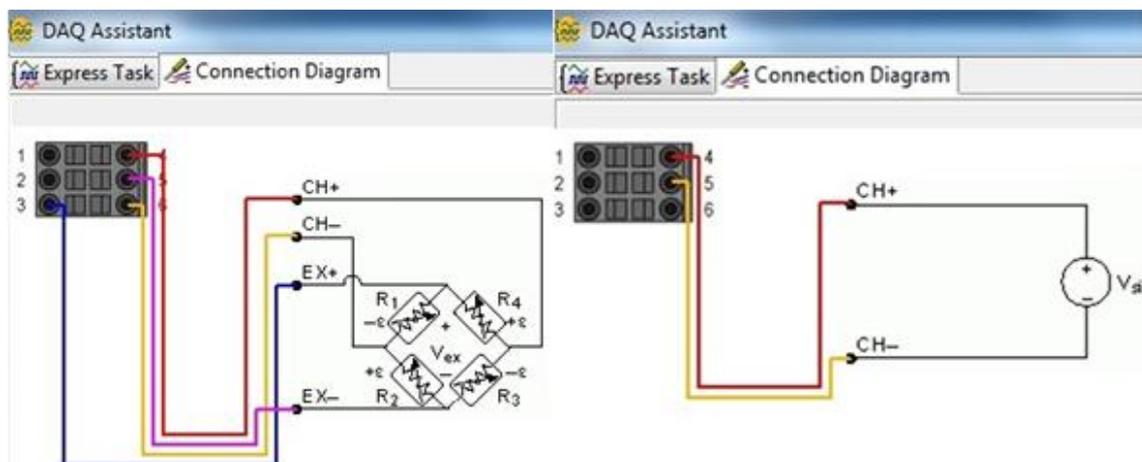


Figura 29 Conexões dos diferentes sensores à ficha da placa de aquisição.

No *DAQ Assistant* é necessário configurar as características dos sensores: sensibilidade, resistência interna dos extensómetros, valor de alimentação dos

potenciômetros e tipo de ponte utilizada nos sensores com extensômetros. Na Figura 30 está representado o painel do *DAQ Assistant* onde são introduzidos os dados.

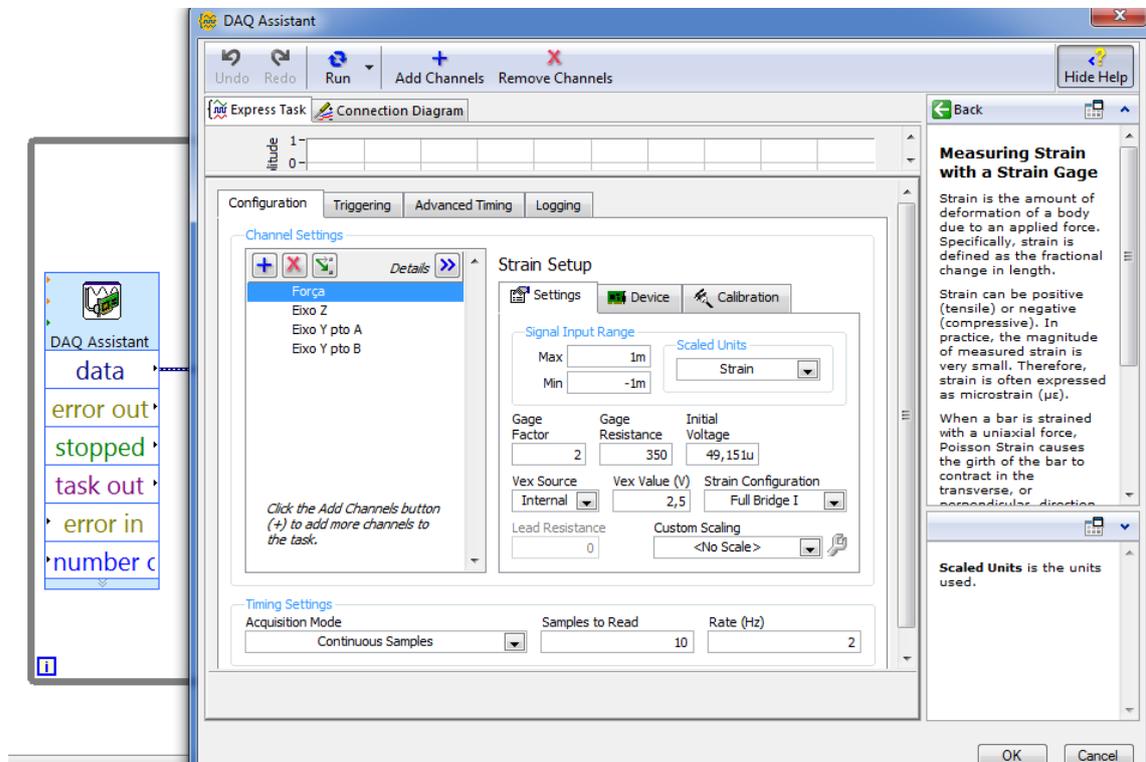


Figura 30 Painel do DAQ Assistant onde são configurados os sensores.

Antes de cada ensaio é necessário calibrar a célula de carga e os extensômetros. Deste modo, define-se o zero e ficam-se a conhecer os erros associados. Na Figura 31 está representada a calibração da célula de carga para um determinado ensaio.

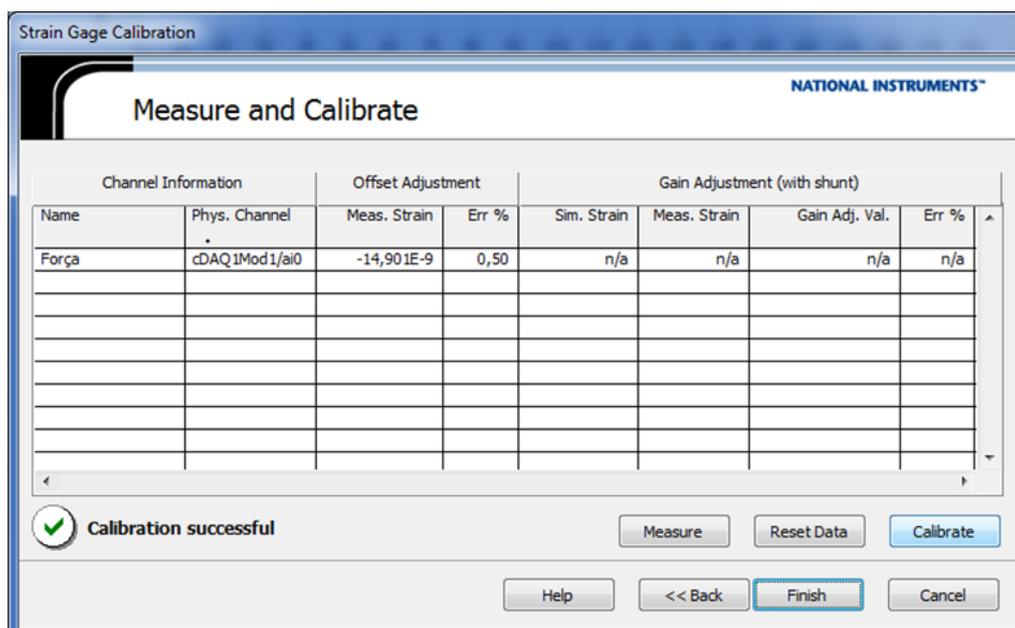


Figura 31 Calibração da célula de carga.

4.3.2. Programa Festo FluidSIM-P

De modo a implementar o circuito pneumático na bancada de ensaio surgiu a necessidade de criar um programa no *software Festo FluidSIM-P* (Figura 32). Este *software*, além de prever o modo de funcionamento do atuador pneumático, fornece as ligações necessárias, tanto elétricas como pneumáticas, para uma correta implementação do circuito.

Na Figura 32 está representado o interface do programa criado. Para o seu desenvolvimento seguiu-se a seguinte lógica: o ensaio inicia-se ao premir o botão *on/off*; o atuador pneumático recua até atingir o sensor *S1* (a posição deste sensor no atuador pneumático é definida pelo utilizador nos primeiros ensaios para o local onde, visualmente, se inicia o efeito de *bending buckling* no laminado); no instante que o sensor *S1* é ativado, devolve um sinal elétrico à válvula distribuidora de caudal, esta muda de posição e, conseqüentemente, o atuador pneumático avança até atingir o sensor *S2*; quando o atuador pneumático atinge *S2* o ensaio dá-se por terminado.

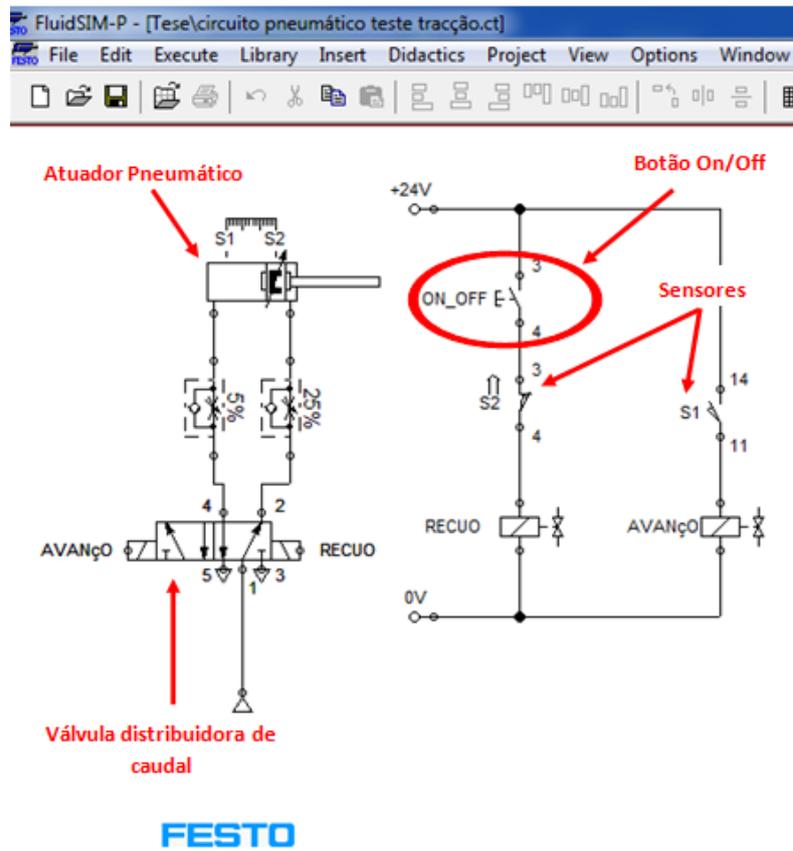


Figura 32 Interface do programa *FluidSIM* criado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Resultados

Como referido no subcapítulo 3.2, foram ensaiados laminados de materiais compósitos com diferentes composições. A aquisição dos deslocamentos e das cargas envolvidas em cada ensaio foram feitas em simultâneo, o que permitiu uma boa percepção dos fenómenos que ocorrem quando os laminados estão sujeitos a esforços de flexão.

Os resultados obtidos para cada laminado vão ser representados por gráficos de força-deslocamento. Foram realizados seis ensaios em cada laminado, dos quais se apresenta graficamente uma curva característica dos valores registados. Os resultados referentes ao deslocamento e carga crítica para os seis ensaios nos diferentes laminados estão disponíveis nos Anexos R e S.

Para cada um dos laminados existem dois gráficos, um deles representa os resultados das medições e o outro é uma ampliação na zona onde começam os deslocamentos na direção do eixo Y (ver Figura 13), ou seja, é a zona de carga crítica onde se inicia o efeito de *bending buckling*.

A partir do momento em que a carga é aplicada aos laminados estes apresentam valores de deslocamento linear segundo a direção do eixo Z do ponto A (ver Figura 13), o que permite calcular a velocidade de aplicação da carga. Como exemplo, deste deslocamento linear, no Gráfico 1 são apresentados os valores de deslocamento ao longo do tempo para os seis ensaios do laminado FV.1. O desfasamento entre os vários ensaios deve-se ao maior ou menor intervalo de tempo para o início do ensaio.

É de salientar que a velocidade de aplicação da carga não é igual para todos os laminados, dado que quando se aplica uma carga superior a velocidade de recuo do cilindro é menor. Na Tabela 3 estão representados os valores de velocidade de carga para cada laminado. O valor apresentado é resultado da média da velocidade medida nos seis ensaios.

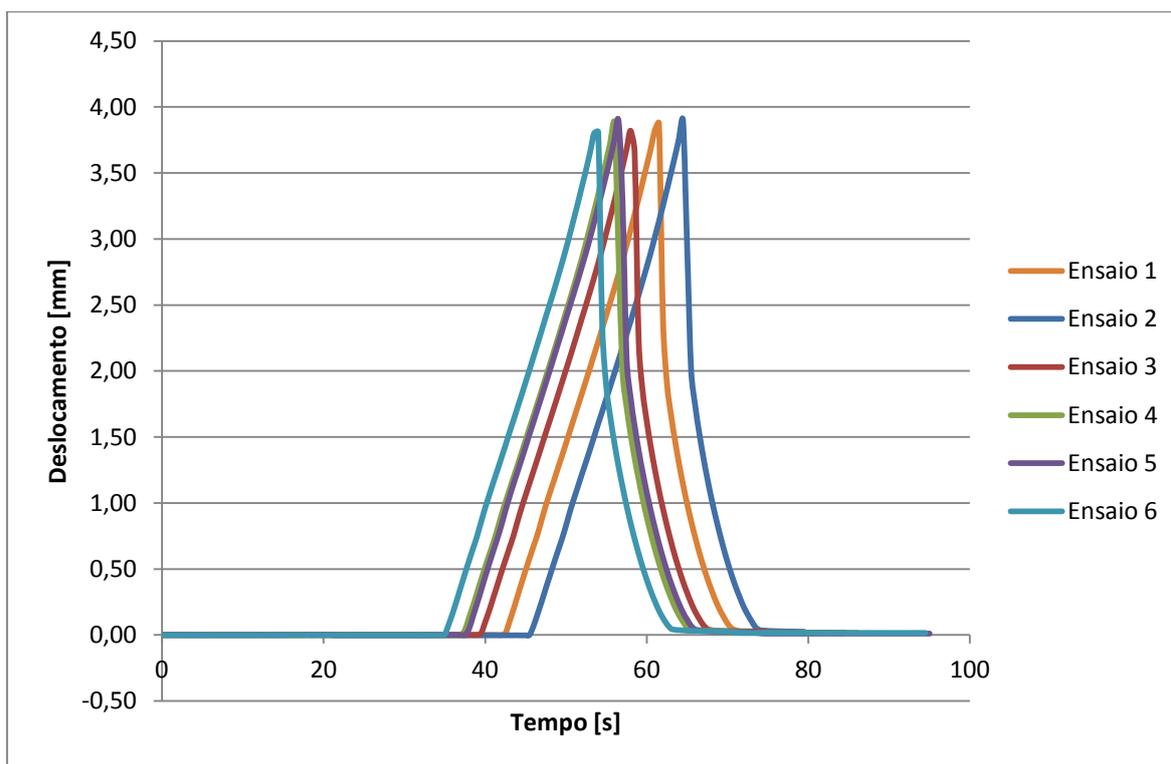


Gráfico 1 Deslocamento ao longo do tempo para os ensaios do laminado FV.1.

