



**Pedro Rafael Lima
Ribeiro**

**Estudo experimental da resistência à compressão de
laminados carbono/epóxico**



**Pedro Rafael Lima
Ribeiro**

Estudo experimental da resistência à compressão de laminados carbono/epóxido

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica do Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes, professor associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e do Doutor António Manuel de Bastos Pereira, professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

arguente

Professor José Luís Soares Esteves
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

orientador

Professor Doutor Alfredo Manuel Balacó de Morais
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes, pela disponibilidade e apoio prestados, e também pela paciência mostrada ao longo desta fase. Foi um prazer poder receber conselhos de tamanha sabedoria no decorrer destes últimos meses.

Ao meu coorientador, Professor Doutor António Manuel de Pereira Bastos, pela disponibilidade e prontidão que apresentou na ajuda da componente prática. Foi muito enriquecedor receber tantos e tão bons conselhos e conhecimentos da sua parte.

Ao Engenheiro António Festas e ao Engenheiro Ricardo Beja, pela ajuda que deram em algumas fases do trabalho.

Ao João Ferreira, ao João Valente e ao Marcelo Pereira, por todo o empenho, companheirismo e apoio ao longo destes anos de percurso académico. Sem a vossa ajuda esta experiência não seria com certeza tão valiosa.

Aos meus colegas de Universidade que me acompanharam neste percurso, por tornarem esta experiência única e que levo para a vida.

Aos amigos de longa data que partilhavam experiências e que animavam aquando do regresso à minha cidade natal. Foram uma mais valia para que tudo corresse bem ao longo destes anos.

À minha avó, ao meu irmão e aos meus tios, que sempre ajudaram nas situações mais complicadas para que fosse possível chegar a esta fase da minha vida.

À Margarida Gonçalves pelo encorajamento e dedicação. Pelo suporte nos momentos menos bons, e pelos sorrisos nos momentos bons. Não seria possível passar esta fase sem que insistisses para que eu trabalhasse mais e melhor.

À minha mãe pela educação e apoio durante todos estes anos de forma a garantir que não me faltasse nenhuma ferramenta necessária ao meu desenvolvimento pessoal e profissional. Todo o esforço despendido por ti tem agora um fruto, e tu melhor que ninguém sabes as dificuldades por que passamos para aqui chegar.

palavras-chave

Compósitos de carbono/epóxico, laminados unidirecionais, ensaios de compressão, ensaios de flexão, módulo longitudinal, tensão de rutura longitudinal.

resumo

Os laminados compósitos são materiais cujas aplicações estruturais têm vindo a crescer. A realização de ensaios mecânicos é fulcral para prever o seu comportamento e fornecer propriedades para projeto.

No decorrer deste trabalho foram realizados ensaios de compressão em três tipos de laminados carbono/epóxico unidirecionais com o objetivo de avaliar como é que os provetes responderiam a ensaios de transmissão de carga direta nos topos. Foram realizados ensaios em provetes simples e em dois tipos de provetes híbridos, com Alumínio e com adesivo epóxico. Com os provetes híbridos procurava-se evitar encurvadura prematura. Os resultados destes ensaios ficaram longe do esperado, pois o modo de rutura foi o esmagamento dos topos.

Também era um dos objetivos deste trabalho obter a resistência à compressão longitudinal a partir de ensaios de flexão. Para diminuir indentações locais, utilizaram-se roletes flexíveis de PTFE. A análise dos resultados foi apoiada em simulações numéricas. Estes ensaios revelaram resultados bastante promissores, atingindo resistências superiores às de muitos valores reportados nas referências.

key words

Carbon/epoxy composite, unidirectional laminates, compression tests, bending tests, longitudinal modulus, ply longitudinal compression strength.

abstract

Composite laminates are increasingly used in structural applications. Mechanical tests are essential to predict their behavior and provide design properties.

In this work, compression tests were conducted on three types of unidirectional laminates. The objective was to assess the behavior of the specimens under direct load transmission. Tests were performed on simple and hybrid specimens, either with aluminum or with epoxy adhesive. The hybrid specimens intended to avoid premature buckling. However, the results of those tests were poor, because the failure mode was the crushing of the ends.

It was also an objective of the present work to obtain the longitudinal compression strength from bending tests. In order to avoid local indentations, flexible PTFE rollers were used. Data analysis was supported by numerical simulations. The results were quite promising, yielding strengths above many of the values reported in the literature.



Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 – Os compósitos	1
1.2 – Ensaio de compressão.....	3
1.3 – Ensaio de flexão.....	6
1.4 - Objetivos	7
Capítulo 2 – Procedimento Experimental	11
2.1 – Ensaio de compressão.....	12
2.2 – Ensaio de flexão.....	16
Capítulo 3 – Tratamento de Resultados	21
3.1 – Ensaio de compressão.....	21
3.2 – Ensaio de flexão.....	23
Capítulo 4 – Resultados Experimentais	27
4.1 – Ensaio de compressão.....	27
4.1.1 – Provetes Simples C20C.....	27
4.1.2 – Provetes Híbridos C20C com Alumínio.....	30
4.1.3 – Provetes Híbridos C10C e C12C com <i>Araldite</i>	33
4.2 – Ensaio de flexão.....	35
Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros	43
Referências bibliográficas	45
Anexo A - Dedução das fórmulas para cálculo das propriedades:.....	a



Lista de figuras

Figura 1: Orientação do referencial "123" para as camadas unidirecionais.....	2
Figura 2: Modo de transmissão de carga em testes de compressão (Hodgkinson, 2000).	3
Figura 3: Representação do dispositivo Celanese (a) e IITRI (b), correspondentes à norma ASTM D3410 (Moura, 2005).....	4
Figura 4: Dispositivo correspondente à norma ASTM D695 M para laminados $[0]_n$ (Moura, 2005).	5
Figura 5: Dispositivo utilizado para os ensaios com CLC, ASTM D6641.....	6
Figura 6: Representação esquemática dos ensaios em 3 pontos (a), e 4 pontos (b).....	7
Figura 7: Fotografias obtidas através do microscópio dos defeitos presentes no provete C10F1 (Ampliação de 15x).....	12
Figura 8: Desenho técnico do componente de metal duro K30, fornecido pela Frezite.	13
Figura 9: Moldes em PTFE para fabrico dos provetes híbridos de Araldite: Molde I (à esquerda) e Molde III (à direita).....	14
Figura 10: Fotografia de um ensaio de provete híbrido C20C com alumínio.....	15
Figura 11: Fotografia tirada no decorrer de um ensaio onde se podem ver as 4 marcas óticas que serviram para a medição dos deslocamentos pelo videoextensómetro.	16
Figura 12: Montagem e hardware utilizados nos ensaios de flexão.....	17
Figura 13: Fotografia que mostra a colocação das marcas extensométricas utilizadas nos ensaios de flexão.	17
Figura 14: Fotografia da medição realizada pelo videoextensómetro para medição dos três pontos, por meio do software Dotmeas.....	18
Figura 15: Curva força-deslocamento de um ensaio à compressão: linearização da curva. Azul - curva inicial; Laranja - curva linearizada por extrapolação.	21
Figura 16: Curva tensão-deformação da Araldite Standard (Faria, 2010).	22
Figura 17: Curva tensão-deformação do Alumínio utilizado nos provetes C20C.	22
Figura 18: Curvas de tensão-deformação para os ensaios de compressão realizados em provetes simples C20C.	27
Figura 19: Fotografia vista de cima de um topo que colapsou por deslizamento das camadas (ampliação de 15x).....	28
Figura 21: Fotografia vista de cima de um topo totalmente destruído (ampliação de 15x).....	29
Figura 20: Fotografia de um topo totalmente esmagado, levando à destruição do mesmo (ampliação de 15x).....	29
Figura 22: Fotografia de um topo que colapsou por deslizamento das fibras (ampliação de 15x). 30	
Figura 23: Gráfico comparativo das curvas de tensão-deformação do compósito num provete híbrido (azul) e de um provete simples (laranja).....	30
Figura 24: Fotografias ao microscópio da descolagem da chapa de Alumínio (à esquerda) e do esmagamento do topo (em ambas, mas visto de cima à direita) (ampliação de 15x).....	31
Figura 25: Fotografia de um dos provetes C20Ck-al no decorrer do ensaio.	32
Figura 26: Gráfico tensão-deformação dos ensaios de compressão dos compósitos em provetes híbridos C10C com Araldite Standard.	33
Figura 27: Gráfico tensão-deformação dos ensaios de compressão dos compósitos em provetes híbridos C12C com Araldite Standard.	33



Figura 28: Curvas carga-deslocamento a meio-vão dos ensaios à flexão dos provetes C10F.	35
Figura 29: Curvas carga-deslocamento a meio-vão dos ensaios à flexão dos provetes C12F.....	35
Figura 30: Modelo de elementos finitos do ensaio de flexão em 4 pontos (deslocamento U2).....	37
Figura 31: Curvas carga-deslocamento a meio-vão dos ensaios à flexão dos provetes C10F comparadas com a curva prevista pela simulação.....	38
Figura 32: Curvas carga-deslocamento a meio-vão dos ensaios à flexão dos provetes C12F comparadas com a curva prevista pela simulação.....	39

Lista de tabelas

Tabela 1: Propriedades da camada do carbono-epóxico usado. A espessura nominal da camada é 0.15 mm (Fernandes, 2011).....	11
Tabela 2: A designação é composta por 3 partes: o primeiro C significa "Camadas" e é seguido do número das mesmas. Segue-se um "C" ou um "F" conforme o tipo de ensaio a que se destina (Compressão ou Flexão). Por fim, k define apenas o número do teste.	11
Tabela 3: Resultados dos ensaios de compressão realizados em provetes simples C20C. O “*” significa que este resultado não foi utilizado nos cálculos por se encontrar fora do intervalo dos outros resultados.....	27
Tabela 4: Comparação de resultados de ensaio de compressão do compósito num provete híbrido C20C com alumínio e de um provete simples C20C.	31
Tabela 5: Resultados dos ensaios de compressão realizados em provetes híbridos C10C.O “*” significa que este resultado não foi utilizado nos cálculos por se encontrar fora do intervalo dos outros resultados.....	34
Tabela 6: Resultados dos ensaios de compressão realizados em provetes híbridos C12C.O “*” significa que este resultado não foi utilizado nos cálculos por se encontrar fora do intervalo dos outros resultados.....	34
Tabela 7: Resultados dos ensaios à flexão de provetes C10. O “*” significa que este resultado não foi utilizado nos cálculos por se encontrar fora do intervalo dos outros resultados.	36
Tabela 8: Resultados dos ensaios à flexão de provetes C12.	36
Tabela 9: Propriedades do compósito carbono-epóxico utilizadas nas simulações.....	37
Tabela 10: Propriedades dos roletes flexíveis de PTFE (DuPont, 1996).	38

Capítulo 1

Introdução



Capítulo 1 - Introdução

1.1 – Os compósitos

No domínio das aplicações estruturais existe grande diversidade de materiais que tem vindo a ser constantemente desenvolvida ao longo de décadas, perseguindo-se o objetivo de encontrar materiais que apresentem comportamentos ótimos para as aplicações em vista. Os compósitos têm adquirido um papel cada vez mais importante neste domínio. Tal como a designação indica, os compósitos são constituídos por dois ou mais materiais diferentes, com o intuito de aproveitar as melhores propriedades de cada um, combinando-as de forma equilibrada.

Existe, portanto, grande interesse no estudo das propriedades mecânicas dos compósitos, realizando para tal variados ensaios mecânicos, e tentando modelar o seu comportamento perante vários tipos de solicitações.

Esta classe de materiais, em geral, é constituída por uma matriz e por um reforço. Este é, habitualmente, o constituinte mais importante visto ter maior preponderância nas características mecânicas. Nos compósitos destinados a aplicações estruturais são quase sempre constituídos por fibras contínuas. Por seu turno, a matriz é, habitualmente, um material polimérico, e desempenha três funções fundamentais: conferir a forma desejada ao compósito, proteger as fibras dos danos causados pelo ambiente e pelas condições de utilização, e transmitir a carga para as fibras (Moura, 2005).

Normalmente, os compósitos utilizados estruturalmente são fabricados por empilhamento de camadas unidirecionais. Estas camadas podem ser combinadas de diferentes formas, sendo que o número de camadas e a respetiva orientação das mesmas são o que confere aos compósitos a versatilidade e a adaptabilidade necessária para as funções a cumprir.

Esta versatilidade assenta nas inúmeras possibilidades de combinar de camadas em diferentes orientações, o que também é importante pelo facto das camadas unidirecionais serem claramente anisotrópicas. Para definir as propriedades define-se um sistema de 3 eixos principais. Na figura 1, é possível observar a orientação dos eixos: o eixo “1” coincide com a

direção longitudinal, o eixo “2” com a direção transversal e o eixo “3” a direção da espessura de camada.

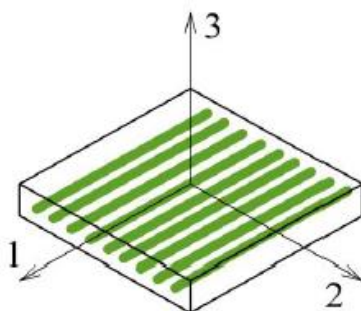


Figura 1: Orientação do referencial "123" para as camadas unidirecionais.

Neste referencial é possível definir o comportamento dos materiais recorrendo à combinação das propriedades em cada direção. O comportamento linear elástico de camada fica completamente definido sabendo os módulos de elasticidade longitudinal e transversal, E_1 e E_2 , respetivamente, os coeficientes de Poisson longitudinal e transversal, ν_{12} e ν_{23} , e ainda o módulo de corte transversal, G_{12} (Moura, 2005). De forma semelhante, as resistências também são caracterizadas segundo as direções do referencial acima descrito. Sendo assim, a camada é caracterizada pelas resistências à tração e compressão longitudinal, σ_{ut1} e σ_{uc1} , respetivamente, à tração e compressão transversal, σ_{ut2} e σ_{uc2} , e ainda ao corte longitudinal e transversal, τ_{u12} e τ_{u23} . Porém, e devido às excelentes propriedades de camada nas direções das fibras, as propriedades E_1 , σ_{ut1} e σ_{uc1} são as mais relevantes na caracterização da camada.

Os compósitos de fibra de carbono, que foram objeto de estudo neste trabalho, são materiais de elevado desempenho com aplicações estruturais em vários campos, desde quadros de bicicletas a componentes automóveis e de aviação, passando ainda pela área médica (Moura, 2005). Os vários aspetos do seu complexo comportamento mecânico têm sido objeto de muita investigação. O comportamento à tração está mais bem estudado, e durante anos, assumiu-se que o comportamento à compressão seria semelhante. Contudo, e desde a década de 1980, intensificou-se o estudo do comportamento à compressão devido às diferenças detetadas relativamente à tração e ao facto das aplicações serem cada vez mais exigentes (Adams, Current Compression Test Methods, 2005). Apesar dos vários estudos já realizados desde essa década, a resistência à compressão continua a ser uma propriedade difícil de estudar, sendo os valores objeto de alguma controvérsia. Sabe-se que os ensaios de

compressão são muito exigentes no que toca ao alinhamento das cargas e à preparação dos provetes (Squires, 2006).

1.2 – Ensaios de compressão

Os ensaios de compressão desenvolvidos ao longo dos anos distinguem-se principalmente pelo modo de transmissão de carga, isto é, se a carga é transmitida diretamente nos topos do provete, se é transmitida por corte, ou ainda se resulta da combinação das duas anteriores, como mostra a figura 2.

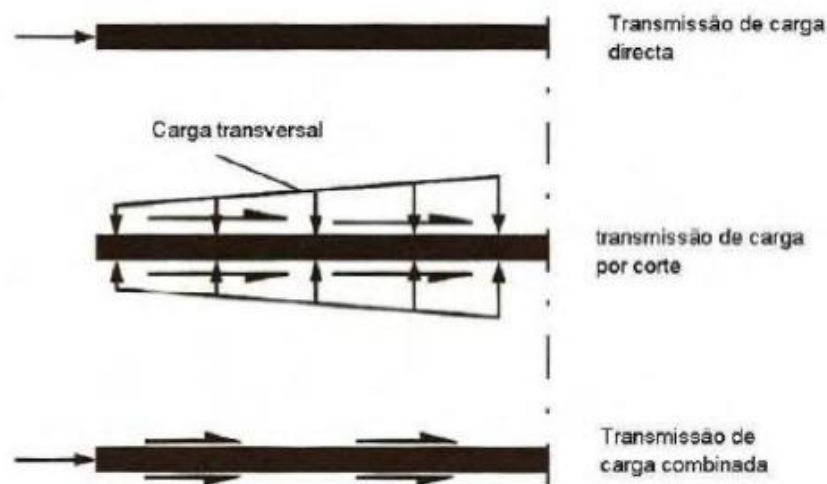


Figura 2: Modo de transmissão de carga em testes de compressão (Hodgkinson, 2000).

Por outro lado, a principal semelhança entre os ensaios existentes é o comprimento livre dos provetes ser de tal forma pequeno que dá azo a questões acerca da influência dos efeitos de transmissão de carga, conhecidos como efeitos de St. Venant. De facto, na vizinhança da zona onde são aplicadas as forças, os campos de tensões e extensões não são uniformes, incluindo componentes espúrias (Moura, 2005).

Atualmente, os ensaios de compressão são objeto de várias normas:

- da ASTM (*American Society for Testing and Materials*), isto é, ASTM D3410, D695 (M), entre outras (Adams, *Current Compression Test Methods*, 2005);

- da SACMA (*Suppliers of Advanced Composite Materials Association*), ou seja, SRM 1R-94 (Wolfe, 2004);
- da ISO (*International Organization for Standardization*), que são as normas ISO 8515 (Schneider, 2005), ISO 604 e ISO 14126 (Wolfe, 2004);
- do CRAG (*Composites Reseach Advisory Group*), que é a norma CRAG 400 (Schneider, 2005).

Estas têm sido atualizadas conforme os avanços atingidos pelos estudos realizados na área.

A norma ASTM D3410 foi a primeira a ser estabelecida para laminados compósitos, mais concretamente para provetes $[0]_n$. A referida norma estipulava inicialmente apenas o ensaio *Celanese* (figura 3-a), desenvolvida pela *Celanese Corporation*, e que usava um dispositivo que transmitia a carga por corte. Mais tarde, foi adicionado a esta norma o ensaio desenvolvido no IITRI (*Illinois Institute of Technology Research Institute*), que usava o mesmo princípio de transmissão de carga, mas cujo dispositivo era menos complexo (figura 3-b). Ambos apresentavam o mesmo tipo de problemas: o toleranciamento utilizado era muito fino, o que levava a que o tratamento das amostras, bem como o seu alinhamento aquando dos testes tivesse de ser muito cuidadoso (Adams, *Current Compression Test Methods*, 2005), (Moura, 2005).

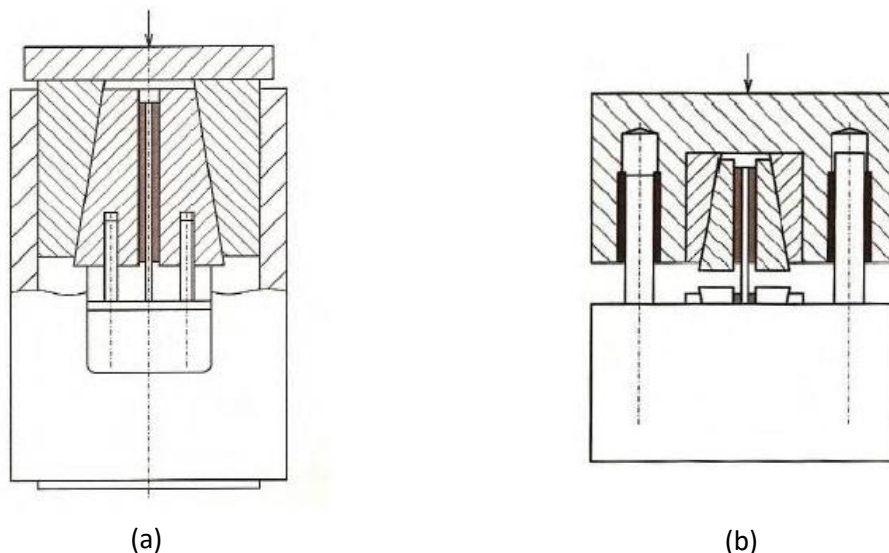


Figura 3: Representação do dispositivo *Celanese* (a) e IITRI (b), correspondentes à norma ASTM D3410 (Moura, 2005).

A transmissão direta de carga já existia, mas foi implementada mais tarde por meio da modificação feita pela *Boeing* ao teste ASTM D695 (M) (figura 4), que era aplicado originalmente a um provete com forma de alter ou “osso de cão”. Contudo, este teste cedo revelou problemas na transmissão de cargas, e a necessidade de guias anti encurvadura (Adams, *Current Compression Test Methods*, 2005).

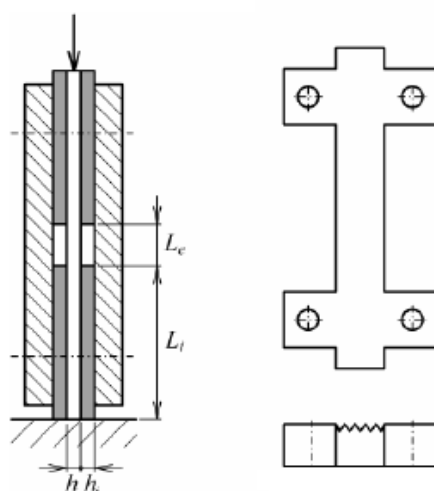


Figura 4: Dispositivo correspondente à norma ASTM D695 M para laminados $[0]_n$ (Moura, 2005).

Já em 2003 o ensaio designado por *Combined Load Compression* (CLC) foi adotado pela norma ASTM D6641 (figura 5). Tal como o nome sugere, este ensaio combina os dois tipos anteriores de transmissão de carga, cujas proporções podem ser ajustadas da forma mais adequada ao material a ensaiar. Tratou-se de um importante avanço no ensaio à compressão de laminados compósitos, visto que exige um dispositivo menos pesado, menos complexo, e que tem a vantagem de não necessitar de insertos colados para evitar escorregamento da amostra (Adams, *Current Compression Test Methods*, 2005).

Além dos tipos de ensaios normalizados, há ainda também outros desenvolvidos por investigadores e pela indústria, que se baseiam nos mesmos princípios, mas aos quais foram sendo feitas algumas alterações no sentido de melhorar os ensaios mais conhecidos. Um exemplo disso é o teste desenvolvido por Neves (2009), para laminados de fibra de vidro, e, posteriormente, adaptado aos laminados de fibras de carbono por Rendeiro (2012). Este ensaio recorre a um provete híbrido composto pelo laminado a estudar e por duas camadas de resina epóxida com o objetivo de eliminar a encurvadura. Assim, a curva de comportamento elasto-plástico do laminado resulta da diferença entre a curva do provete

híbrido e a curva de comportamento da resina, medida em ensaios preliminares. Este teste conduziu a bons resultados quando aplicado a provetes de tecido de fibra de vidro/epóxico, compósito mais direcionado para aplicações navais (Neves, 2009). Os modos de rutura observados foram considerados válidos, a dispersão foi relativamente baixa e os valores médios das resistências, elevados (Neves, 2009). Por seu turno a aplicação a laminados de fibras de carbono/epóxico revelou problemas de esmagamento dos topos.

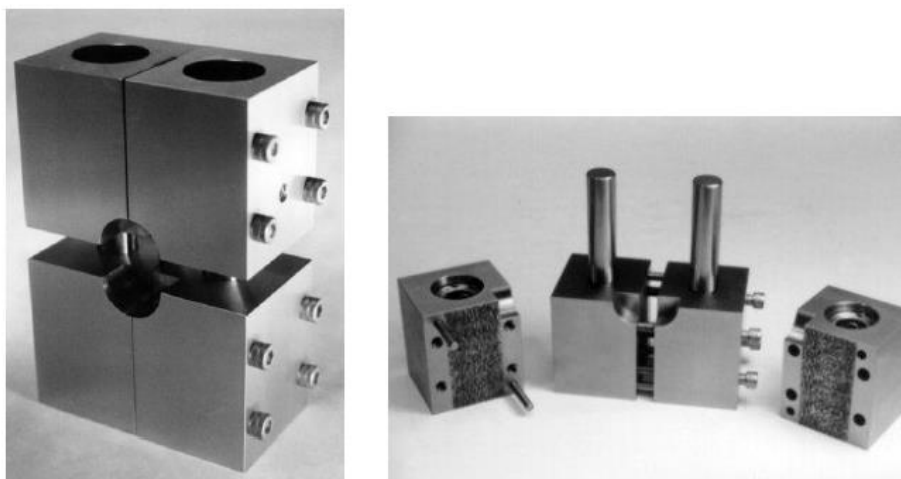


Figura 5: Dispositivo utilizado para os ensaios com CLC, ASTM D6641.