Tabela 3 Velocidade de aplicação de carga para os laminados ensaiados.

	FV.1	FV.2	FV.3	FC
Velocidade de aplicação de carga [mm/s]	0,20	0,12	0,15	0,12

5.1.1. Laminado FV.1

Os resultados obtidos para o laminado FV.1 apresentam-se nos Gráficos 2 e 3. É possível observar a linearidade dos deslocamentos na direção do eixo Z. Os valores de carga máxima foram de aproximadamente 45N, o que se refletiu num deslocamento vertical aproximado de 4 mm e horizontal de 2mm. Uma análise aos gráficos apresentados, em conjunto com os dados de suporte, mostram que os deslocamentos transversais se iniciam no ponto A quando a sollicitação atinge os 20N, sendo possível afirmar que esta é a carga de início do efeito de *bending-buckling*.

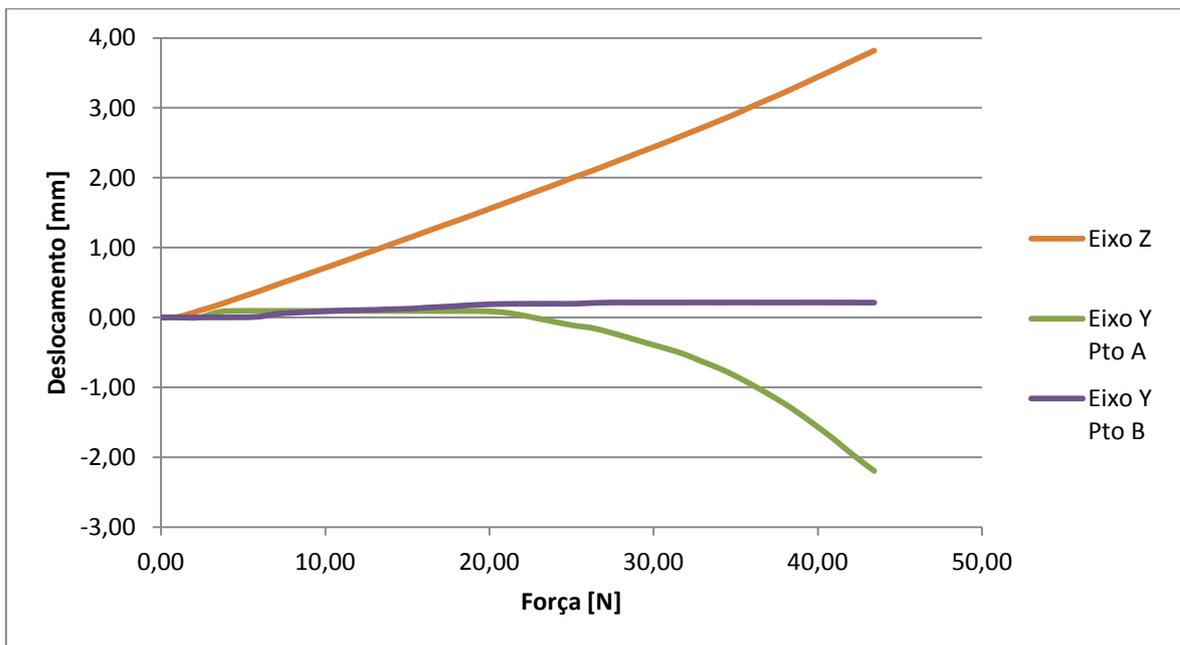


Gráfico 2 Curvas características de carga-deslocamento para o laminado FV.1.

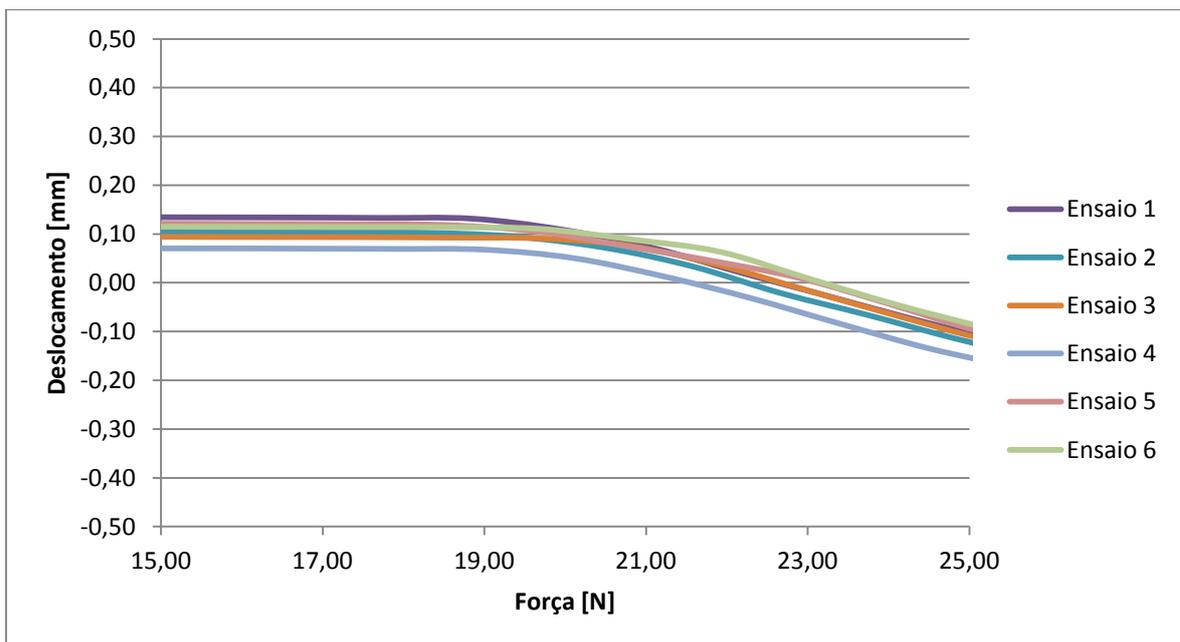


Gráfico 3 Ampliação dos deslocamentos no ponto A, segundo a direção do eixo Y, para a zona de carga crítica do laminado FV.1.

5.1.2. Laminado FV.2

No laminado FV.2 foram colocados quatro extensómetros ao longo da linha neutra (Figura 33 nos pontos C,D,E e F). Para este laminado vão ser apresentados quatro gráficos. Nos Gráficos 4 e 5 apresentam-se os resultados relativamente às medições efetuadas nos sensores de deslocamento linear (Figura 33 pontos A e B). Nos Gráficos 6 e 7 demonstram-se as deformações medidas nos extensómetros.

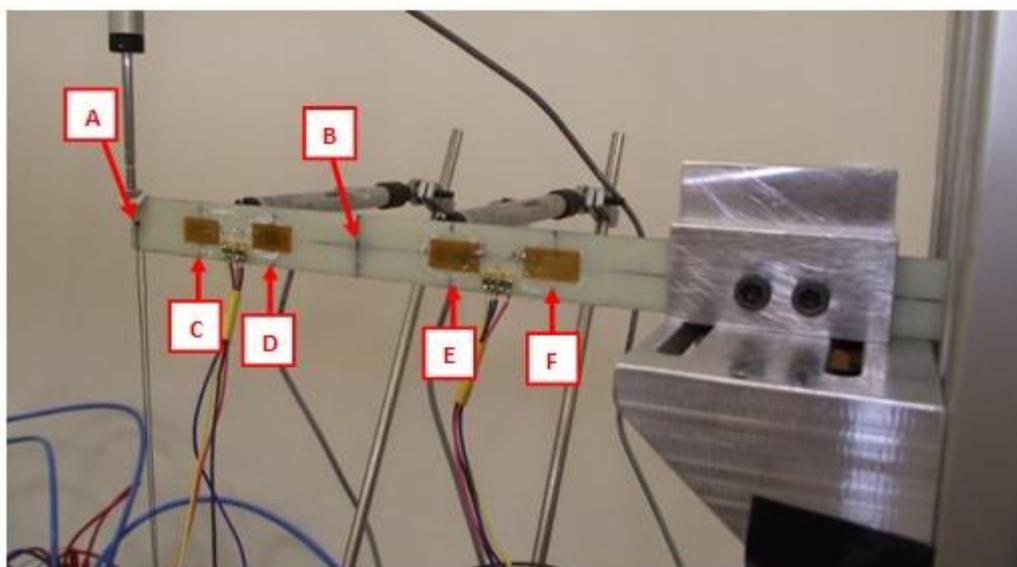


Figura 33 Local de aplicação dos extensómetros e sensores de deslocamento linear no laminado FV.2.

Os valores de carga máxima nos ensaios do laminado FV.3 foram de aproximadamente 45N, o que provocou um deslocamento vertical aproximado de 4mm e horizontal de 5mm no ponto A (Gráfico 4). Uma análise detalhada aos Gráfico 4 e 5, juntamente com os seus dados de suporte, permitem concluir que os deslocamentos transversais se iniciam para valores de carga próximos dos 20N no ponto A, sendo portanto este o valor da carga crítica. É ainda possível constatar que surge deslocamento horizontal no ponto B para valores de carga de aproximadamente 30N.

Nos Gráficos 6 e 7 são apresentadas as curvas características da deformação medida com os extensómetros nos pontos considerados.

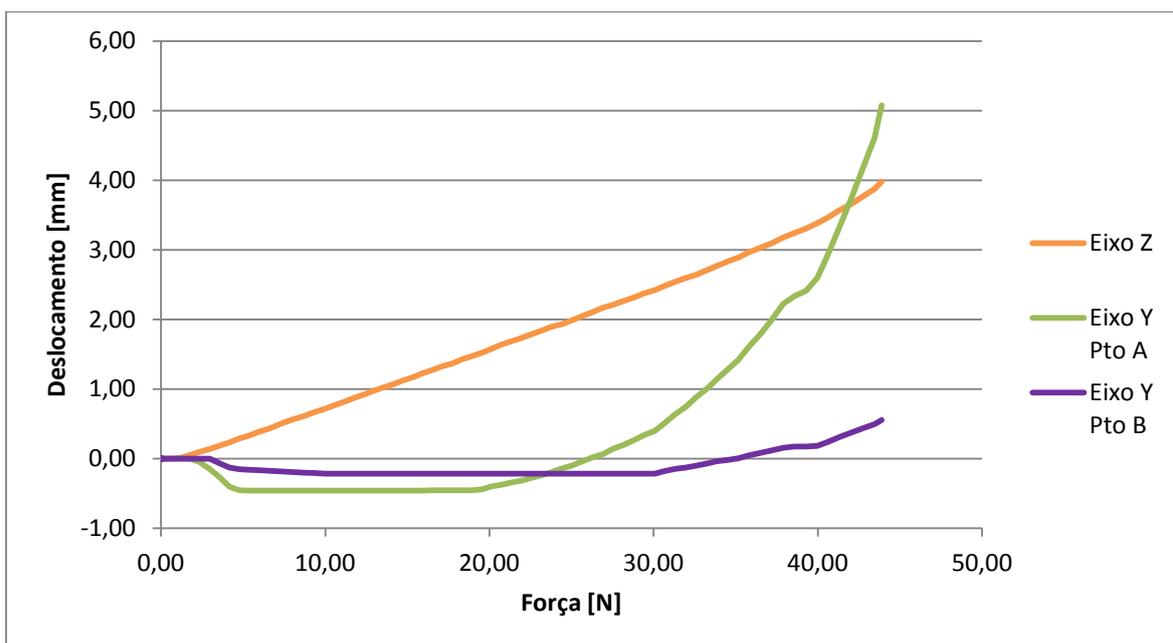


Gráfico 4 Curvas características de carga-deslocamento para o laminado FV.2.