1.3 – Ensaios de flexão

Os ensaios de flexão são sensíveis ao comportamento superficial das camadas mais próximas das superfícies dos laminados compósitos. A limitação destes ensaios é o facto de pequenas variações dimensionais terem efeito significativo nos resultados finais. Assim estes ensaios não são considerados adequados para medir com rigor propriedades mecânicas dos laminados, mas servem como controlo de qualidade, devido à simplicidade e facilidade de realização (Hodgkinson, 2000).

Os ensaios à flexão têm essencialmente duas variantes: uma que utiliza três pontos, um de aplicação de carga e os restantes de suporte (figura 6-a), e outro que utiliza quatro pontos, onde passam a existir dois pontos de aplicação de carga (figura 6-b). As dimensões dos provetes compósitos e os parâmetros dos ensaios são objeto das normas ISO 14125 e ASTM D790.

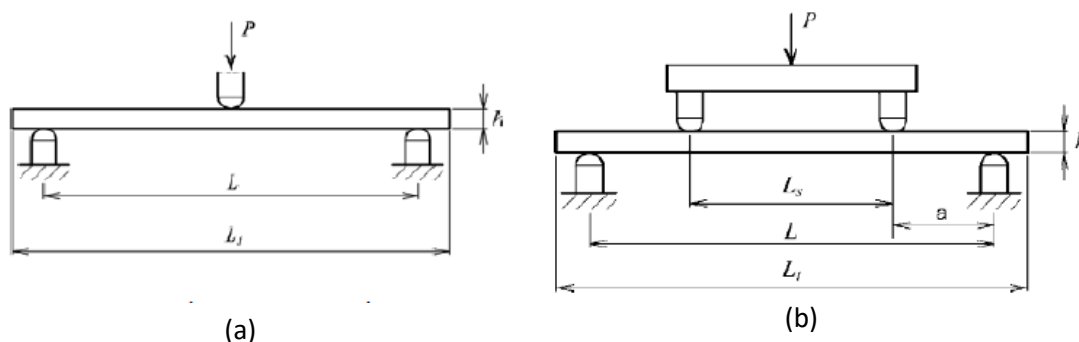


Figura 6: Representação esquemática dos ensaios em 3 pontos (a), e 4 pontos (b).

Ainda existe outro ensaio objeto da norma ASTM D5467, que consiste no recurso a um provete *sandwich*, e cujo objetivo é medir a resistência à compressão de laminados. A designação *sandwich* deriva do facto do provete ser constituído por três camadas: a primeira é a camada de laminado a testar, a segunda é um núcleo em forma de ninho de abelha, que tem por objetivo evitar rutura da pele superior devido à encurvadura, e por último uma chapa metálica de espessura suficiente para garantir que ocorre rutura à compressão da camada do laminado em ensaio.

1.4 - Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar formas alternativas de medir a resistência à compressão de laminados carbono/epóxico. Concretamente, recorreu-se:

- ao ensaio de compressão em provetes unidireccionais de carbono-epóxico por aplicação direta de carga nos topos;
- ao ensaio de compressão de provetes híbridos de laminados unidireccionais de carbono-epóxico e Araldite proposto por Neves (2009), mas usando topos de material cerâmico em vez dos topos metálicos usados por Rendeiro (2012);
- ao ensaio de flexão em 4 pontos com roletes de carregamento flexíveis de laminados unidireccionais, em vez dos laminados cruzados ensaiados por Rendeiro (2012).

Capítulo 2

Procedimiento Experimental



Capítulo 2 – Procedimento Experimental

O material utilizado neste trabalho foi um compósito produzido a partir de camadas de pré-impregnado carbono/epóxico SEAL HS 160 REM, nas quais as fibras estavam distribuídas unidireccionalmente. As placas foram fabricadas no Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia e Engenharia Industrial (INEGI) por prensagem a quente com sequências de empilhamento $[0]_{10}$, $[0]_{12}$ e $[0]_{20}$, que passam a ser designadas por C10, C12 e C20, respetivamente. As duas primeiras destinaram-se a ensaios de compressão e de flexão, enquanto que da placa mais espessa se obtiveram apenas provetes para ensaios à compressão. As propriedades deste material foram medidas anteriormente, e são as apresentadas a tabela 1.

Tabela 1: Propriedades da camada do carbono-epóxico usado. A espessura nominal da camada é 0.15 mm (Fernandes, 2011).

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}
130	8.2	4.1	0.28

Os provetes foram cortados das placas por jato de água na direção longitudinal e por disco de corte na direção transversal, resultando assim num número considerável de provetes, previamente numerados, de forma a saber-se a posição relativa dos mesmos nas placas, anteriormente ao corte. As designações e dimensões nominais dos provetes são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2: A designação é composta por 3 partes: o primeiro C significa "Camadas" e é seguido do número das mesmas. Segue-se um "C" ou um "F" conforme o tipo de ensaio a que se destina (Compressão ou Flexão). Por fim, k define apenas o número do teste.

Designação	Espessura t (mm)	Largura B (mm)	Comprimento L_t (mm)
C10Ck	1.55	15.0	30.0
C12Ck	1.62	15.0	30.0
C20Ck	2.96	20.0	30.0
C10Fk	1.55	15.0	Mais que 60.0
C12Fk	1.62	15.0	Mais que 60.0

Observações ao microscópio vieram a revelar que os provetes da placa C10 tinham alguns defeitos, nomeadamente, delaminagens visíveis nos bordos (figura 7). Estes defeitos podem ter sido gerados durante o fabrico ou durante a operação de corte por jato de água. Apesar destes defeitos, foram ensaiados provetes desta placa, pois isso permitia avaliar o efeito dos defeitos nos resultados.

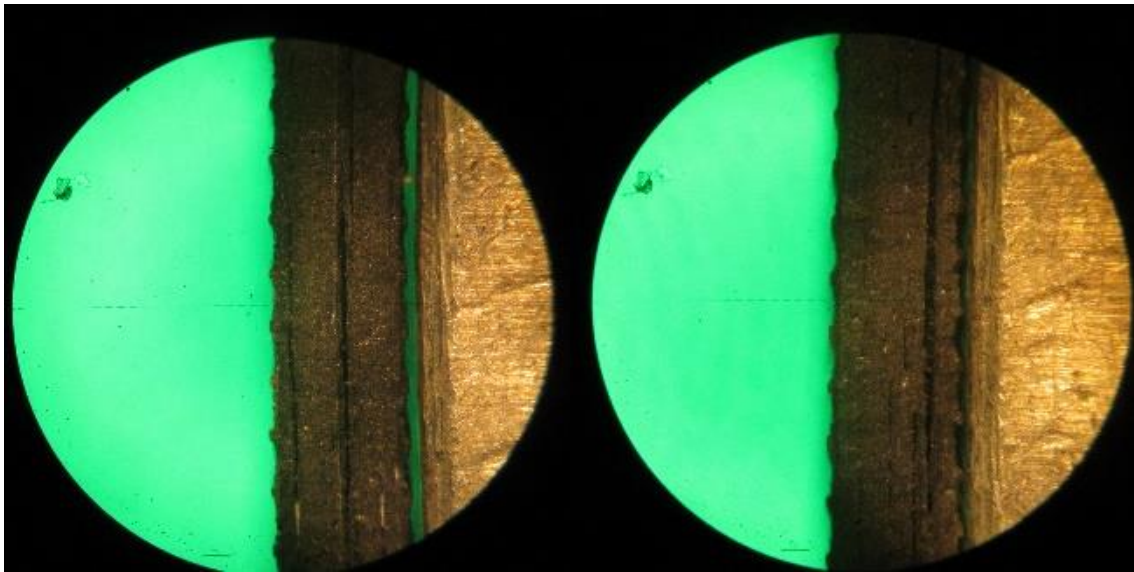


Figura 7: Fotografias obtidas através do microscópio dos defeitos presentes no provete C10F1 (Ampliação de 15x).

2.1 – Ensaios de compressão

Os provetes usados nos ensaios de compressão tinham de apresentar uma boa qualidade superficial dos topos onde era transmitida a carga, tendo-se utilizado um disco de corte abrasivo com refrigeração. Não se entendeu ser necessário qualquer tipo de polimento para garantir que estes estavam planos. A preparação foi idêntica para provetes simples ou híbridos, tendo em atenção o respeito pelas dimensões dos provetes e a perpendicularidade das faces sujeitas ao corte em relação à direção das fibras.

No sentido de eliminar os problemas de esmagamento dos topos dos laminados na transmissão de carga reportados por Rendeiro (2012) com insertos de aço INOX 304, os insertos

escolhidos neste caso foram de um material cerâmico, conhecido na indústria como “metal duro”. Este material, utilizado frequentemente em pastilhas de corte, é constituído por Carboneto de Tungsténio, Carboneto de Cobalto, entre outros. O material foi fornecido pela FREZITE – Ferramentas de Corte SA. A opção por este tipo de materiais vem da sua alta

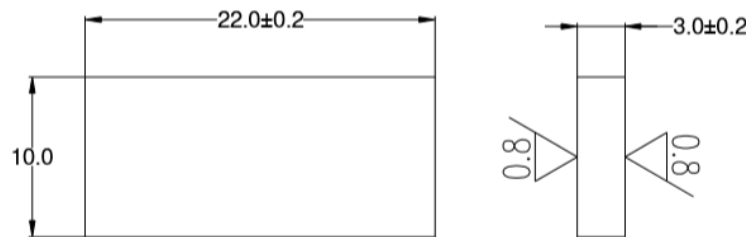


Figura 8: Desenho técnico do componente de metal duro K30, fornecido pela Frezite.

resistência à compressão, da ordem dos 3GPa, que é superior ao estimado para os materiais compósitos de fibra de carbono (CoorsTek, Inc., 2015). A figura 8 mostra as dimensões dos componentes adquiridos.

Inicialmente começou por se testar provetes C20C simples, com recurso aos inserts anteriormente referidos. Contudo os resultados de um primeiro ensaio não foram os desejados, ficando muito aquém da tensão de rutura esperada, pois o provete escorregou durante o ensaio. Posto isto, decidiu-se pela não utilização de qualquer tipo de inserto, Não obstante, como o modo de rutura continuou a não ser o desejado (esmagamento dos topos dos provetes), decidiu-se testar um provete híbrido constituído por duas chapas de alumínio que envolviam o laminado compósito. Teoricamente, a utilização do alumínio poderia reduzir o nível de esmagamento do compósito devido à dilatação associada ao coeficiente de Poisson. Estes provetes foram fabricados com recurso a três materiais: provetes da placa C20 previamente cortados pelo processo inicialmente descrito neste capítulo, chapas de alumínio cortadas na guilhotina disponível no Laboratório de Tecnologia Mecânica, e o adesivo *Araldite Standard*. Este foi usado para colar as chapas de alumínio ao laminado de carbono-epóxico. A cura foi feita durante 3 horas a 90°C.

No que diz respeito aos laminados das placas C10 e C12, recorreu-se a provetes híbridos com camadas de *Araldite Standard*, obtidos mediante o vazamento da cola em pequenos moldes de PTFE, no intuito de facilitar a sua desmoldação. Na verdade, foram testados 3 tipos de moldes, sendo que o último se revelou mais eficaz. Inicialmente, tentou-se utilizar um molde onde era colocado o provete na horizontal (Molde I – figura 9, à esquerda), em cima do qual era vertida a resina. Porém, este método não se revelou adequado, porque o provete era difícil de retirar e também porque a camada de resina não estava plana, o que traria problemas na colocação da restante. Ainda nesta primeira fase tentou usar-se uma bomba de vácuo com o objetivo de retirar as bolhas de ar que ficavam presas na resina. Contudo, este processo mostrou-se dispendioso, porque além de necessitar de um molde com cerca de dez vezes a dimensão utilizada, também a quantidade de resina a depositar era muito superior ao utilizado, o que levaria a um desperdício pela sua alta adesão às paredes do molde.

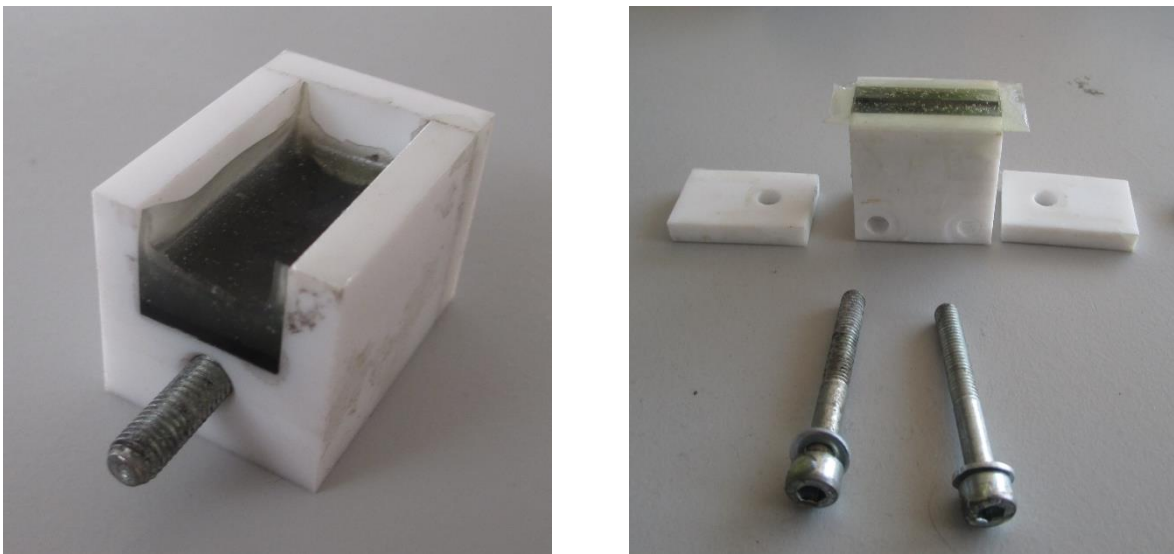


Figura 9: Moldes em PTFE para fabrico dos provetes híbridos de Araldite: Molde I (à esquerda) e Molde III (à direita).

O segundo molde era similar, mas agora com o provete na vertical de modo a que se colocasse a resina dos dois lados simultaneamente e de forma a todo o provete fosse plano, contudo o problema da desmoldação continuava presente, sendo difícil de executar. Para contornar estes problemas decidiu-se pela segunda opção, mas na qual todas as paredes são



amovíveis (Molde III – figura 9, à direita), de forma a permitir que todas as faces pudessem destacar-se e facilitar a desmoldação do provete.

Nos ensaios dos provetes simples e de híbridos compostos de alumínio recorreu-se à máquina SHIMADZU AG-X plus 100kN, presente no Laboratório de Ensaios Mecânicos 2 (figura 10). De facto, pensou-se que estes ensaios iriam envolver cargas acima dos 50kN de capacidade da máquina SHIMADZU AG-50kNG do Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica. Tal não veio a verificar-se, pelo que os ensaios dos provetes híbridos com adesivo epóxico acabaram por ser feitos nesta última. Todos os ensaios de compressão foram realizados com uma velocidade de 0.5 mm/minuto, com a transmissão direta da carga nos topos dos provetes.



Figura 10: Fotografia de um ensaio de provete híbrido C20C com alumínio.

As deformações nos provetes híbridos com resina epóxida foram obtidas usando o videoextensómetro MESSPHYSIC ME 46 NG, que, ligado ao *software* Dotmeas, media os deslocamentos das marcas colocadas nos provetes, como mostra a figura 11. Nos restantes ensaios os pontos carga-deslocamento foram medidos apenas com recurso ao transdutor da máquina. Nestes casos, procedeu-se a medições prévias da flexibilidade dos sistemas de carga, para depois calcular os deslocamentos reais dos provetes.

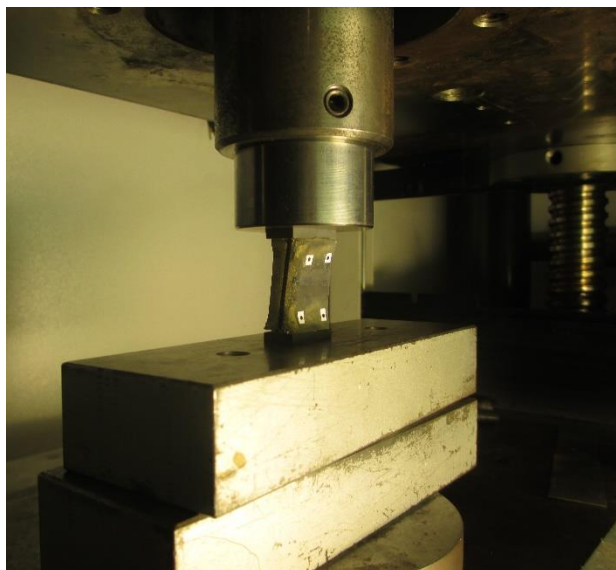


Figura 11: Fotografia tirada no decorrer de um ensaio onde se podem ver as 4 marcas óticas que serviram para a medição dos deslocamentos pelo videoextensómetro.

2.2 – Ensaio de flexão

Os ensaios foram realizados na referida máquina SHIMADZU AG-50kNG. Utilizou-se uma célula de carga secundária, SHIMADZU SLBL-5kN, visto que os limites de força esperados eram substancialmente mais baixos que os 50kN de capacidade da célula base da máquina.

Usou-se o ensaio em 4 pontos com vão $L = 60$ mm (figura 6-b), distância entre pontos de carregamento $L_s = 20$ mm, e velocidade de 2 mm/min. Para minimizar tensões de esmagamento que antecipam a rutura à compressão, usaram-se roletes de carregamento de PTFE com diâmetro 6 mm. Como a flexibilidade dos roletes teria influência nos deslocamentos medidos pelo travessão da máquina mediram-se os deslocamentos em 3 pontos dos provetes com o videoextensómetro MESSPHYSIC ME 46 NG (figuras 12 e 13). Para isso, a preparação de cada provete incluiu a colagem de três marcas óticas.

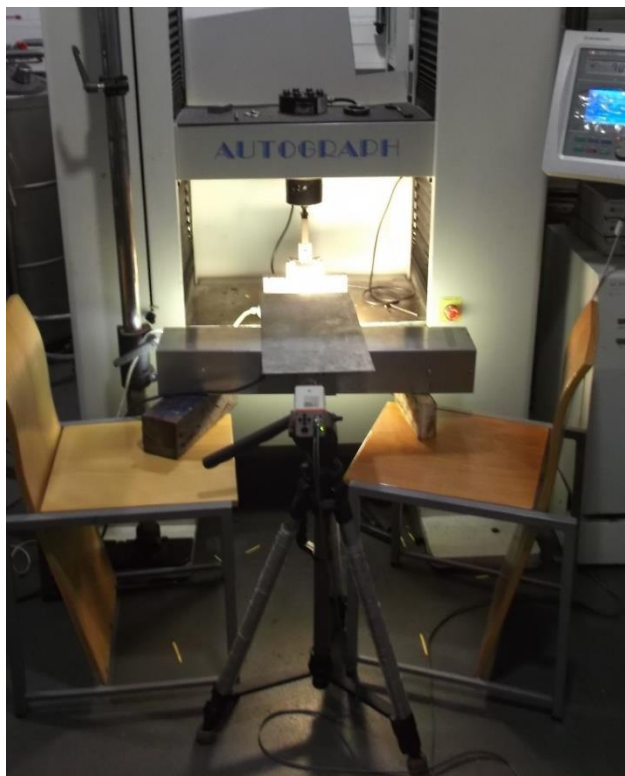


Figura 12: Montagem e *hardware* utilizados nos ensaios de flexão.

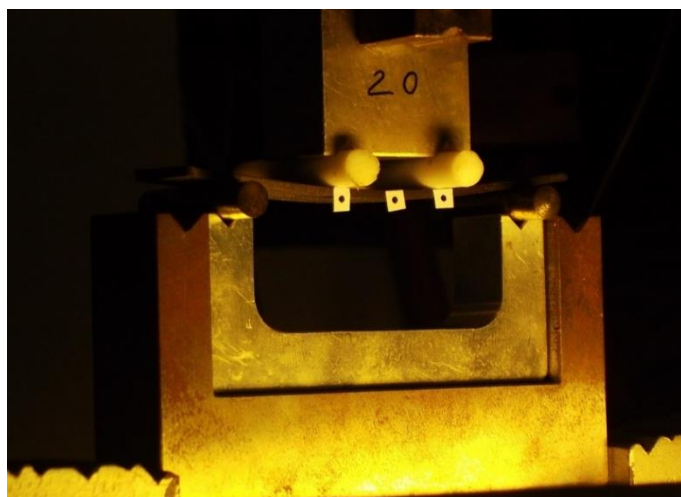


Figura 13: Fotografia que mostra a colocação das marcas extensométricas utilizadas nos ensaios de flexão.



A calibração foi feita através do *software* Dotmeas (figura 14), após ter sido medida a distância entre os pontos com recurso ao microscópio Mitutoyo TM disponível no mesmo laboratório. De notar que esta distância foi utilizada inicialmente para verificar se o *software* adquiria corretamente os dados, se bem que com algum ruído, e se as condições de iluminação eram adequadas.

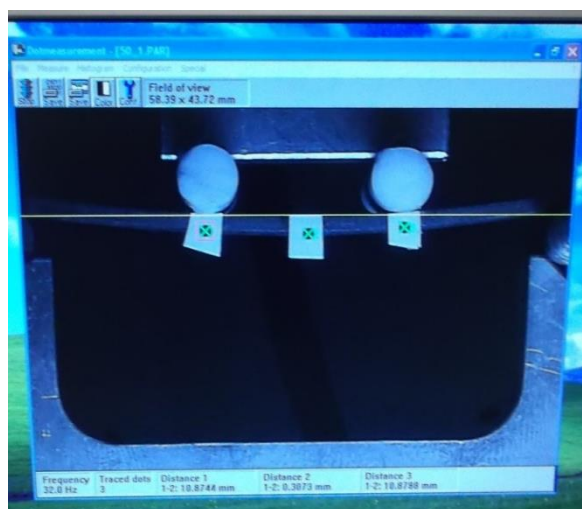


Figura 14: Fotografia da medição realizada pelo videoextensómetro para medição dos três pontos, por meio do *software* Dotmeas.

Capítulo 3

Tratamiento de resultados

Capítulo 3 – Tratamento de Resultados

3.1 – Ensaio de compressão

Depois de realizados os ensaios, procedeu-se ao tratamento dos dados obtidos, transformando as medições feitas pela máquina e pelo videoextensómetro em curvas força-deslocamento e, posteriormente, em curvas de tensão-deformação. Tendo estas curvas, calcularam-se as propriedades pretendidas.

Em primeiro lugar, constatou-se que a parte inicial das curvas apresentava um comportamento não linear que advinha da acomodação da carga no provete. Este efeito pode ser acentuado por possíveis desalinhamentos, excesso de resina em pequenas zonas da face de contacto entre o provete e máquina, e folgas nos componentes da máquina. Logo, havia que descartar estes valores e substituí-los pela extrapolação da zona linear subsequente, determinada pela regressão linear e usada para cálculo dos módulos de Young. A figura 15 exemplifica o efeito deste tratamento.