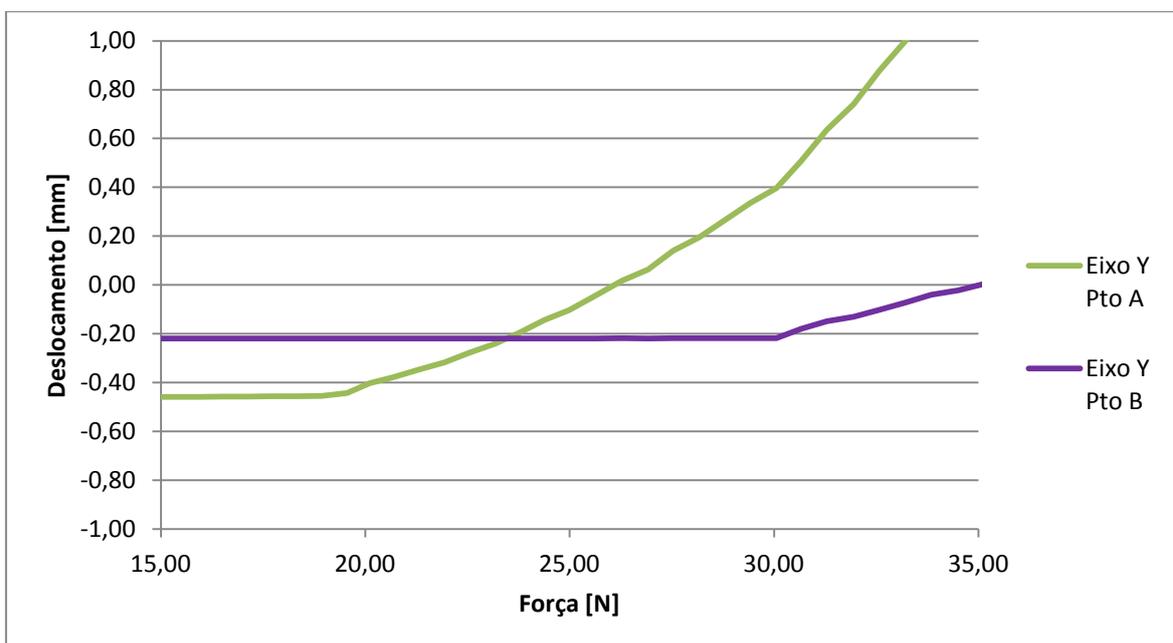


Gráfico 5 Ampliação do Gráfico 4 na zona de carga crítica

Pela análise do Gráfico 6, juntamente com os seus dados de suporte, verifica-se que a deformação nos extensómetros se inicia por volta dos 20N, sendo mais acentuada a partir dos 30N aproximadamente. Pode-se afirmar que os extensómetros refletem o comportamento do laminado registado nos Gráficos 4 e 5.

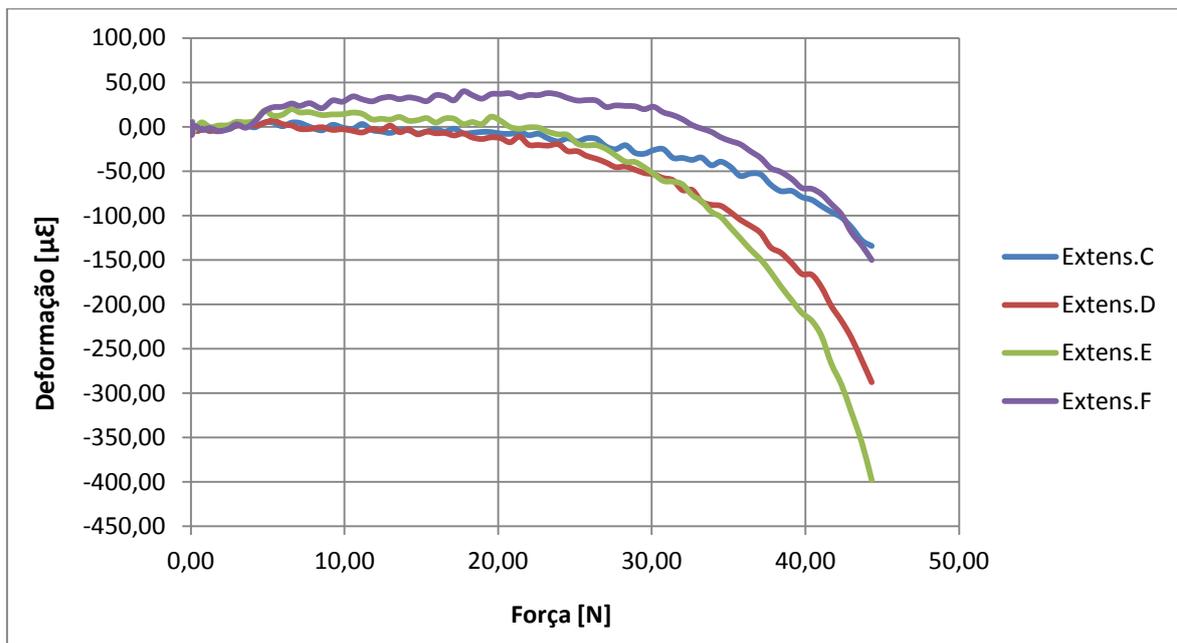


Gráfico 6 Curvas características da deformação para o laminado FV.2.

De modo a melhor compreender o comportamento dos extensómetros com a aplicação da carga foi construído o Gráfico 7. Para tal foram utilizados valores de um ensaio representativo do comportamento do laminado. Neste caso os dados são referentes ao ensaio número um. Neste gráfico é possível verificar o comportamento dos extensómetros com a carga aplicada.

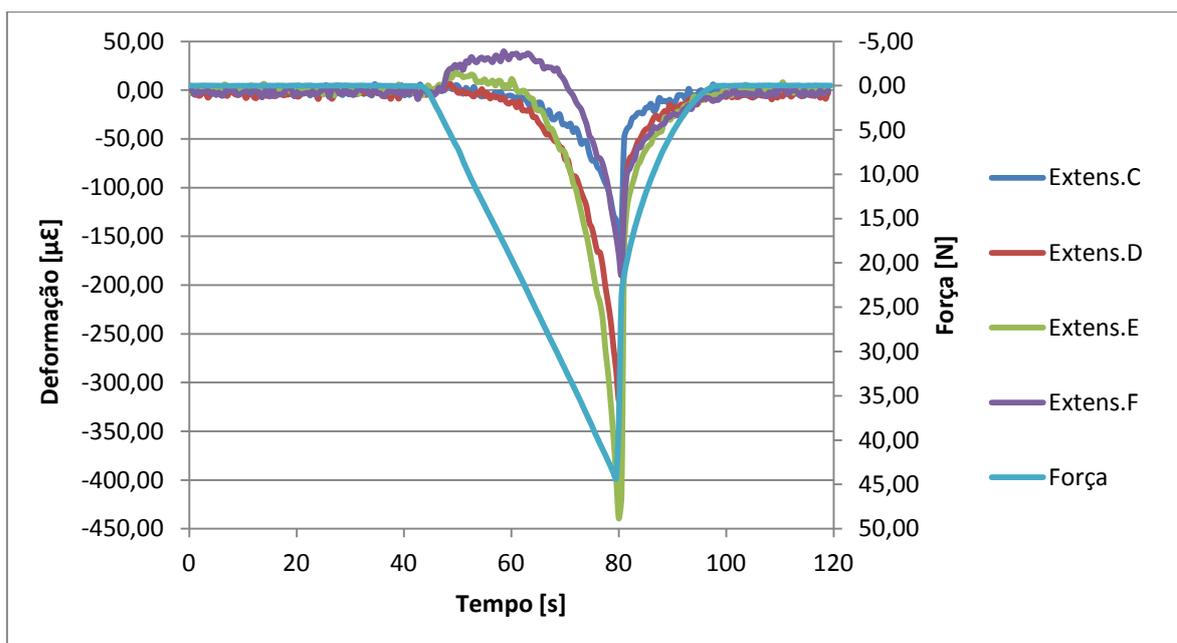


Gráfico 7 Deformação e carga ao longo do tempo no ensaio um do laminado FV.2.

5.1.3. Laminado FV.3

Os resultados obtidos para o laminado FV.3 apresentam-se nos Gráfico 8 e 9. Para este laminado os valores de carga máxima foram de aproximadamente 375N, o que se refletiu num deslocamento vertical aproximado de 26 mm e horizontal de 7mm. Da análise aos Gráficos 8 e 9, juntamente com os seus dados de suporte, constata-se que os deslocamentos na direção do eixo Y se iniciam para valores de carga próximos dos 219N. O deslocamento vertical no ponto A, para o início da encurvadura, é por volta dos 14mm.

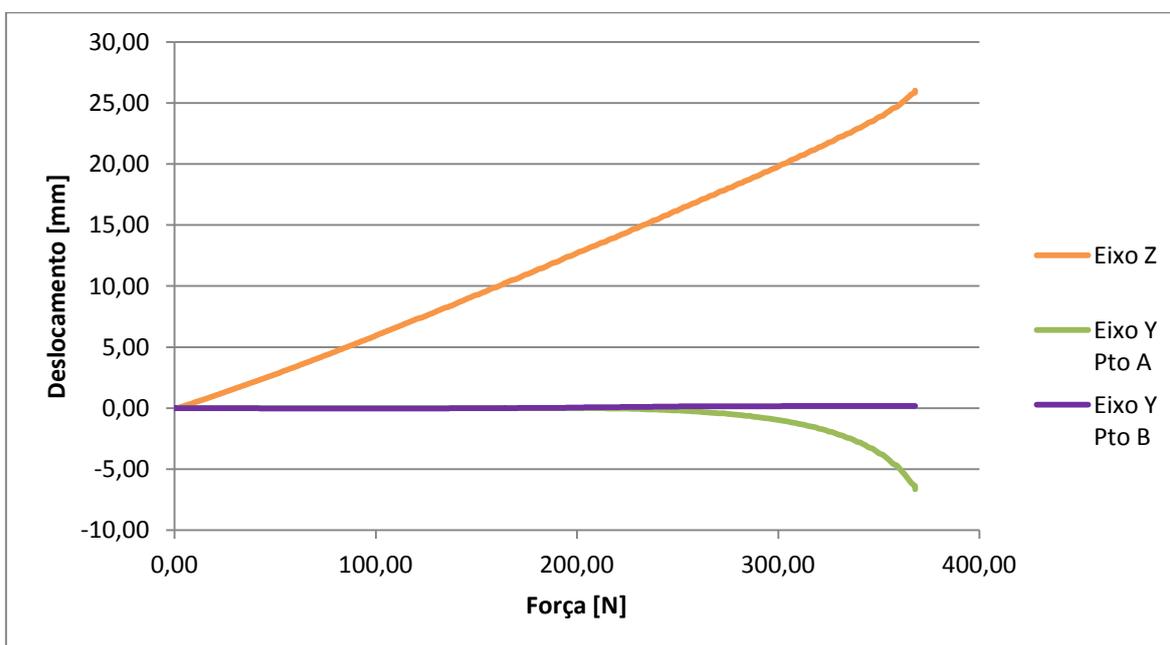


Gráfico 8 Curvas características de carga-deslocamento para o laminado FV.3.

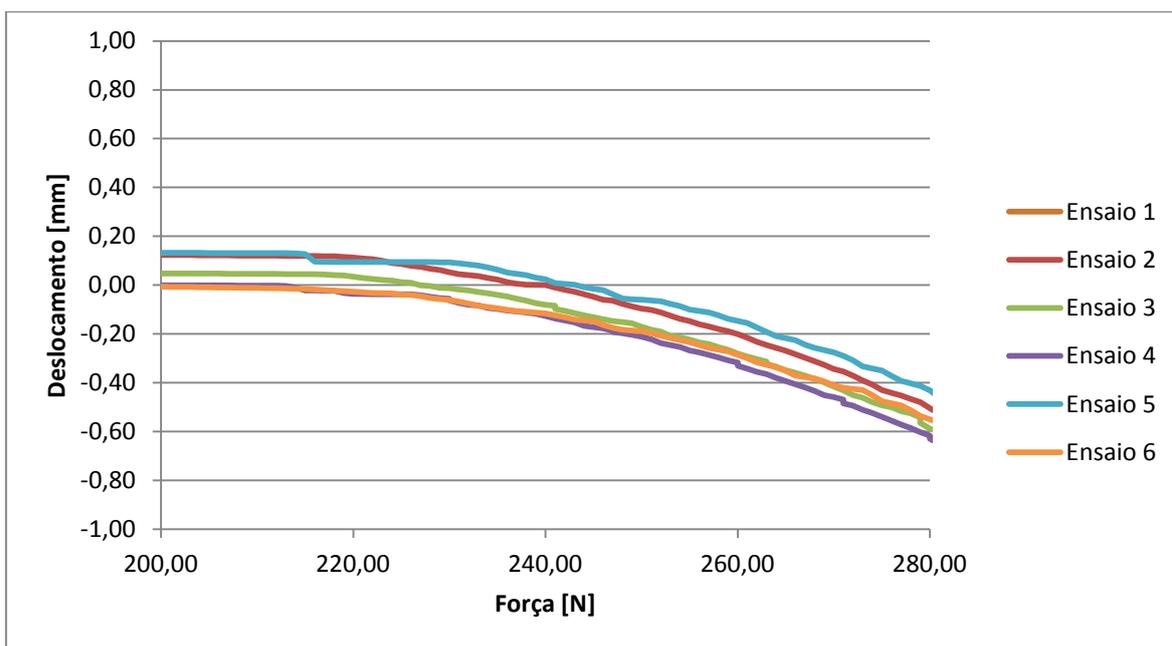


Gráfico 9 Ampliação dos deslocamentos no ponto A, segundo a direção do eixo Y, para a zona de carga crítica do laminado FV.3.

5.1.4. Laminado FC

Nos Gráfico 10 e 11 apresentam-se os resultados referentes ao laminado FC. Os valores de carga máxima foram de aproximadamente 120N, o que se traduziu num deslocamento vertical de aproximadamente 6mm e horizontal de 11mm. Da análise aos gráficos apresentados, juntamente com os seus dados de suporte, constata-se que o deslocamento na direção do eixo Y surge para valores próximos dos 48N e 100N, para os pontos A e B respetivamente.