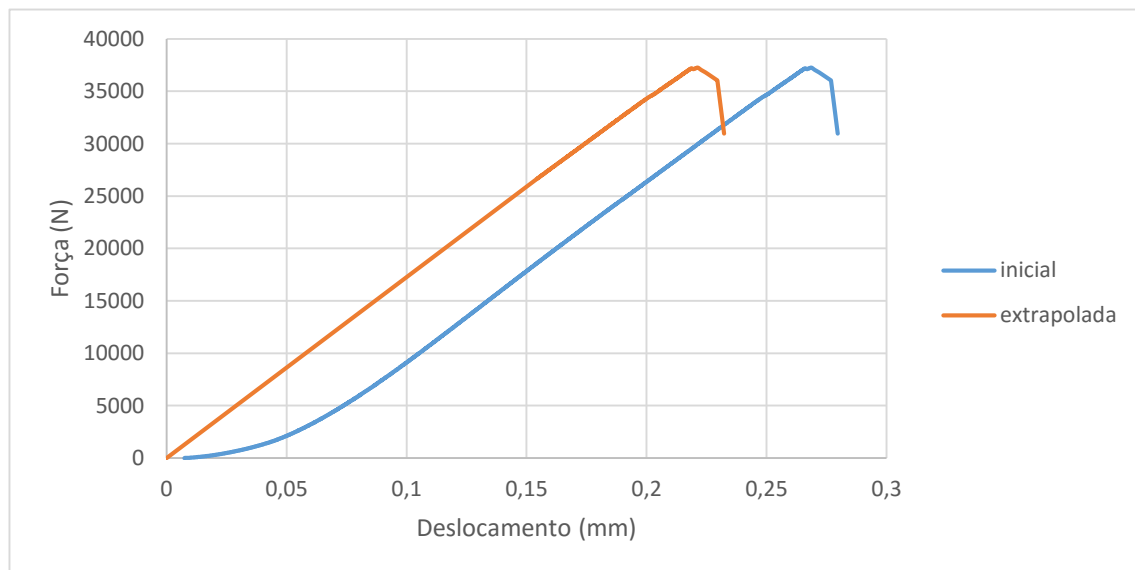


Figura 15: Curva força-deslocamento de um ensaio à compressão: linearização da curva. Azul- curva inicial; Laranja - curva linearizada por extrapolação.

Nos ensaios em que se usou o transdutor de deslocamento da máquina, os deslocamentos reais δ_{real} foram obtidos dos deslocamentos aparentes $\delta_{aparente}$ descontando o efeito da flexibilidade do sistema de carregamento C_{SC} ,

$$\delta_{real} = \delta_{aparente} - C_{SC}P \quad (1)$$

Sendo P a carga medida.



Nos provetes híbridos foi necessário descontar a carga suportada pelo alumínio ou pelo adesivo, de modo a obter a carga no compósito. Para isso usou-se a curva tensão-deformação da Araldite Standard (figura 16) medida anteriormente por Faria (2010) e a curva tensão-deformação do Alumínio, que foi medida em ensaios prévios (figura 17).

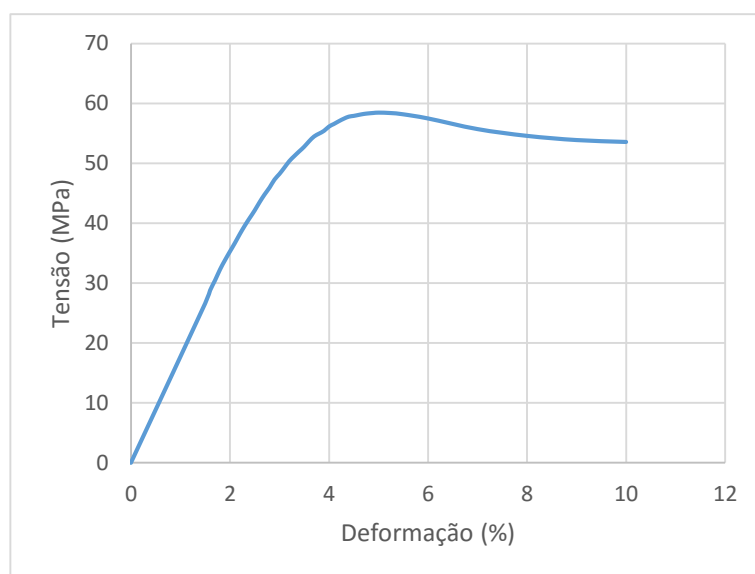


Figura 16: Curva tensão-deformação da Araldite Standard (Faria, 2010).

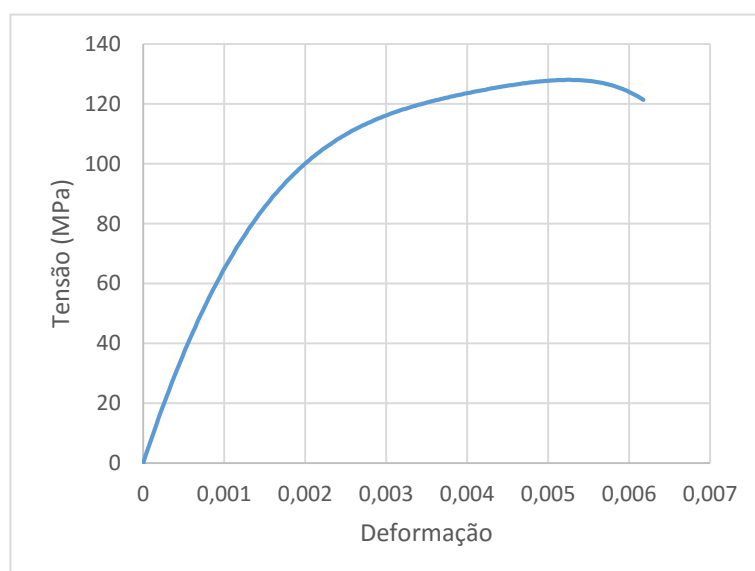


Figura 17: Curva tensão-deformação do Alumínio utilizado nos provetes C20C.



O cálculo das tensões no compósito e do respetivo módulo de Young baseou-se nas seguintes expressões:

$$E_{compósito} = \frac{E_{provete} - E_{material2} * V_{material2}}{V_{compósito}} \quad (2)$$

$$\sigma_{compósito} = \frac{\sigma_{provete} - \sigma_{material2} * V_{material2}}{V_{compósito}} \quad (3)$$

Em que V é a fração volúmica e “material2” designa o Alumínio ou a *Araldite Standard*.

3.2 – Ensaios de flexão

Nos ensaios de flexão em 4 pontos procedeu-se ao cálculo do módulo de elasticidade à flexão, E_f , e da tensão de rutura à flexão, σ_{uf} através das expressões obtidas pela Teoria da Vigas (Hodgkinson, 2000) (a dedução encontra-se no **Anexo A**).

$$E_f = \frac{0.21mL^3}{Bh^3} \quad (4)$$

$$\sigma_{uf} = \frac{P_u L}{Bh^3} K_d \quad (5)$$

em que m é o declive da zona linear inicial da curva carga (P)-deslocamento a meio vão (δ) descontado do efeito do corte transversal, P_u é a carga de rutura e

$$K_d = 1 + 4.7 \left(\frac{\delta}{L}\right)^2 - \frac{7.04h\delta}{L^2} \quad (6)$$

é um fator de correção para não-linearidade geométrica.

Face à utilização de roletes flexíveis, entendeu-se usar verificar os resultados destas equações mediante formas alternativas para calcular o módulo e a tensão de rutura. De facto, com os deslocamentos medidos nos três pontos (figuras 13 e 14), calculou-se a encurvadura de flexão, que facilmente se relaciona com o módulo através da teoria das vigas. Verificou-se boa concordância entre estas duas abordagens. Além disso, realizaram-se também análises



por elementos finitos descritas posteriormente para comparar as curvas carga-deslocamento previstas com as experimentais.

Capítulo 4

Resultados Experimentais



Capítulo 4 – Resultados Experimentais

4.1 – Ensaios de compressão

4.1.1 – Provetes Simples C20C

A figura 18 apresenta as curvas tensão-deformação tratadas de todos os ensaios de compressão dos provetes simples de laminados C20C. As propriedades estão resumidas na tabela 3.

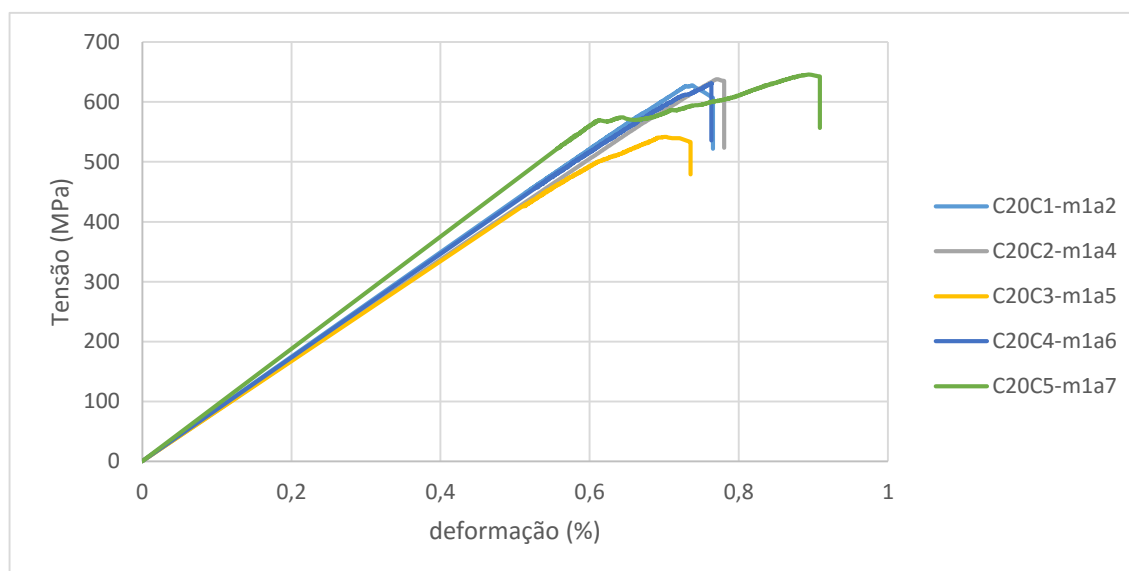


Figura 18: Curvas de tensão-deformação para os ensaios de compressão realizados em provetes simples C20C.

Tabela 3: Resultados dos ensaios de compressão realizados em provetes simples C20C. O “*” significa que este resultado não foi utilizado nos cálculos por se encontrar fora do intervalo dos outros resultados.

	E_l (MPa)	σ_{uc1} (MPa)	ε_{uc1} (%)
C20C1-m1a2	87603.66	627.6167	0.765291
C20C2-m1a4	84166.63	638.0007	0.780548
C20C3-m1a5	83172.56	541.8931*	0.735421
C20C4-m1a6	86612.17	631.1907	0.764230
C20C5-m1a7	93788.97	645.7226	0.908886
Média	87068.8	635.6327	0.790875
Desvio Padrão (%)	4.2745	1.0883	7.6856

Observa-se que nem módulo longitudinal (E_1) nem tensão de rutura (σ_{uc1}) apresentam valores próximos dos esperados para estes laminados compósitos de fibra de carbono-epóxico, que seriam cerca de 130GPa e de 1500 a 2000 MPa, respetivamente. Embora o módulo medido em ensaios de compressão seja mais baixo que em ensaios à tração (Hodgkinson, 2000), o valor aqui obtido foi certamente afetado por desalinhamentos na aplicação de carga. No que diz respeito à tensão de rutura, os valores muito baixos deveram-se ao esmagamento prematuro dos topos (figuras 19 a 22).

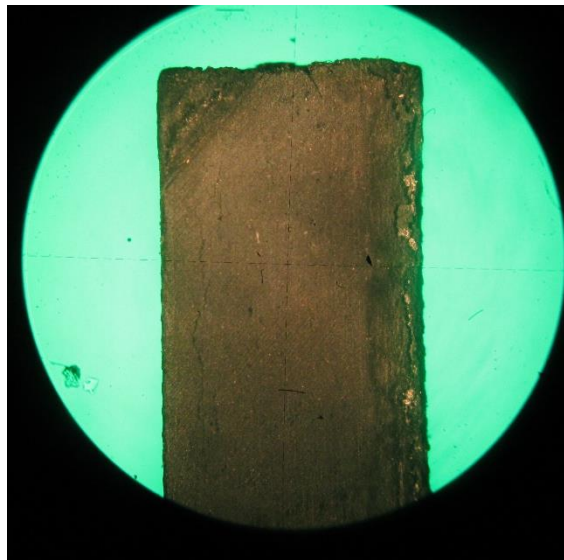


Figura 19: Fotografia vista de cima de um topo que colapsou por deslizamento das camadas (ampliação de 15x).

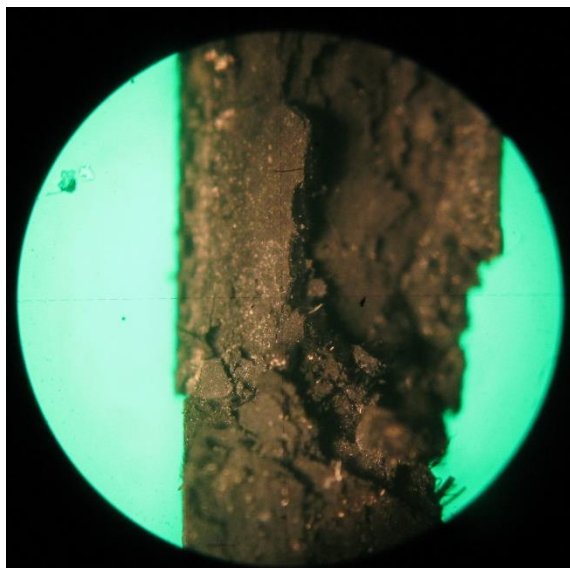


Figura 20: Fotografia vista de cima de um topo totalmente destruído (ampliação de 15x).

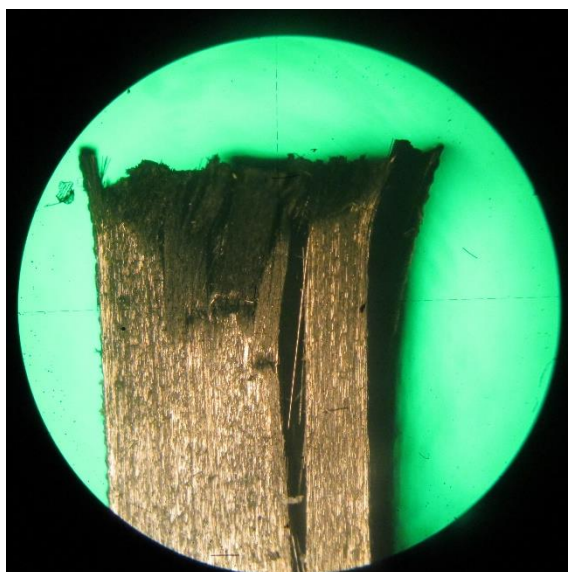


Figura 21: Fotografia de um topo totalmente esmagado, levando à destruição do mesmo (ampliação de 15x).

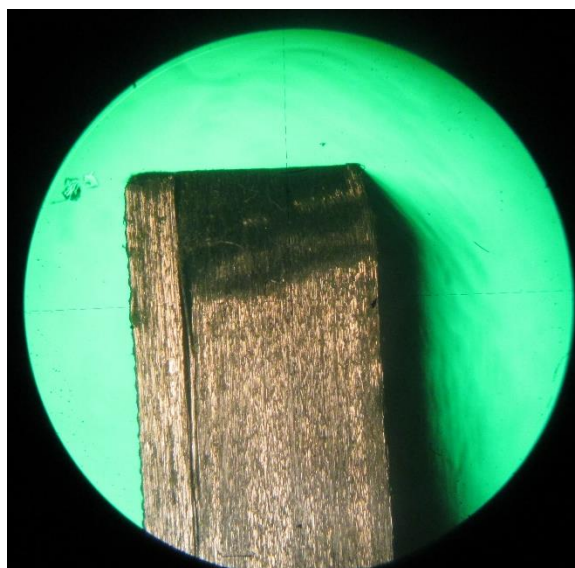


Figura 22: Fotografia de um topo que colapsou por deslizamento das fibras (ampliação de 15x).

4.1.2 – Provetes Híbridos C20C com Alumínio

Efetuararam-se apenas dois ensaios com provetes híbridos C20C com alumínio, pois verificou-se que os resultados ficavam muito aquém das expectativas. A figura 23 e a tabela 4 mostram que os resultados foram até inferiores aos dos provetes simples.

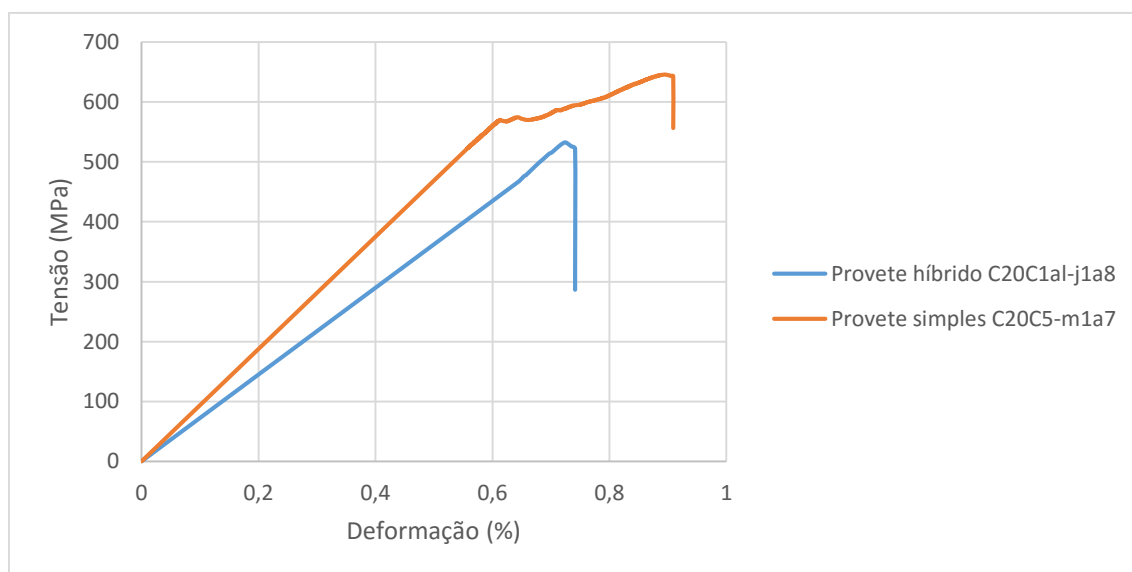


Figura 23: Gráfico comparativo das curvas de tensão-deformação do compósito num provete híbrido (azul) e de um provete simples (laranja).

Tabela 4: Comparação de resultados de ensaio de compressão do compósito num provete híbrido C20C com alumínio e de um provete simples C20C.

	E_1 (MPa)	σ_{uc1} (MPa)	ε_{uc1} (%)
<i>C20C1al-j1a8</i>	39897.96	532.5088	0.741072
<i>C20C5-m1a7</i>	93788.97	645.7226	0.908886
<i>Diferença (%)</i>	57.46	17.53	18.46

Na realidade como se pode observar nas figuras 24 e 25, continuou a haver o problema de esmagamento dos topos. Além disso, houve também descolamento do Alumínio e rutura na direção paralela às fibras que, aparentemente, deram origem a encurvadura de uma das chapas de Alumínio.

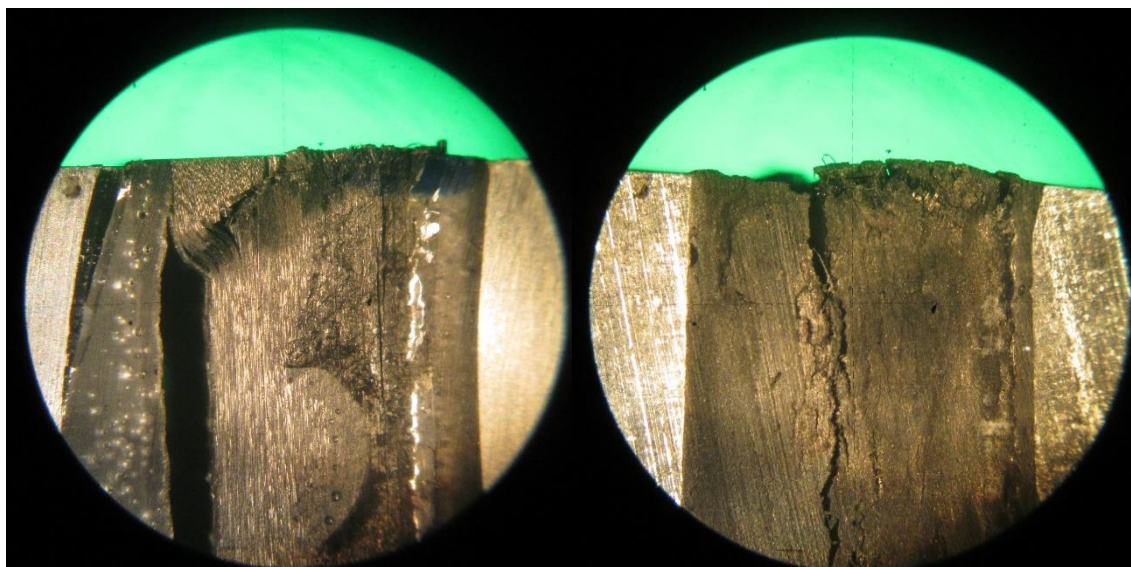


Figura 24: Fotografias ao microscópio da descolagem da chapa de Alumínio (à esquerda) e do esmagamento do topo (em ambas, mas visto de cima à direita) (ampliação de 15x).

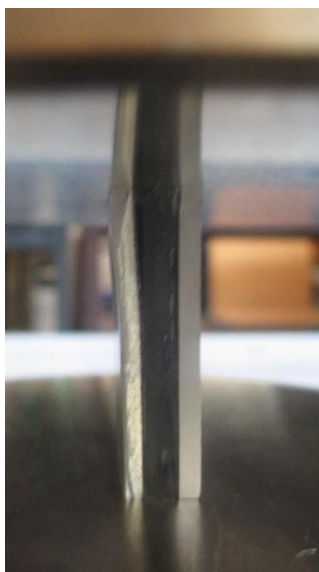


Figura 25: Fotografia de um dos provetes C20Ck-al no decorrer do ensaio.

4.1.3 – Provetes Híbridos C10C e C12C com *Araldite*

As figuras 26 e 27 apresentam os gráficos tensão-deformação dos provetes C10C e C12C respetivamente. Nota-se uma dispersão elevada, que fez com que alguns dos resultados fossem excluídos do cálculo da média e desvio padrão (tabelas 5 e 6).

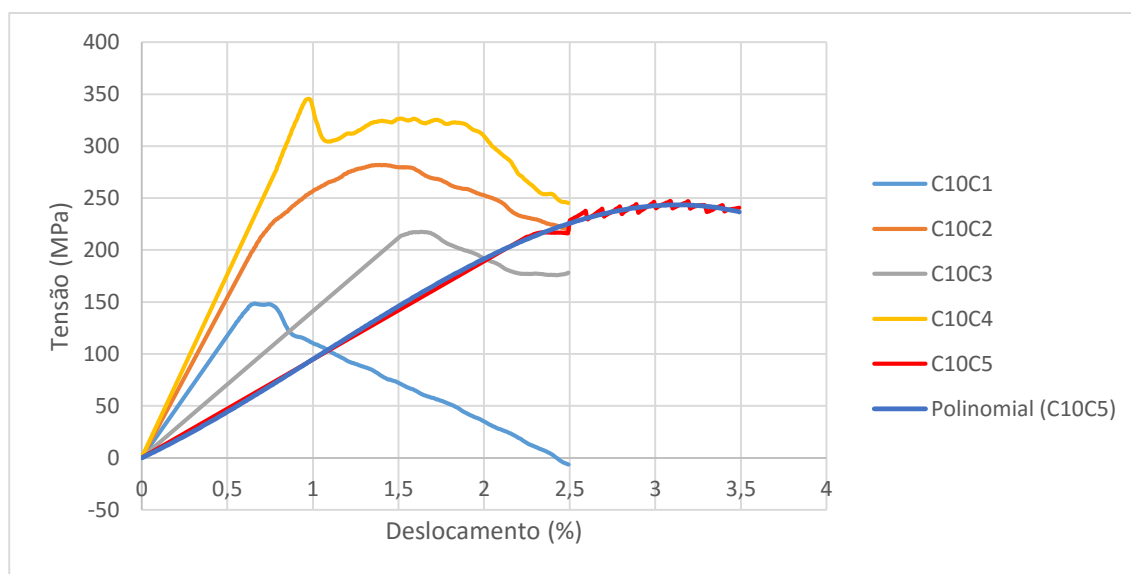


Figura 26: Gráfico tensão-deformação dos ensaios de compressão dos compostos em provetes híbridos C10C com *Araldite Standard*.