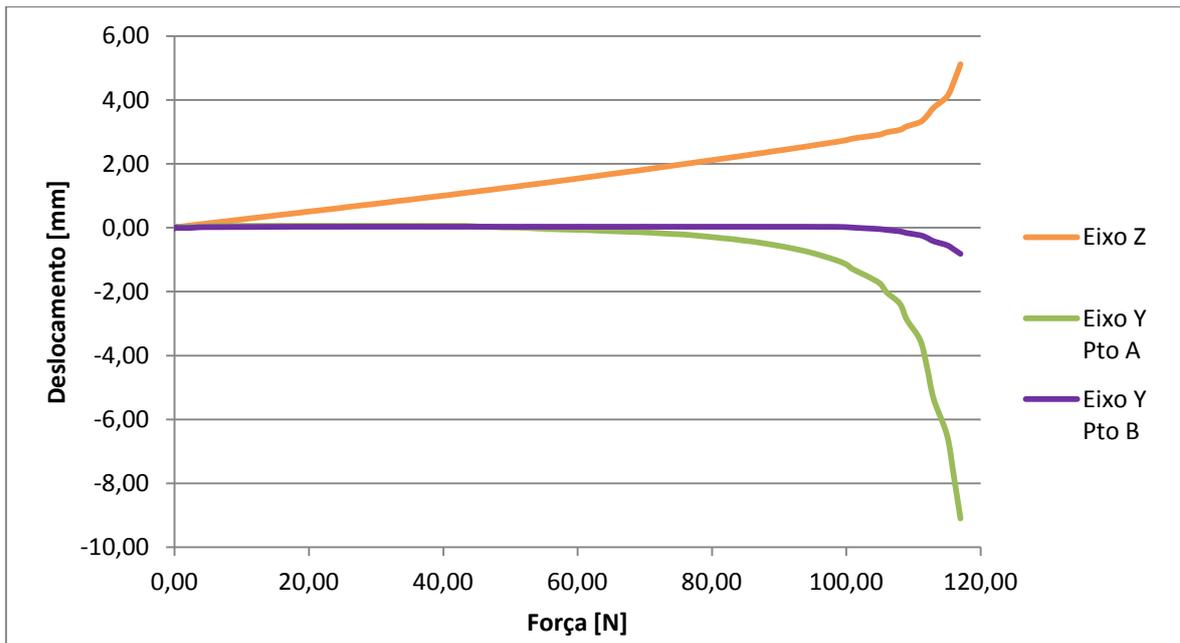


Gráfico 10 Valores de Carga-Deslocamento para o laminado FC.

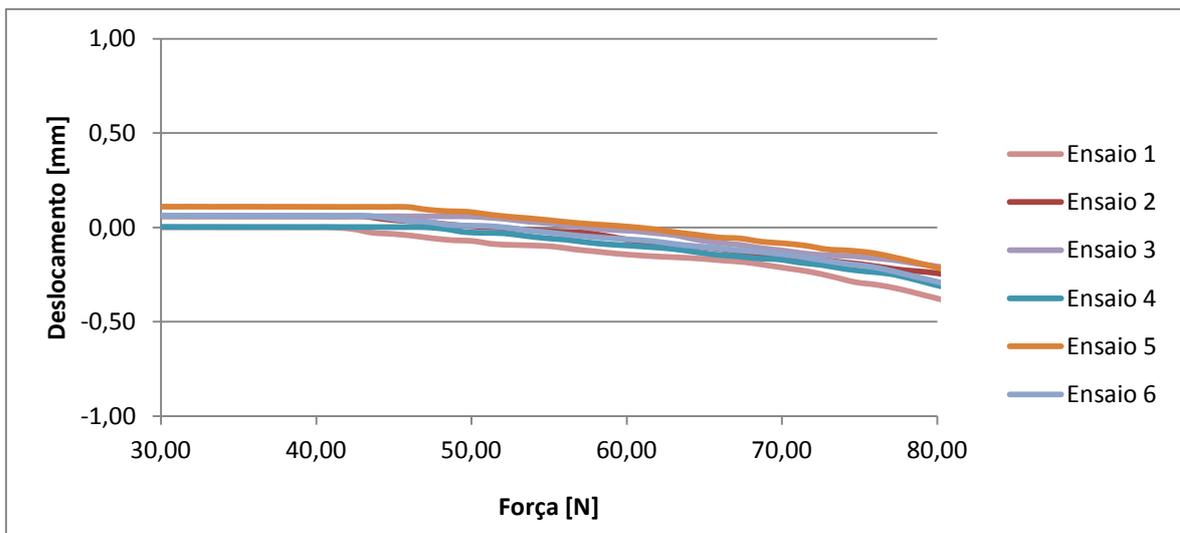


Gráfico 11 Ampliação dos deslocamentos no ponto A, segundo a direção do eixo Y, para a zona de carga crítica do laminado FC.

5.1.5. Comportamento dos laminados

Como verificado pelos resultados apresentados graficamente, os laminados apresentam diferentes valores de carga crítica e, conseqüentemente, diferente comportamento.

Através da análise dos dados de suporte, para os diferentes laminados, verifica-se que o laminado FV.3 é o que apresenta um maior valor de deslocamento vertical antes de se dar início à encurvadura (aproximadamente 14mm) (Figura 34). Os valores de deslocamento vertical referentes aos vários laminados apresentam-se na Tabela 4.

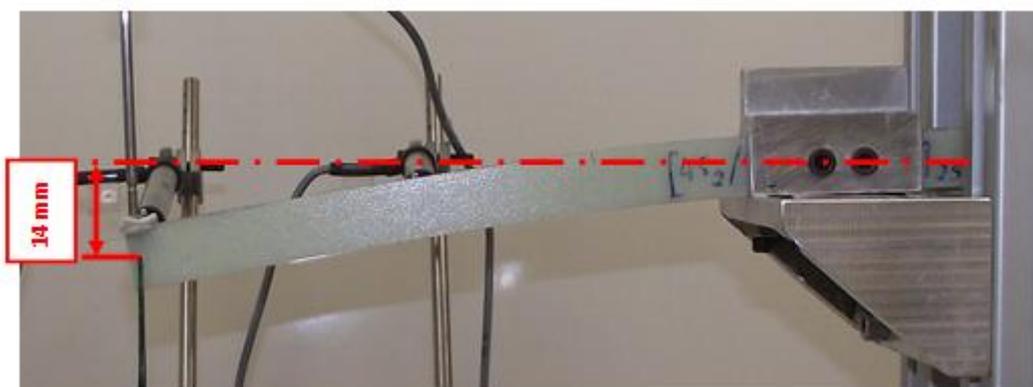


Figura 34 Deslocamento vertical para o início da encurvadura, laminado FV.3.

Tabela 4 Deslocamento vertical médio na extremidade livre antes do início da encurvadura.

	FV.1	FV.2	FV.3	FC
Deslocamento vertical [mm]	1,60	1,54	13,94	1,21

No Gráfico 12 representa-se o comportamento transversal dos vários laminados. Este Gráfico foi construído considerando as forças envolvidas para um deslocamento horizontal no ponto A de 2mm. É possível constatar que o laminado FV.2 é o único a encurvar segundo a direção positiva do eixo Y (ver Figura 13).

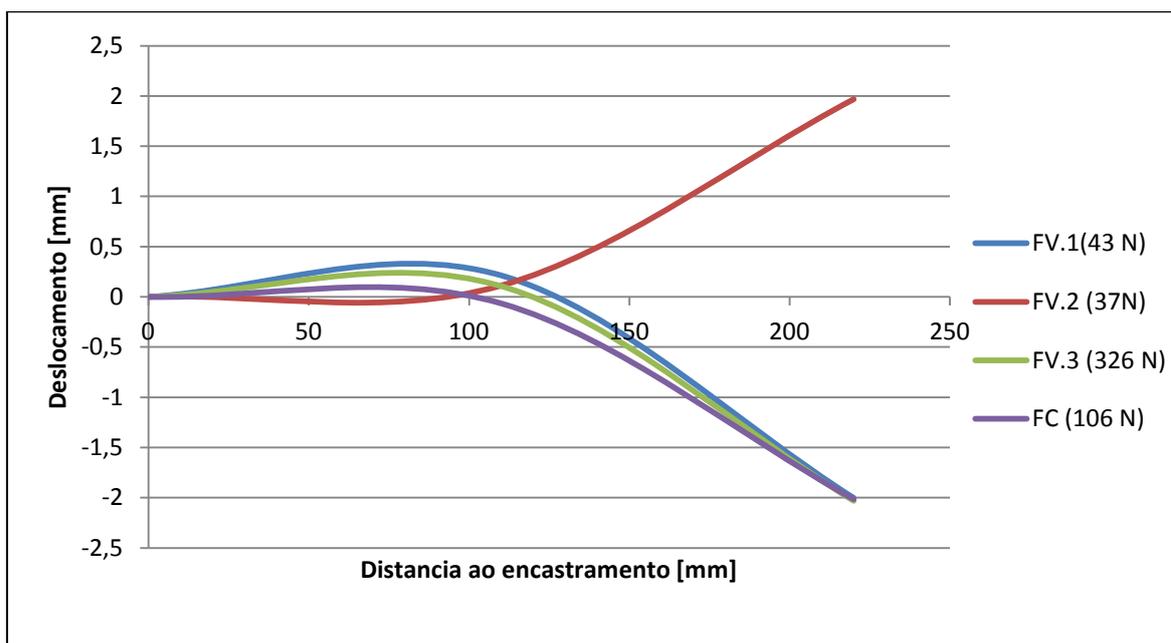


Gráfico 12 Comportamento dos laminados.

5.2. Discussão dos resultados

Da análise dos gráficos dos deslocamentos dos laminados constata-se que ocorre deslocamento na direção do eixo Y em todos eles. Este deslocamento surge a partir de um determinado valor de carga (carga crítica), verificando-se um aumento do mesmo, o que identifica o efeito de *bending buckling*.

Através da análise dos gráficos é possível verificar que ocorrem deslocamentos transversais positivos e negativos, o que significa que o alinhamento da placa foi bem conseguido. Nomeadamente no Gráfico 12, onde zero representa encastramento e 220 mm a extremidade livre onde é aplicada a carga, constata-se que o laminado FV.2 sofre deslocamento positivo segundo o eixo Y, enquanto em todos os outros o deslocamento é negativo. Os laminados FV.1, FV.3 e FC, encurvam no mesmo sentido (eixo Y negativo), no entanto, verifica-se que para o mesmo deslocamento na extremidade livre (cerca de 2mm) apresentam valores de deslocamento no ponto B (a 110mm do encastramento) diferentes.

A análise dos Gráficos 2; 4; 8 e 10, juntamente com os seus dados de suporte, permitiu a construção da Tabela 5, onde se representa o valor da carga para o qual se inicia

o deslocamento transversal. Estes valores são resultado da média dos valores de início de deslocamento segundo Y para os seis ensaios de cada laminado.

No presente trabalho considera-se que o efeito de *bending buckling* se inicia a partir do momento que se verificam deslocamentos segundo a direção do eixo Y. Portanto, os valores apresentados na Tabela 5 referem-se à carga crítica de *bending buckling* para os laminados ensaiados.

Tabela 5 Valores de carga crítica para os laminados ensaiados.

	FV.1	FV.2	FV.3	FC
Carga Crítica [N]	20,47	19,67	218,67	47,99

Fazendo uma análise aos resultados apresentados na Tabela 5 verifica-se que os laminados FV.1 e FV.2 apresentam valores de carga crítica diferente, apesar de serem feitos do mesmo material e terem as mesmas dimensões (ver Tabela 2), o que significa que a orientação das fibras e a sequência de empilhamento têm influência na carga crítica. No laminado FC, que tem as mesmas dimensões dos laminados FV.1 e FV.2, constata-se que a carga crítica é superior, o que é previsível visto ser composto por fibras de carbono (tem melhores propriedades mecânicas relativamente às fibras de vidro). O laminado FV.3 tem uma carga crítica bastante superior a todos os outros, o que é expectável visto ter o dobro das camadas.

Através da análise dos gráficos é visível que o deslocamento segundo a direção do eixo Y por vezes se inicia assim que a carga é aplicada, mantendo-se de seguida estável até um determinado valor. A partir da carga crítica o deslocamento cresce abruptamente. Este deslocamento inicial deve-se a um possível desalinhamento vertical entre a extremidade do laminado. A partir do momento em que a carga começa a ser aplicada este alinhamento é conseguido. Este efeito é visível principalmente no Gráfico 4.

Da análise dos resultados referentes aos extensómetros, Gráficos 6 e 7, constata-se que os extensómetros refletem o que acontece nos Gráficos 4 e 5 referentes aos deslocamentos.

Fazendo uma análise mais cuidada relativamente aos Gráficos 6 e 7, referentes ao laminado FV.2, verifica-se que a deformação nos extensómetros se inicia por volta dos 20 N, o que se confirma no gráfico 4 (deslocamentos). A deformação acentua-se por volta dos 30N, o que é explicado através do início do deslocamento Y no ponto B. A deformação medida é negativa, isto significa que os extensómetros são sujeitos à compressão. Este valor negativo de deformação é o esperado tendo em conta o posicionamento dos extensómetros (ver Figura 13), o que vem confirmar que o deslocamento ocorre segundo a direção positiva do eixo Y (ver Gráfico 12). O valor positivo inicial surge devido ao possível desalinhamento inicial referido anteriormente, este valor é visível principalmente no extensómetro *F* (ver Figura 13), o que é previsível visto este ser o local mais próximo do encastramento.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização deste trabalho pode-se considerar que os objetivos propostos inicialmente foram conseguidos.

Foi possível sujeitar os laminados ensaiados ao efeito conjugado de *bending-buckling*. Tanto o desenvolvimento da montagem experimental como o sistema de aquisição de dados também foram bem conseguidos, dado que se conseguiram resultados muito semelhantes nos vários ensaios realizados, o que significa que se conseguiu reduzir o número de variáveis desconhecidas. O equipamento desenvolvido é bastante versátil, permitindo realizar ensaios para materiais de diferentes tipos e dimensões.

Apesar de se ter conseguido provocar o efeito desejado houve várias dificuldades. A principal foi claramente conseguir o alinhamento perfeito de toda a estrutura. Apesar das peças terem sido maquinadas de modo a garantir a sua perpendicularidade, basta um pequeno desvio (vertical) da extremidade do laminado em relação ao centro da roldana para se obterem resultados diferentes. Prova disso mesmo é o deslocamento inicial segundo a direção do eixo Y, bem visível em alguns gráficos, que é registado logo no início da aplicação da carga.

Em termos teóricos, não existe um critério definido que considere o início do efeito de *bending-buckling*. Na análise de resultados foi adotado que este fenómeno ocorre assim que se inicia o deslocamento segundo a direção do eixo Y.

Relativamente aos ensaios realizados foi possível retirar as seguintes conclusões:

- O deslocamento segundo a direção do eixo Z varia linearmente com a aplicação da carga;
- Os deslocamentos transversais, segundo Y, ocorrem sempre primeiro na extremidade livre do laminado, sendo que só para valores de carga superiores ocorrem deslocamentos no meio do laminado (Ponto B);

- O laminado FV.2 sofre um deslocamento na direção positiva do eixo Y, nos restantes laminados o deslocamento segundo Y é na direção contrária, o que significa que o alinhamento foi conseguido;
- Laminados feitos do mesmo material e com as mesmas dimensões têm valores de carga crítica e deslocamentos diferentes, o que significa que a orientação das fibras e a sequência de empilhamento são elementos preponderantes no comportamento destes materiais;
- O laminado FV.3 apresenta valores de carga crítica (219N de média) muito superiores aos restantes, o que significa que além da orientação das fibras, o número de camadas do laminado tem uma influência significativa (este laminado tem 32 camadas e os restantes têm 16);
- O laminado FC apresenta valores de carga crítica superiores aos laminados FV.1 e FV.2, apesar de ter as mesmas dimensões, o que significa que as propriedades das fibras que constituem o laminado influenciam o seu comportamento.
- Os resultados obtidos pelos extensómetros no laminado FV.2 refletem o comportamento do mesmo. A deformação negativa registada significa que o laminado encurvou segundo a direção positiva do eixo Y (demonstrado no Gráfico 12).

Em relação a trabalhos futuros sugere-se principalmente uma alteração no sistema de medição dos deslocamentos. A implementação de um mecanismo de medição horizontal (eixo Y) que acompanhasse o deslocamento vertical (eixo Z) poderia ser benéfica. Os valores obtidos para os deslocamentos segundo o eixo Y podem conter algum erro, isto porque o sensor que os mede, quando o laminado é solicitado, acompanha o deslocamento vertical no ponto A, podendo deste modo sofrer pequenas variações sem que na realidade exista deslocamento transversal.

Por fim, é de referir que este trabalho foi uma experiência enriquecedora, dado que para a sua elaboração foi necessário aprofundar várias áreas de conhecimento, tanto teórico como prático.

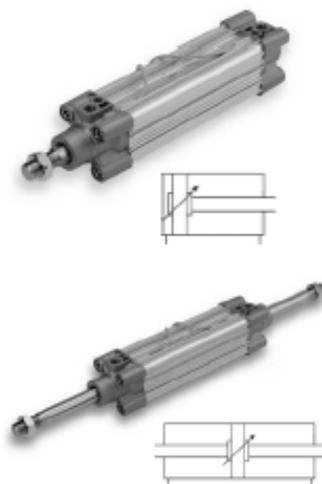
BIBLIOGRAFIA

- Askeland, D. R. (1998). *The Science and Engineering of Materials*, 3rd ed. PWS Publishing Company.
- Belbute, P. M. (Outubro de 2010). Estudo do Comportamento em Flexão de Vigas Compósitas Sandwich. *Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeroespacial*. Lisboa: IST.
- Berthelot, J. M. (1998). *Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis*. New York: Springer - Verlag New York Inc.
- Daniel, G. P. (Julho de 2011). Avaliação pelo Método dos Elementos Finitos das Cargas Críticas de “Bending-Buckling”. *Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente*. Coimbra FCTUC.
- Daniel, I. M., Ishai, O. (1994). *Engineering Mechanics of Composite Material*. New York: Oxford University Press.
- de Moura, M. F., Morais, A. B. , Magalhães, A. G. (2005). *Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Porto: Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.
- Den Hartog, J. P. (1952). Twist–bend buckling of beams. In *Advanced Strength of Materials*. (pp. 283-291). New York: McGraw-Hill.
- Durão, L. M. P., Gonçalves, D. J. S., de Albuquerque, V.H.C., Tavares, J. M. R. S. (2010). *Avaliação da delaminação após furação em compósitos laminados*. Porto: FEUP.
- Eurocopter, 2004. Technology Breakthrough- *Eurocopter produces the worldwide first all-composite airplane door in one piece*. Press Release. Acedido a 15 de Junho de 2012, em: <http://www.eurocopter.com/site/en/press>.
- Filipe, B. T. (Julho de 2011). Avaliação experimental das cargas críticas de “Bending-Buckling”. *Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Sistemas de Produção*. Coimbra: FCTUC.
- Griffith, A. A. (1921). *Philosophical transactions of the royal society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, Volume 221: 163-198*.

- Kaw, A. K. (1997). *Mechanics of Composite Materials*. New York: CRC Press LLC.
- Marques, A. T. (2012). *Materiais Compósitos: um desafio permanente*. Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial. Acedido a 12 de Junho de 2012, em: <http://www.spmateriais.pt/INEGI.htm>.
- Roseiro, L. M. (2004). *Detecção do Dano e Idêntificação Estrutural com Redes Neurais Artificiais*. Coimbra: FCTUC.
- Smith, W. F. (1998). *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*. Lisboa: Mc.Graw-Hill de Portugal Lda.
- SPhandbook, 2010. *Composite Engineering Materials – Composite Materials Handbook*. Acedido em 12 de Junho de 2012, em: <http://www.bolton.ac.uk/CODATE/Downloads.aspx>.

ANEXO A

Series CP96



Minimum Stroke for Auto Switch Mounting

Refer to page 14 for "Minimum Stroke for Auto Switch Mounting".

Specifications

Bore size (mm)	32	40	50	63	80	100	125
Action	Double acting						
Fluid	Air						
Proof pressure	1.5 MPa						
Max. operating pressure	1.0 MPa						
Min. operating pressure	0.05 MPa						
Ambient and fluid temperature	Without auto switch: -20 to 70°C With auto switch: -10 to 60°C						
Lubrication	Not required (Non-lube)						
Operating piston speed	50 to 1000 mm/s						50 to 700 mm/s
Allowable stroke tolerance	Up to 250 st: $^{+0.0}_{-0}$; 251 to 1000 st: $^{+0.4}_{-0}$; 1001 to 1500 st: $^{+1.0}_{-0}$; 1501 to 2000 st: $^{+2.0}_{-0}$						
Cushion	Both ends (Air cushion)						
Port size	G 1/8	G 1/4	G 1/4	G 3/8	G 3/8	G 1/2	G 1/2
Mounting	Basic, Axial foot, Rod end flange, Head end flange, Single clevis, Double clevis, Center trunnion						

Standard Stroke

Bore size (mm)	Standard stroke (mm)	Max. * stroke
32	25, 50, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500	2000
40	25, 50, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500	2000
50	25, 50, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 600	2000
63	25, 50, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 600	2000
80	25, 50, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 600, 700, 800	2000
100	25, 50, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 600, 700, 800	2000
125	—	2000

Intermediate strokes are available.

* Please consult with SMC for longer strokes.

Accessories

Mounting		Basic	Foot	Rod end flange	Head end flange	Single clevis	Double clevis	Center trunnion
Standard	Rod end nut	●	●	●	●	●	●	●
	Clevis pin	—	—	—	—	—	●	—
Option	Piston rod ball joint	●	●	●	●	●	●	●
	Rod clevis	●	●	●	●	●	●	●
	Rod boot	●	●	●	●	●	●	●

* Please do not use a piston rod ball joint (or floating joint) together with a head end clevis with a ball joint (or angled head end clevis with a ball joint).

Figura 35 Ficha técnica referente ao atuador pneumático utilizado.

ANEXO B

		Dehnungsmessstreifen Strain gages Jauges d'extensométrie		Bestellnummer Order No. No. de référence	1-LY11-10/120 
Widerstand Resistance Résistance	120 Ω $\pm 0,35$ %			Typ Type Type	10/120 LY11 
k-Faktor Gage factor Facteur k	2,08 $\pm 1,0$ %			Stückzahl Contents Quantité	10 
Querempfindlichkeit Transverse sensitivity Sensibilité transverse	-0,3 %			Temperaturkoeffizient des k-Faktors Temperature coefficient of gage factor Coefficient de température du facteur k	93 ± 10 [10^{-6} / $^{\circ}\text{C}$] (-10 $^{\circ}\text{C}$... +45 $^{\circ}\text{C}$)
Temperaturkompensation: Angepasst für Temperature compensation: Compensated for Compensation de température: Compensation pour		Ferrilischen Stahl mit steel with acier avec		Folienlos Lot Lot de la feuille	A406/26 
				Herstellungslot Batch Lot de fabrication	812051095 
				$\alpha = 10,8$ [10^{-6} / $^{\circ}\text{C}$]	

Daten / Data / Données

Figura 36 Características técnicas dos extensómetros utilizados.

ANEXO C

Data Sheet: TSTM.214.R3



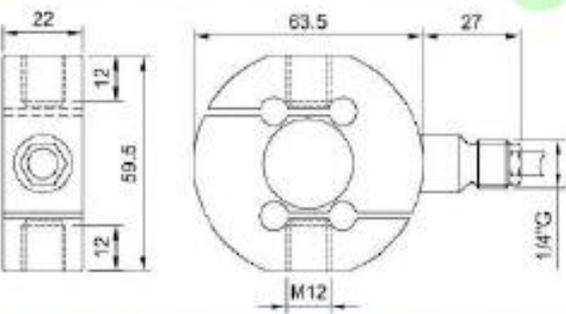
TSTM

Dinamometro
Dynamometer

Dimensioni *Dimensions* [mm]



COMPRESIONE
TRAZIONE
COMPRESSION
TENSION




Norma di riferimento
ISO 376
Reference standard

Stabilità a lungo termine
Long term high stability

Download on www.tstm.it
CE RoHS

Dati Tecnici *Technical Data*



Classe di precisione: ISO 376	Accuracy class: ISO 376	00	0,5	1
CARICO NOMINALE	NOMINAL LOAD	0,5 - 1 - 2 - 3 - 5 kN		
ERRORI RELATIVI (al valore letto)	RELATIVE ERROR (at reading)			
a) ripetibilità 0°-120°-240°(b')	a) repeatability 0°-120°-240°(b')	≤ ± 0.050% ⁽¹⁾	≤ ± 0.090% ⁽¹⁾	≤ ± 0.155% ⁽¹⁾
b) interpolazione (fc)	b) interpolation (fc)	≤ ± 0.020% ⁽¹⁾	≤ ± 0.040% ⁽¹⁾	≤ ± 0.060% ⁽¹⁾
c) reversibilità (u)	c) reversibility (u)	≤ ± 0.070% ⁽¹⁾	≤ ± 0.100% ⁽¹⁾	≤ ± 0.200% ⁽¹⁾
d) zero (fo)	d) zero (fo)	≤ ± 0.010% F.S.	≤ ± 0.025% F.S.	≤ ± 0.025% F.S.
LINEARITA'	LINEARITY		≤ ± 0.02% F.S.	
ISTERESI	HYSTERESIS		≤ ± 0.025% F.S.	
EFFETTO DELLA TEMPERATURA (10°C)	TEMPERATURE EFFECT (10°C)			
a) sullo zero	a) on zero		≤ ± 0.025% F.S.	
b) sulla sensibilità	b) on sensitivity		≤ ± 0.025% F.S.	
SENSIBILITA' NOMINALE	NOMINAL SENSITIVITY		2m V/V	
TOLLERANZA DI CALIBRAZIONE	SENSITIVITY TOLERANCE		≤ ± 0.1% F.S.	
RESISTENZA DI INGRESSO	INPUT RESISTANCE		350 ± 2Ω	
RESISTENZA DI USCITA	OUTPUT RESISTANCE		352 ± 2Ω	
RESISTENZA DI ISOLAMENTO	INSULATION RESISTANCE		>5 GΩ	
BILANCIAMENTO DI ZERO	ZERO BALANCE		≤ ± 1% F.S.	
ALIMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	RECOMMENDED SUPPLY VOLTAGE		10 V	
ALIMENTAZIONE NOMINALE	NOMINAL SUPPLY VOLTAGE		1-15 V	
ALIMENTAZIONE MAX.	MAXIMUM SUPPLY VOLTAGE		18 V	
VALORI MECCANICI LIMITE RIFERITI AL CARICO NOMINALE :	MECHANICAL LIMIT VALUES REFERRED TO NOMINAL LOAD :			
a) carico di servizio	a) service load		120%	
b) carico limite	b) max permissible load		150%	
c) carico di rottura	c) breaking load		>300%	
d) massimo carico trasversale	d) max transverse load		50%	
e) carico dinamico limite	e) max permissible dynamic load		50%	
FRECCIA MAX. AL CARICO NOMINALE	DISPLACEMENT AT NOMINAL LOAD		- 0.2 mm	
TEMPERATURA DI RIFERIMENTO	REFERENCE TEMPERATURE		+23°C	
CAMPO NOMINALE DI TEMPERATURA	TEMPERATURE NOMINAL RANGE		-10 / +40 °C	
TEMPERATURA DI ESERCIZIO	SERVICE TEMPERATURE		-10 / +70 °C	
TEMPERATURA DI STOCCAGGIO	STORAGE TEMPERATURE		-20 / +80 °C	
PESO	WEIGHT		- 0.60 kg	
CLASSE DI PROTEZIONE (EN 60529)	PROTECTION CLASS (EN 60529)		IP67 (0.5 kN IP65 silicon cover)	
MATERIALE DINAMOMETRO	EXECUTION MATERIAL		Acciaio Inox / Stainless Steel	
LUNGHEZZA CAVO	CABLE LENGTH		5 m	
TESTE A SNODO SFERICO CONSIGLIATE	RECOMMENDED KNUCKLE JOINTS		DURBAL EM12	

⁽¹⁾ Errori percentuali calcolati al valore letto, min. 1/10 del carico nominale / Percentual errors referred to reading, min. 1/10 of the nominal load.
A richiesta classificazioni secondo ASTM E74 / Classifications according ASTM E74 on request.

Figura 37 Características técnicas referentes à célula de carga utilizada.

ANEXO D

Series RC13 - Potentiometric Linear Transducer

Dimensions in mm

Series RC13	25	50	75	100	125	150	200	250
Electrical Travel + 1	25	50	75	100	125	150	200	250
Mechanical travel ± 1	30	55	80	105	130	155	205	255
Housing Length - M	75	100	125	150	175	200	250	300
Housing Length - G	102	127	152	177	202	227	277	327
Housing Length - F	75	100	125	150	175	200	250	300
Mounting Brackets Spacing, recomm.	42	67	92	117	142	167	217	267
Hole Spacing, retracted	153	178	203	228	253	278	328	378

Electrical Data

Series RC13	25	50	75	100	125	150	200	250
Resistance Value [kOhm]	1	2	3	4	5	6	8	6
Resistance Tolerance	$\pm 20\%$							
Indep. Linearity Tolerance [$\pm \%FS$]	0.2	0.1			0.05			
Power Rating at 40°C [W]	0.5	1	1.5	2	2.5	3		
Max. Operating Voltage [V]	20	40		60				
Temperature Coefficient Resistor	400 ppm/K							
Temperature Coefficient Voltage Divider Signal	5 ppm/K							
Insulation	> 100 MOhm (bei 500V DC)							
Dielectric Strength	< 500 Veff. (50Hz)							
Maximum Wiper Current	10 mA							
Recommended Wiper Current	< 0,1 μA (Voltage Divider Curcuit)							

Figura 38 Ficha técnica dos sensores de deslocamento linear utilizados.