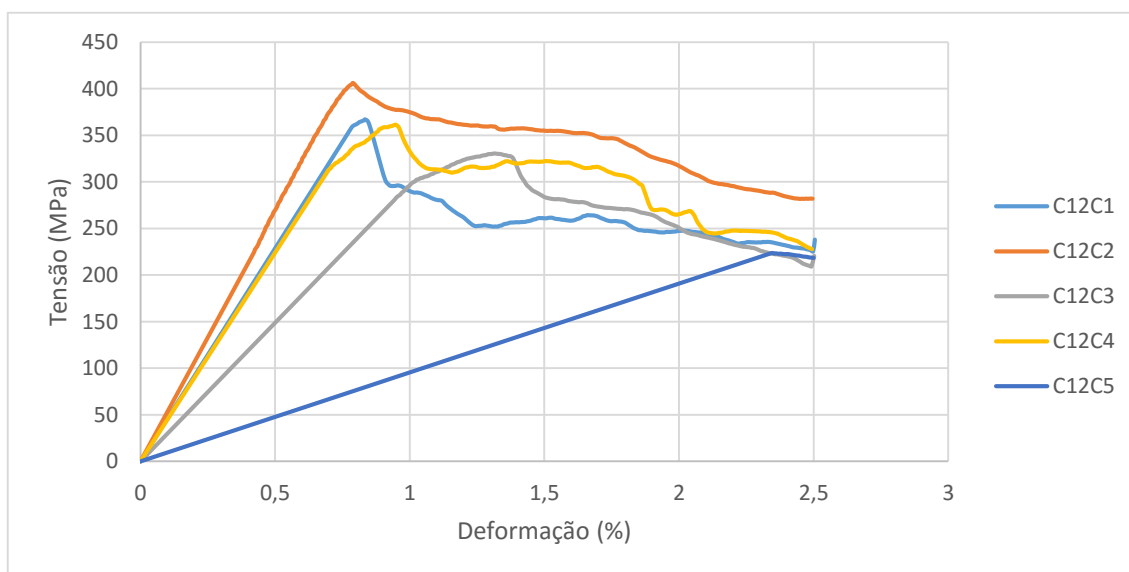


Figura 27: Gráfico tensão-deformação dos ensaios de compressão dos compostos em provetes híbridos C12C com *Araldite Standard*.



Tabela 5: Resultados dos ensaios de compressão realizados em provetes híbridos C10C. O “*” significa que este resultado não foi utilizado nos cálculos por se encontrar fora do intervalo dos outros resultados.

	E_l (MPa)	σ_{uc1} (MPa)
<i>C10C1</i>	23598.47*	148.6547*
<i>C10C2</i>	30837.19	281.9272
<i>C10C3</i>	24512.81	217.4608
<i>C10C4</i>	34789.25	345.3997*
<i>C10C5</i>	13882.92*	246.8939
<i>Média</i>	30046.42	248.7606
<i>Desvio Padrão (%)</i>	14.0863	10.5931

Tabela 6: Resultados dos ensaios de compressão realizados em provetes híbridos C12C. O “*” significa que este resultado não foi utilizado nos cálculos por se encontrar fora do intervalo dos outros resultados.

	E_l (MPa)	σ_{uc1} (MPa)
<i>C12C1</i>	49505.15	366.9680
<i>C12C2</i>	53359.16	406.0362*
<i>C12C3</i>	29807.28*	330.5865
<i>C12C4</i>	44873.49	361.0941
<i>C12C5</i>	19478.58*	240.1091*
<i>Média</i>	49245.93	352.8829
<i>Desvio Padrão (%)</i>	7.0445	4.5191

Os fracos resultados obtidos explicam-se pelo facto da rutura se ter iniciado nos topos, com esmagamento, rutura transversal ou descolamento do adesivo, conduzindo à encurvadura do laminado. Os provetes C10C, de menor espessura, e com os defeitos acima mencionados, foram os mais afetados.

4.2 – Ensaio de flexão

As figuras 28 e 29 mostram as curvas carga-deslocamento, enquanto que as tabelas 7 e 8 resumem os valores do módulo à flexão e da tensão de rutura.

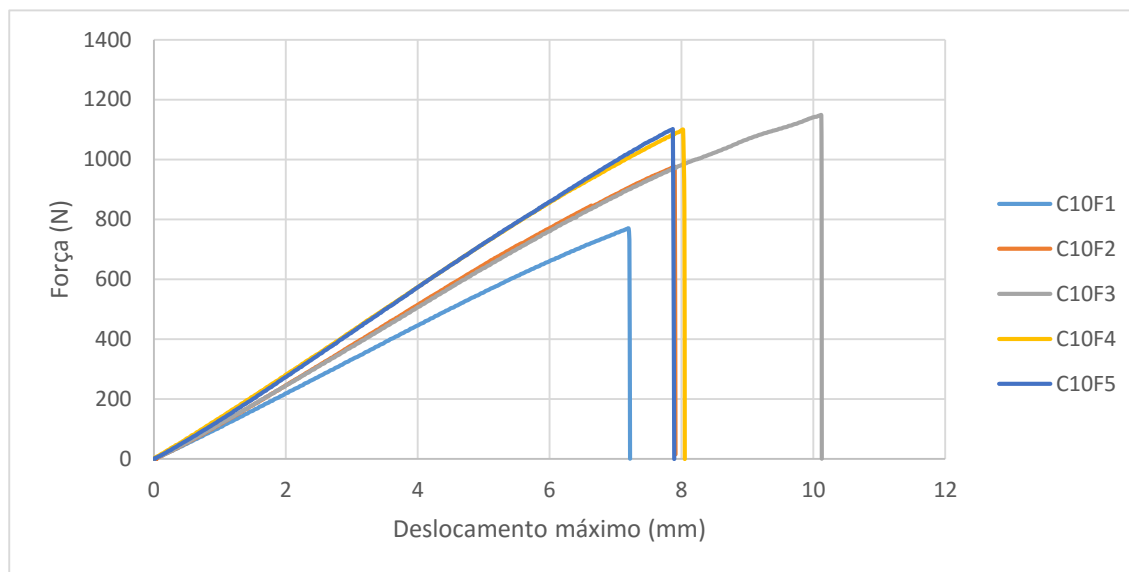


Figura 28: Curvas carga-deslocamento a meio-vão dos ensaios à flexão dos provetes C10F.

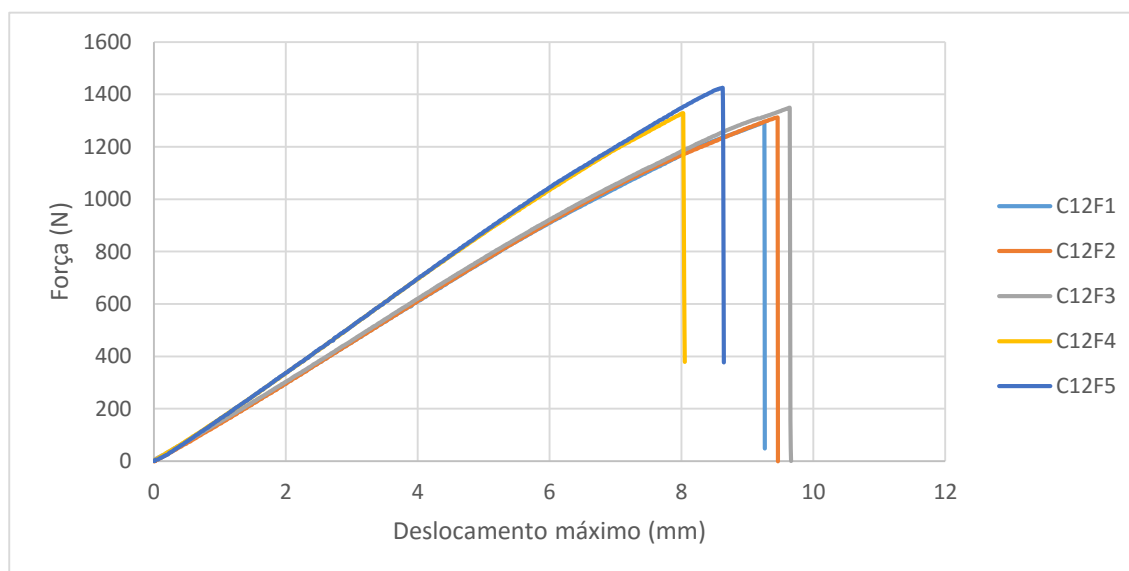


Figura 29: Curvas carga-deslocamento a meio-vão dos ensaios à flexão dos provetes C12F



Tabela 7: Resultados dos ensaios à flexão de provetes C10. O “*” significa que este resultado não foi utilizado nos cálculos por se encontrar fora do intervalo dos outros resultados.

	<i>Módulo elasticidade à flexão (GPa)</i>	<i>Tensão rutura (sem correção) (MPa)</i>	<i>Tensão rutura (com correção) (MPa)</i>
<i>C10F1</i>	96.332*	1300.877*	1409.967*
<i>C10F2</i>	116.318	1660.516	1807.066
<i>C10F3</i>	109.655	1902.722	2077.880
<i>C10F4</i>	127.377	1874.025	1986.316
<i>C10F5</i>	124.452	1827.560	1956.943
<i>Média</i>	119.450	1816.206	1957.051
<i>Desvio Padrão (%)</i>	6.726	5.964	5.747

Tabela 8: Resultados dos ensaios à flexão de provetes C12.

	<i>Módulo elasticidade à flexão (GPa)</i>	<i>Tensão rutura (sem correção) (MPa)</i>	<i>Tensão rutura (com correção) (MPa)</i>
<i>C12F1</i>	120.047	2041.789	2211.121
<i>C12F2</i>	117.039	2018.142	2191.343
<i>C12F3</i>	119.669	2092.304	2282.561
<i>C12F4</i>	132.637	2031.683	2150.676
<i>C12F5</i>	132.354	2171.734	2323.014
<i>Média</i>	124.349	2071.130	2232.143
<i>Desvio Padrão (%)</i>	6.053	3.034	3.119

Os resultados obtidos para os ensaios à flexão são claramente muito satisfatórios, mesmo para os provetes C10F, apesar dos defeitos acima referidos. De facto, os resultados apresentam baixa dispersão e valores próximos do esperado para as propriedades medidas anteriormente em ensaios de tração (tabela 1).

Por outro lado, verificou-se que os deslocamentos relativamente elevados tornaram as correções para não-linearidade geométrica significativas (tabelas 7 e 8). Atendendo a que

foram também usados roletes flexíveis, entendeu-se realizar análises por elementos finitos com o *software Abaqus, Student Edition*.

Devido à simetria do carregamento, modelou-se apenas meio provete (figura 30) com elementos bidimensionais de estado plano de tensão e modos incompatíveis (CPS4I). O rolete de apoio foi modelado por uma superfície rígida, enquanto que o rolete de carregamento foi modelado por elementos triangulares quadráticos de estado plano de tensão (CPS6). Definiram-se superfícies de contacto entre este último e o provete. As propriedades dos materiais usadas nas simulações são dadas nas tabelas 9 e 10. No caso do compósito, corresponderam às propriedades médias.

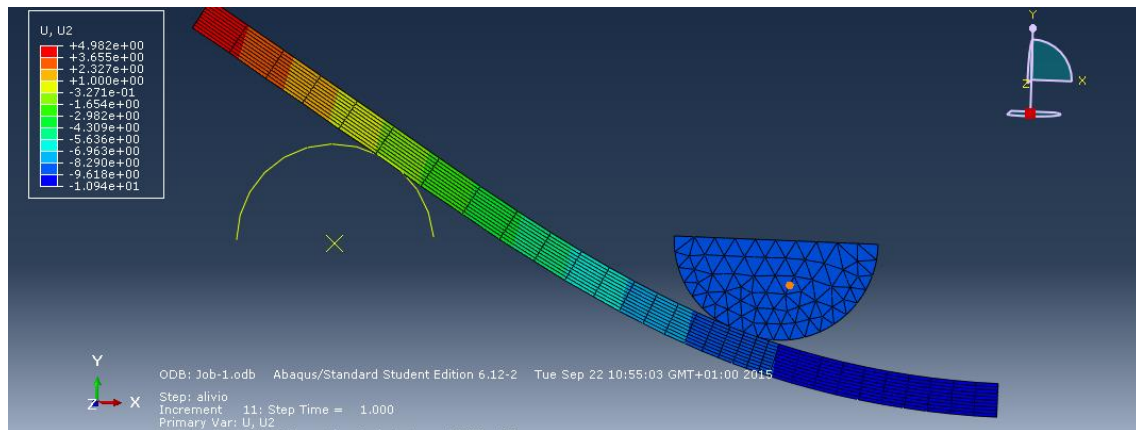


Figura 30: Modelo de elementos finitos do ensaio de flexão em 4 pontos (deslocamento U2).