ANEXO E

Product Name	NI 9219
Product Family	Industrial I/O
Form Factor	CompactDAQ , CompactRIO
Part Number	779781-01
Operating System/Target	Real-Time , Windows
Measurement Type	RTD , Bridge-based sensor , Thermocouple , Voltage , Current , Temperature , Resistance
Isolation Type	Ch-Ch Isolation
RoHS Compliant	Yes
Signal Conditioning	0-20 mA current input , Current excitation , Cold-junction compensation , Bridge completion , Voltage excitation
Analog Input	
Channels	4 , 0
Single-Ended Channels	0
Differential Channels	4
Resolution	24 bits
Sample Rate	100 S/s
Max Voltage	60 V
Maximum Voltage Range	-60 V , 60 V
Maximum Voltage Range Accuracy	243 mV
Minimum Voltage Range	-0.125 V , 0.125 V
Minimum Voltage Range Accuracy	271 μ V
Maximum Current Range	-0.025 A , 0.025 A
Maximum Current Range Accuracy	152 μ A
Simultaneous Sampling	Yes
Excitation Voltage	2.5 V
Bridge Configurations	Half Bridge , Full Bridge , Quarter Bridge

Figura 39 Ficha técnica das placas de aquisição de dados utilizadas.

ANEXO F

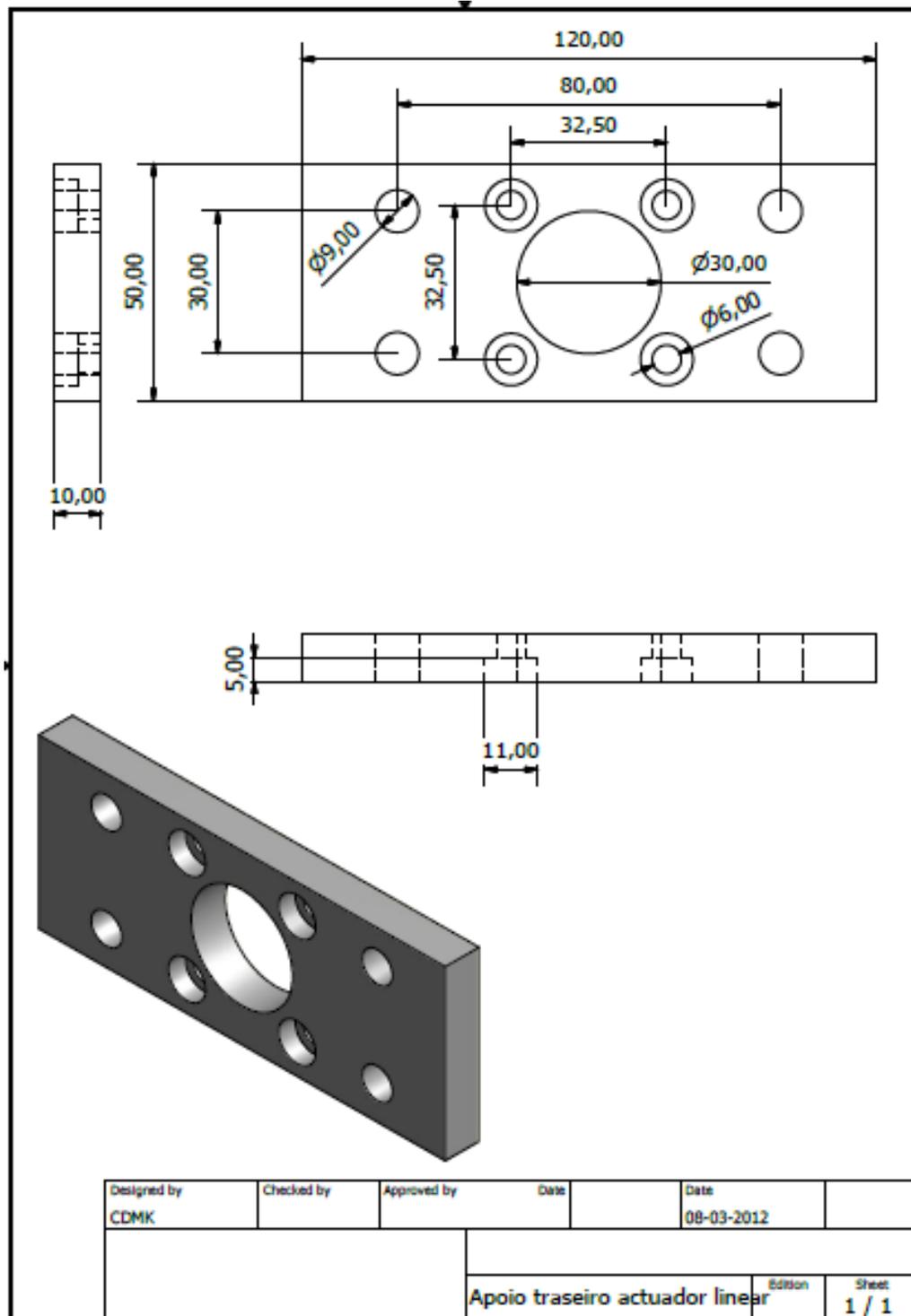


Figura 40 Desenho do fixador traseiro para o atuador pneumático.

ANEXO G

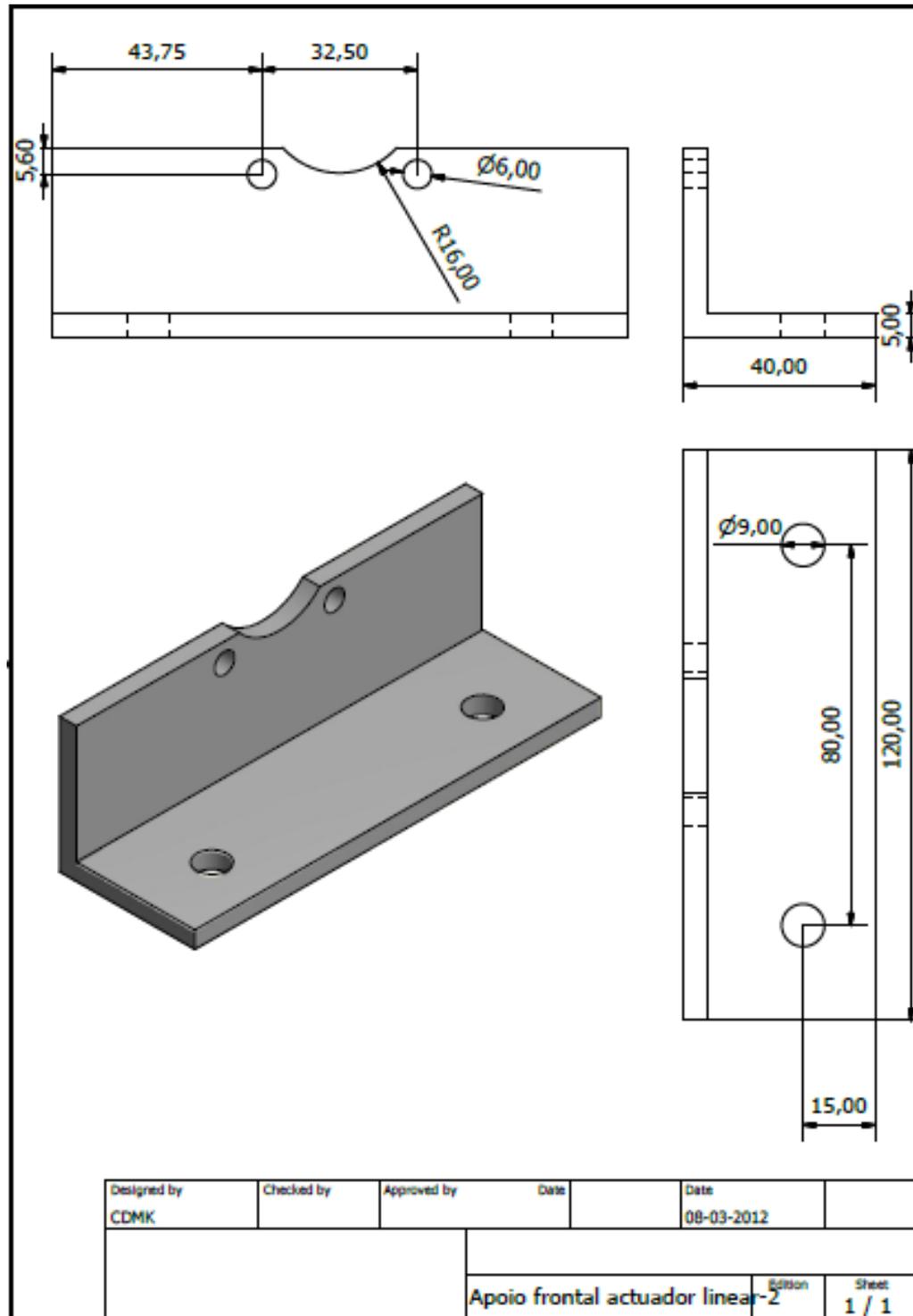


Figura 41 Desenho do apoio frontal do atuador linear.

ANEXO H

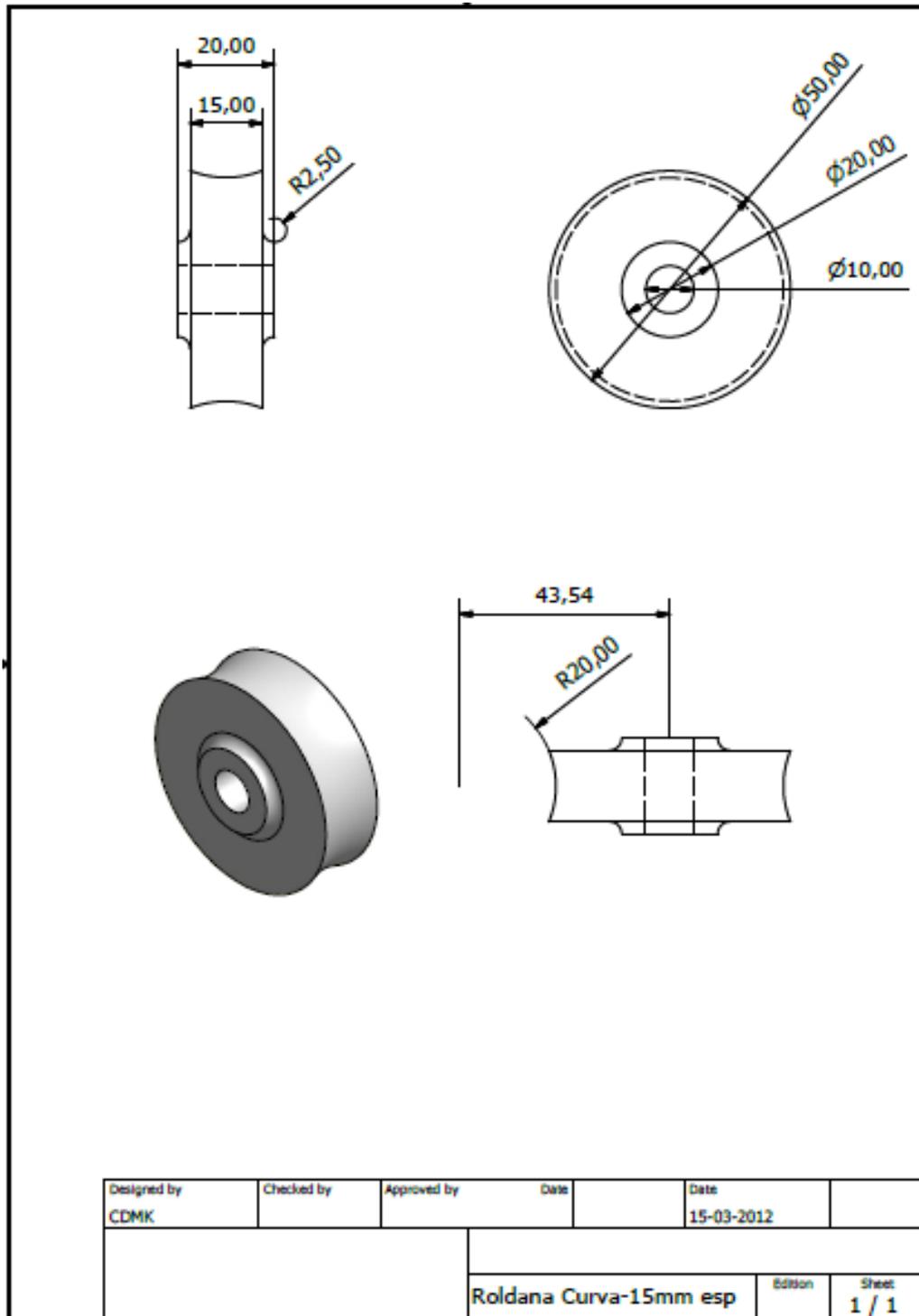


Figura 42 Desenho da roldana.