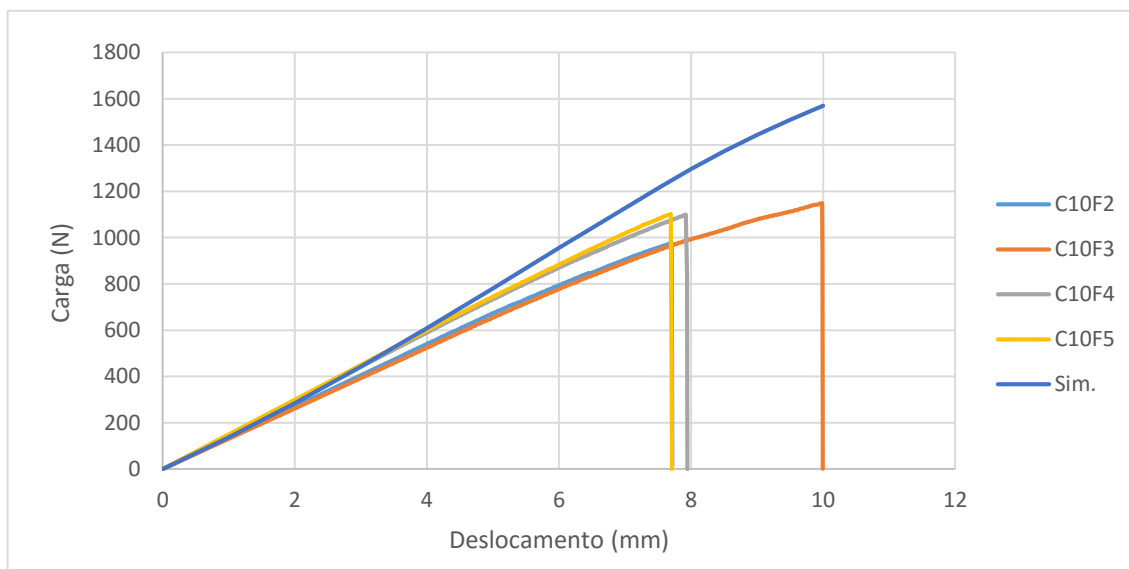
Tabela 9: Propriedades do compósito carbono-epóxico utilizadas nas simulações.

Material	Placa	Espessura (mm)	Tipo	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	ν_{12}	G_{12} (MPa)	G_{13} (MPa)	G_{23} (MPa)
Fibras de carbono	C10	1.557	Lamina	119450	8200	0.28	4100	4100	2890
	C12	1.616		124349					

**Tabela 10:** Propriedades dos roletes flexíveis de PTFE (*DuPont, 1996*).

<i>Material</i>	<i>Tipo de Material</i>	<i>Módulo de Young (MPa)</i>	<i>Coefficiente de Poisson</i>
<i>PTFE</i>	Isotrópico	551.6	0.46

As figuras 31 e 32 comparam os resultados das simulações com as curvas carga-deslocamento experimentais. Pode-se observar que as simulações tendem a sobrestimar as cargas à medida que as curvas se aproximam da rutura. As diferenças são maiores para os provetes C10, o que se deve certamente ao facto dos provetes terem defeitos. Nos provetes C12 há também diferenças relevantes. Isto indica que o compósito apresenta um comportamento tensão-deformação não-linear perto da rutura, o que se compreende, face aos valores elevados das tensões medidas (tabelas 7 e 8).

**Figura 31:** Curvas carga-deslocamento a meio-vão dos ensaios à flexão dos provetes C10F comparadas com a curva prevista pela simulação.

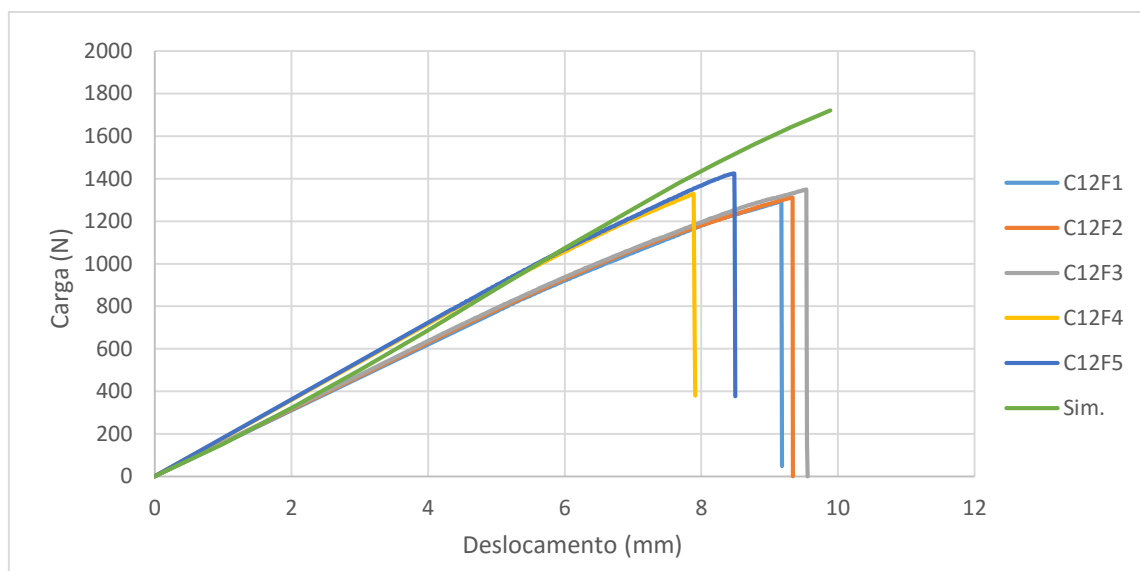


Figura 32: Curvas carga-deslocamento a meio-vão dos ensaios à flexão dos provetes C12F comparadas com a curva prevista pela simulação.

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros



Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros

Conforme previsto, realizaram-se ensaios de compressão por transmissão direta de carga e ensaios de flexão em quatro pontos de provetes laminados de carbono/epóxico unidirecionais.

Os ensaios à compressão realizados apresentaram resultados muito aquém do esperado para laminados compósitos unidirecionais carbono/epóxico. Isto pode acontecer por várias razões, tais como desalinhamento das fibras pós corte por jato de água, desalinhamento dos próprios provetes no decorrer dos ensaios, má preparação dos topos, existência de defeitos locais, ou falta de suporte lateral pelos materiais usados nos provetes híbridos. De facto, estes últimos descolaram do compósito prematuramente. Em trabalhos futuros, dever-se-ão estudar melhorias na preparação dos provetes, por exemplo, através da retificação dos topos e do aumento da resistência da ligação do adesivo ao compósito.

Ao invés, os ensaios à flexão apresentaram resultados muito satisfatórios, mostrando que, tal como nos ensaios realizados em provetes cruzados por Rendeiro (2012), os ensaios deste tipo funcionam muito bem em provetes unidirecionais. Os roletes flexíveis propostos e utilizados por Rendeiro (2012) revelaram-se uma boa opção a utilizar nos ensaios deste tipo, como já tinha sido mostrado por este autor. O método utilizado para medição dos deslocamentos nos vários pontos também se mostrou eficaz, transmitindo uma maior confiança na análise dos resultados. A análise foi aprofundada com simulações por elementos finitos, que mostraram algumas discrepâncias perto da carga de rutura. A explicação mais provável é o compósito apresentar um comportamento tensão-deformação não-linear perto da rutura, devido aos valores elevados de tensões atingidas. Este aspeto deve ser investigado em trabalhos futuros que envolvam medições de deformações longitudinais, por exemplo, extensómetros, ou mesmo correlação digital de imagem. Deve-se também estudar a aplicação deste ensaio a provetes mais espessos de modo a reduzir a não-linearidade geométrica observada.

Referências
Bibliográficas



Referências bibliográficas

- Adams, D. (5 de janeiro de 2005). *Current Compression Test Methods*. Obtido de Composites World: <http://www.compositesworld.com/articles/current-compression-test-methods>
- Adams, D. (1 de janeiro de 2006). *Unidirectional composite axial tensile specimens*. Obtido de Composites World: <http://www.compositesworld.com/articles/unidirectional-composite-axial-tensile-specimens>
- CoorsTek, Inc. (2015). *Ceramic Properties Standard*. USA.
- DuPont. (1996). *Teflon PTFE - Fluoropolymer Resin - Properties Handbook*. USA.
- Faria, R. (2010). *Caraterização do comportamento mecânico de adesivos epóxicos*. Aveiro: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- Fernandes, V. (2011). *Fissuração transversal e delaminação em laminados cruzados*. Aveiro: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- Hodgkinson, J. (2000). *Mechanical testing of advanced fiber composites*. Woodhead Publishing Ltd.
- Lee, J. S. (2006). *A study on the composites strength of thick carbon fibre-epoxy laminates*. UK: ELSEVIER.
- Moura, M. F. (2005). *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Publindústria.
- Neves, V. (2009). *Comportamento mecânico de compósitos*. Aveiro: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- Rendeiro, F. (2012). *Caraterização do comportamento à compressão de laminados compósitos*. Aveiro: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- Schneider, K. (2005). *Determination of Compressive Properties of Fibre Composites in the In-plane Diretion According to ISO 14126. Part 1: Round Robin Test*. dresden, Germany: Springer.
- Squires, C. A. (2006). *Understanding the factors affecting the compressive testing of unidirectional carbon fiber composites*. UK: ELSEVIER.
- Wolfe, A. R. (2004). *Compression Testing - Comparison of Various Test Methods. Composites 2004 Convention and Trade Show*. Tampa, FL USA: American Composites Manufactures Association.

Anexos



Anexo A - Dedução das fórmulas para cálculo das propriedades:

Recorrendo às funções com singularidade e à Teoria das Vigas (ver, por exemplo, F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf - Mecânica dos Materiais. McGraw-Hill), a função momento fletor pode ser expressa por

$$M = Px - P \langle x - L_1 \rangle \quad (\text{A.1})$$

para $0 \leq x \leq L/2$ (figura 6) e tomando $L_1 = (L - L_s)/2$. Usando a teoria das vigas de Bernoulli,

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (\text{A.2})$$

em que v é o deslocamento, E é o módulo de Young e $I = bh^3/12$ o segundo momento de área, a integração permite obter as rotações

$$EI\theta = P \frac{x^2}{2} - \frac{P}{2} \langle x - L_1 \rangle^2 + C_1 \quad (\text{A.3})$$

em que C_1 é uma constante de integração. Definindo a coordenada do meio vão $L_2 = L/2$ e impondo a condição de simetria

$$\theta(L_2) = 0 \Leftrightarrow C_1 = \frac{P}{2} [(L_2 - L_1)^2 - L_1^2] = \frac{PL_1}{2} (L_1 - 2L_2) \quad (\text{A.4})$$

A integração de (A.3) dá campo de deslocamentos

$$EIv = P \frac{x^3}{6} - \frac{P}{6} \langle x - L_1 \rangle^3 + C_1 x + C_2 \quad (\text{A.5})$$

E a condição de fronteira

$$v(0) = 0 \Leftrightarrow C_2 = 0 \quad (\text{A.6})$$

Pode-se agora calcular o deslocamento máximo a meio-vão a partir de

$$\frac{EI}{P} v(L_2) = \frac{L_1}{6} (L_1^2 - 3L_2^2) \quad (\text{A.7})$$

Definindo a rigidez



$$m = \frac{2P}{v(L_2)} \quad (\text{A.8})$$

calcula-se o módulo de

$$E = \frac{12}{bh^3} \frac{L_1}{12} (L_1^2 - 3L_2^2) m \quad (\text{A.9})$$

Face à geometria adotada (ver Capítulo 2.2) - $L = 60$ mm, $L_s = 20$ mm (Figura 6), e portanto $L_1 = 20$ mm e $L_2 = 30$ mm – obtém-se a equação (4).

Na realidade, para maior rigor, o deslocamento $v(L_2)$ medido experimentalmente deve ser descontado do efeito do corte transversal, que é dado por

$$v = \frac{6PL_1}{5bhG_{12}} \quad (\text{A.10})$$

em que o módulo de corte $G_{12} = 4.1$ GPa