ANEXO I

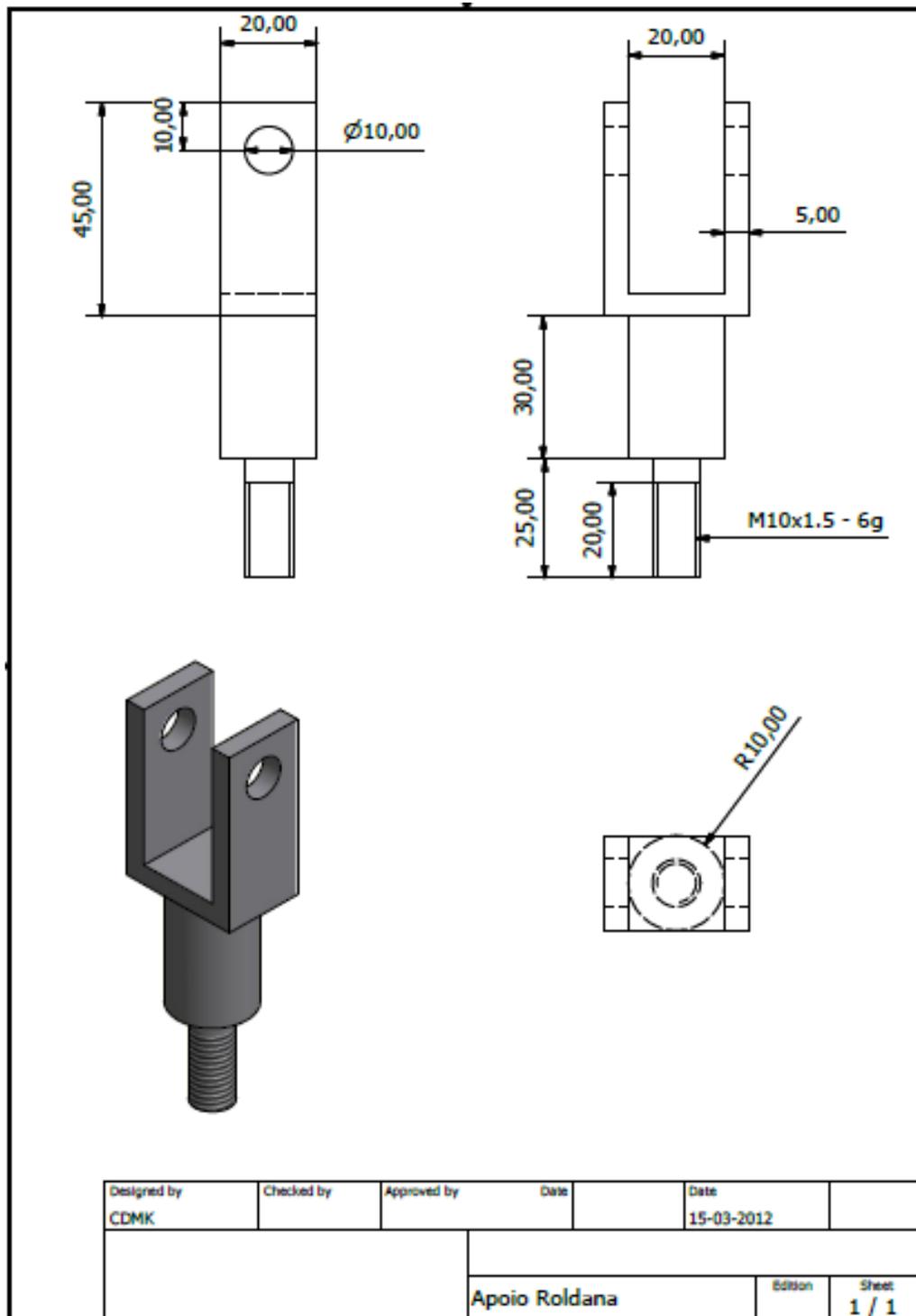


Figura 43 Desenho do apoio da roldana.

ANEXO J

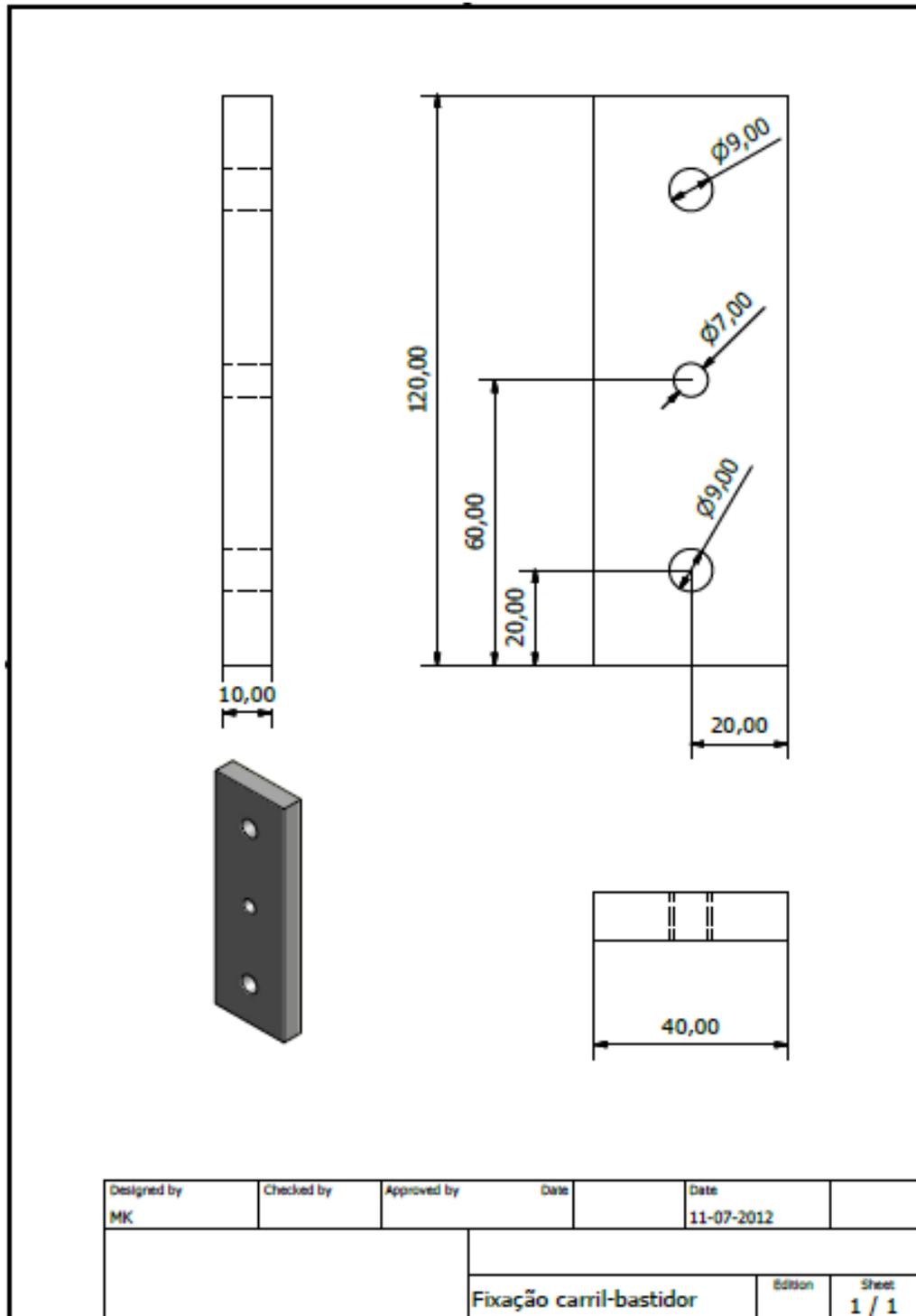


Figura 44 Desenho dos fixadores do carril ao bastidor.

ANEXO K

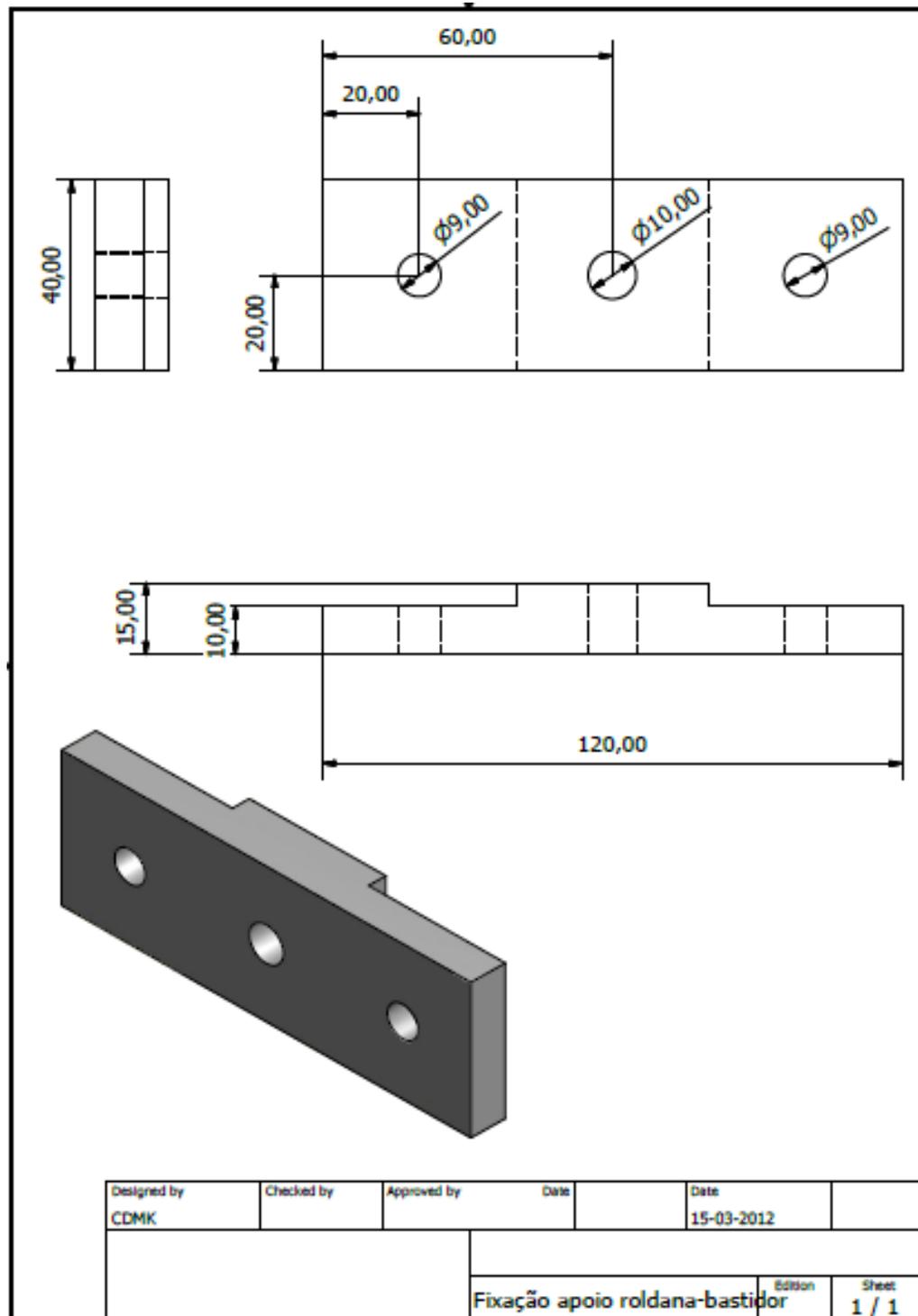


Figura 45 Desenho do fixador do apoio da roldana ao bastidor.

ANEXO L

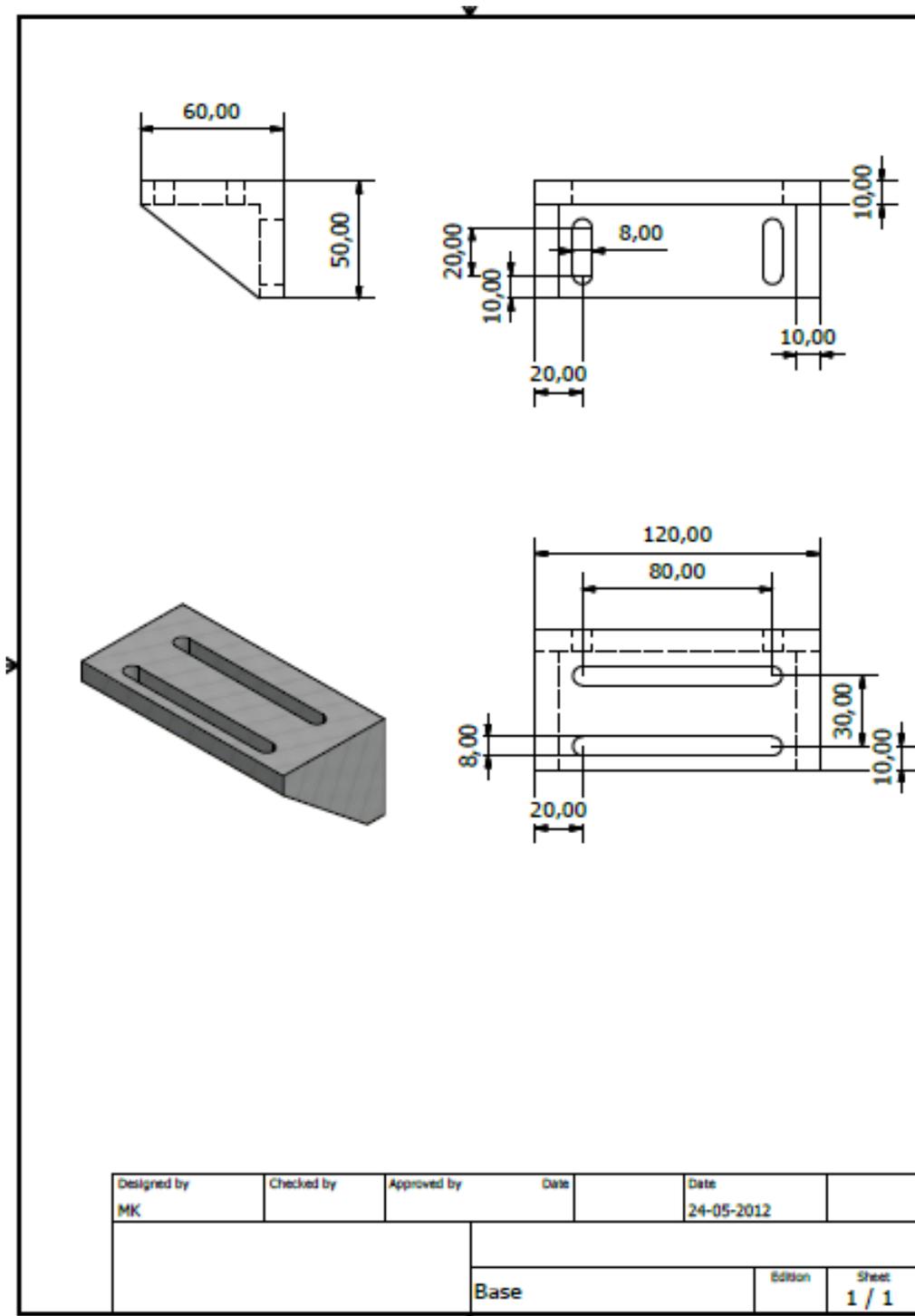


Figura 46 Desenho do apoio dos encastramentos ao bastidor.

ANEXO M

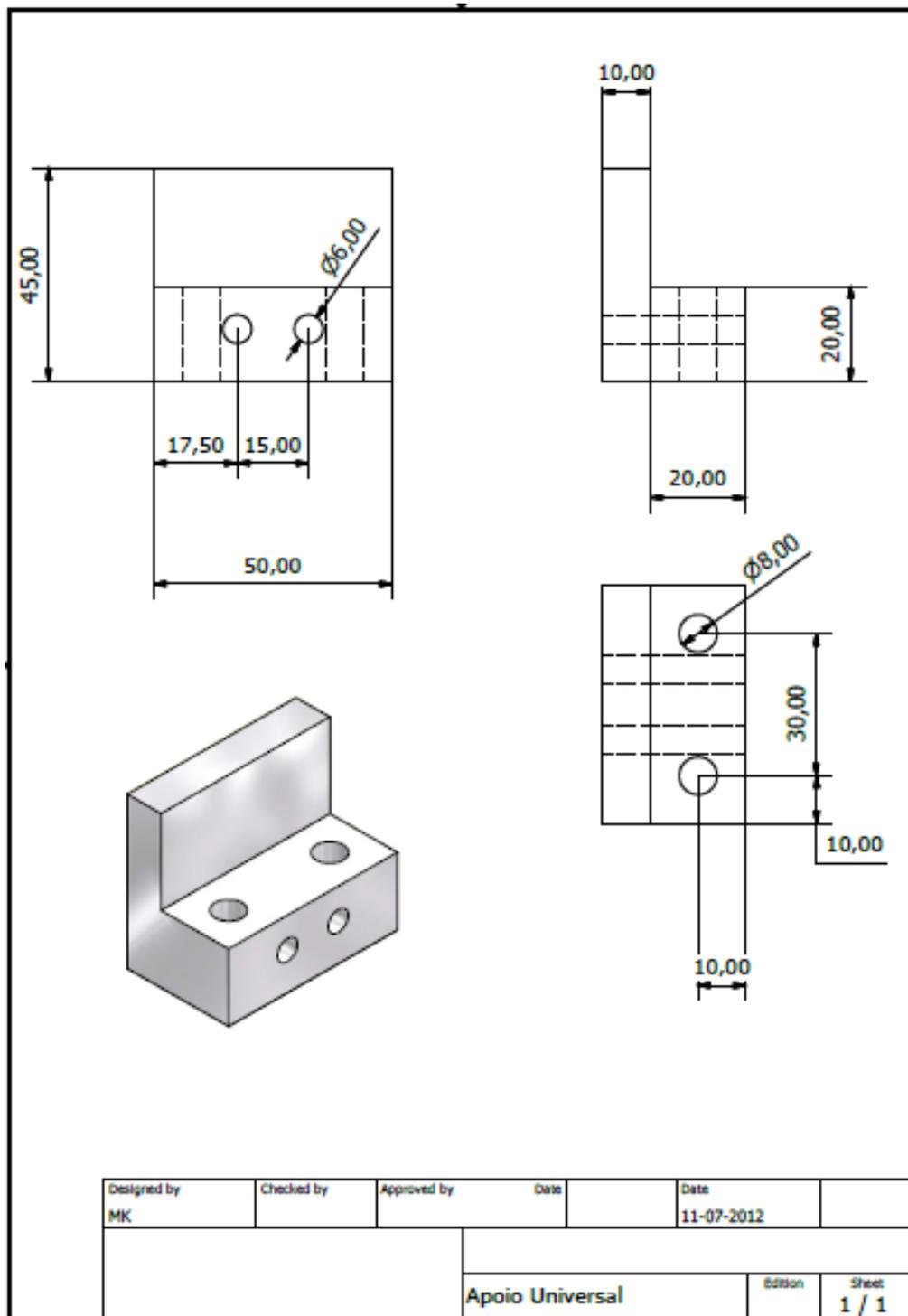


Figura 47 Desenho do apoio dos laminados ao encastramento.

ANEXO N

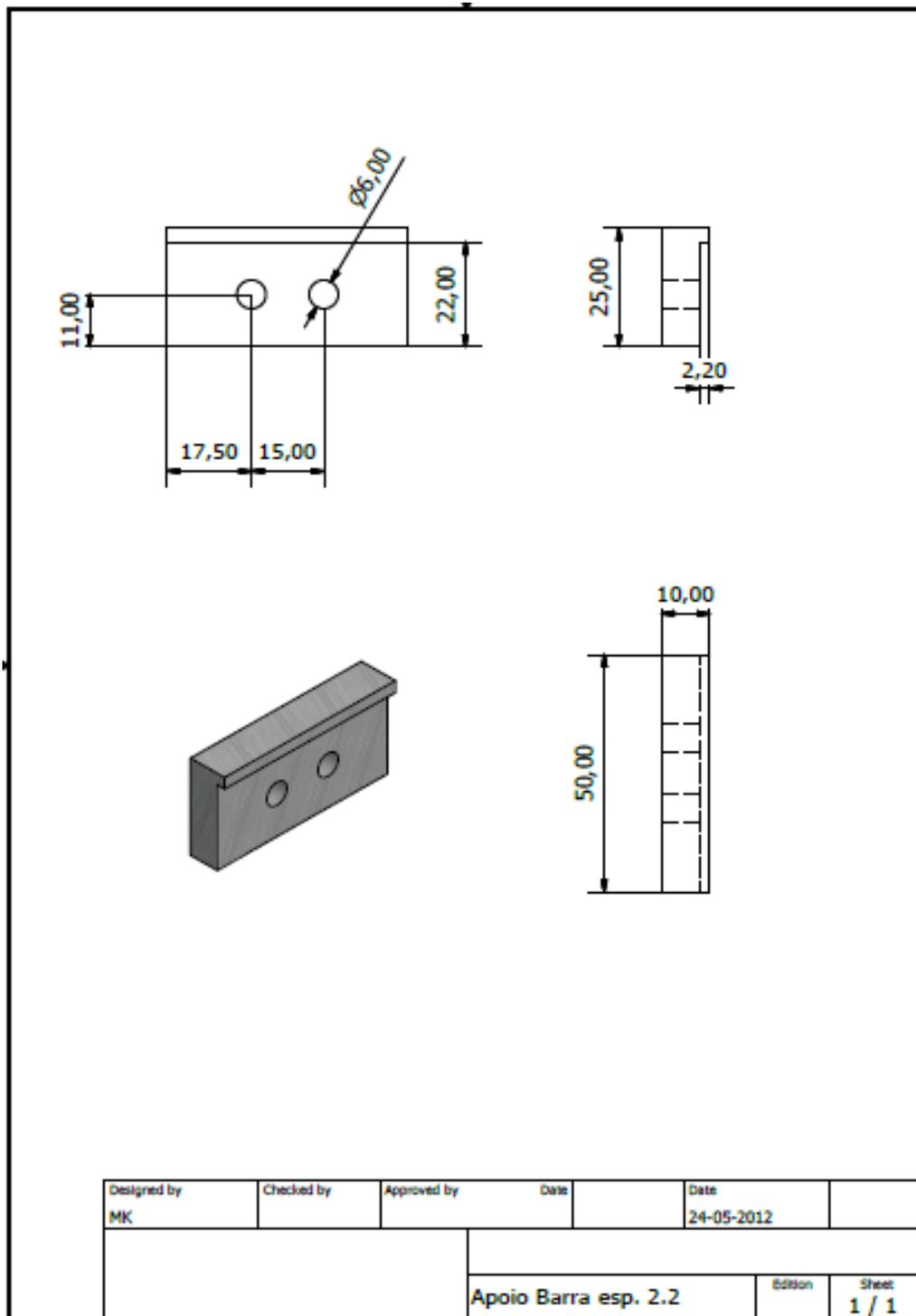


Figura 48 Desenho para o apoio de laminados de 2,2 mm ao encastramento.

ANEXO O

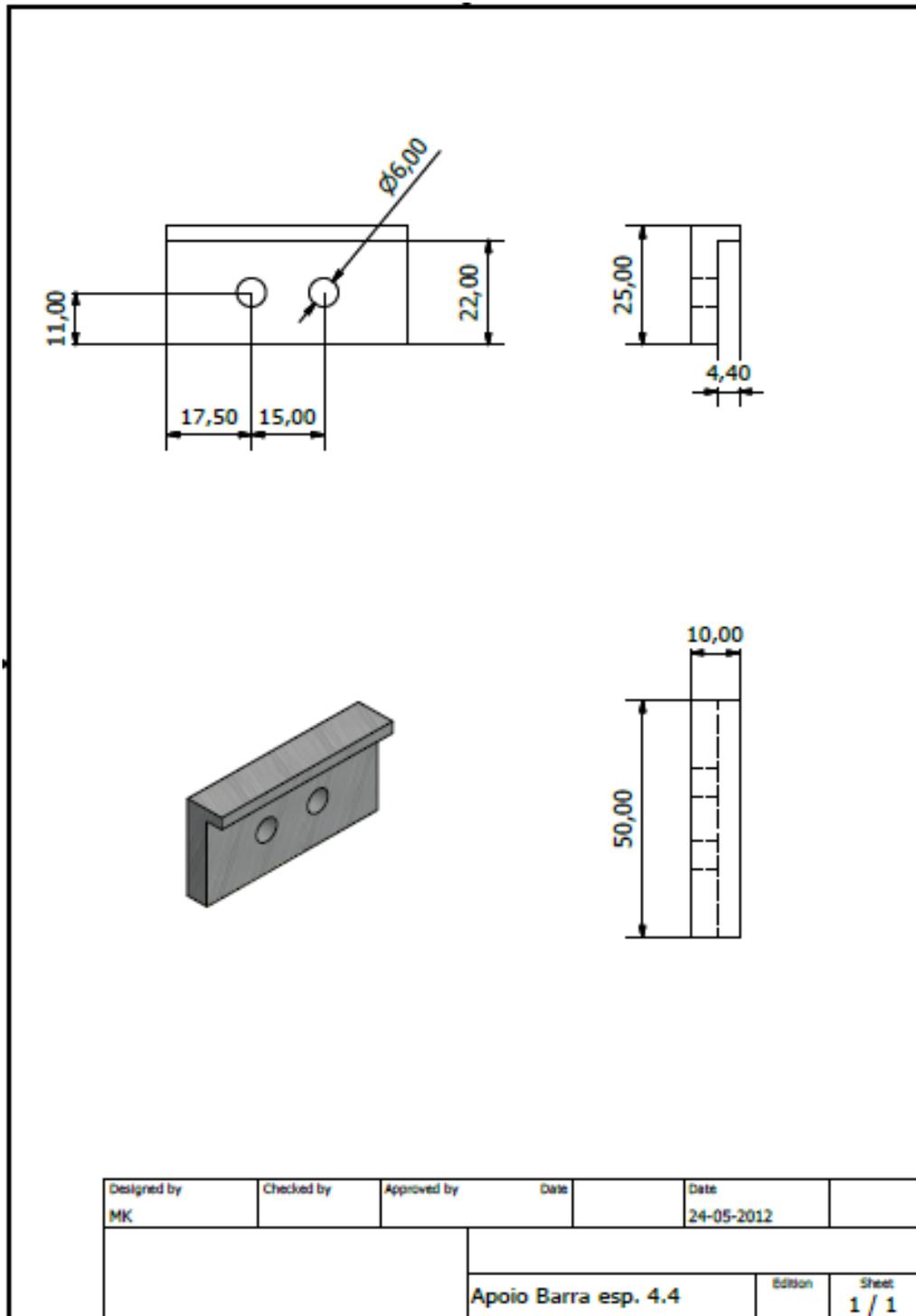


Figura 49 Desenho para o apoio de laminados de 4,4 mm de espessura ao encastramento.

ANEXO R

Tabela 6 Resultados de deslocamento e carga crítica para o laminado FV.1.

	Deslocamento vertical [mm]	Carga crítica [N]
Ensaio 1	1,55	19,96
Ensaio 2	1,60	20,49
Ensaio 3	1,62	20,78
Ensaio 4	1,57	20,10
Ensaio 5	1,62	20,68
Ensaio 6	1,63	20,82
Média	1,60	20,47

Tabela 7 Resultados de deslocamento e carga crítica para o laminado FV.2.

	Deslocamento vertical [mm]	Carga crítica [N]
Ensaio 1	1,53	19,48
Ensaio 2	1,52	19,54
Ensaio 3	1,57	20,02
Ensaio 4	1,53	19,57
Ensaio 5	1,56	19,87
Ensaio 6	1,52	19,55
Média	1,54	19,67

ANEXO S

Tabela 8 Resultados de deslocamento e carga crítica para o laminado FV.3.

	Deslocamento vertical [mm]	Carga crítica [N]
Ensaio 1	13,94	218,00
Ensaio 2	13,99	220,00
Ensaio 3	13,99	219,00
Ensaio 4	13,89	218,00
Ensaio 5	13,86	218,00
Ensaio 6	13,97	219,00
Média	13,94	218,67

Tabela 9 Resultados de deslocamento e carga crítica para o laminado FC.

	Deslocamento vertical [mm]	Carga crítica [N]
Ensaio 1	1,20	47,45
Ensaio 2	1,21	48,11
Ensaio 3	1,26	49,85
Ensaio 4	1,21	48,23
Ensaio 5	1,19	47,11
Ensaio 6	1,19	47,21
Média	1,21	47,99