



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Reparação de Delaminações em Compósitos Laminados através de um Parafuso**

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

**Autor**

**André Simões da Costa**

**Orientadores**

**Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro**

**Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro**

**Júri**

**Presidente** Professora Doutora **Maria Augusta Neto**  
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor **Paulo Nobre Balbis dos Reis**  
Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior

**Orientador** Professor Doutor **Altino de Jesus Roque**  
Professor Associado c/ Agregação da Universidade de Coimbra

**Coimbra, fevereiro, 2016**

*I never worry about the problem, I worry about the solution.*

Shaquille O'neill, ex-basquetebolista

Dedicado à minha família e amigos.

## **Agradecimentos**

Quero agradecer a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

Um especial obrigado para os meus dois orientadores, Prof<sup>a</sup> Doutora Ana Paula Amaro e Prof. Doutor Altino Loureiro pela disponibilidade, apoio, conhecimento e condições de trabalho que me ofereceram. Gostaria também de dirigir os meus agradecimentos ao Carlos pela sua paciência e ajuda na realização dos ensaios e ao senhor Fernando, das oficinas do DEM por ter ajudado na preparação dos provetes.

Deixo aqui um agradecimento a todos os meus amigos que de uma maneira ou de outra sempre me apoiaram ao longo deste trajeto.

Por fim, quero agradecer à minha família por me ter dado a oportunidade de realizar este percurso académico, acreditando e confiando sempre em mim.

Obrigado!

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo estudar a aplicação de parafusos em compósitos laminados como forma de reparação de delamiasões neste tipo de materiais. Para tal foram preparados provetes em carbono/epóxi com diferentes tamanhos de delaminações, 2mm, 5mm, 15mm e 20mm, previamente induzidas. De modo a estudar o efeito do parafuso, foram criados vários provetes para cada tamanho de delaminação. Em dois deles aplicou-se um parafuso transversalmente na zona delaminada de forma a ser possível comparar os resultados obtidos nos ensaios de compressão com os outros dois provetes onde não foi aplicada a técnica de reparação. Todos os provetes foram sujeitos a ensaios de compressão, sendo os seus deslocamentos e deformações registadas em simultâneo pelo equipamento usado e por uma técnica de correlação digital de imagem.

Foi possível concluir que a aplicação do parafuso como forma de reparação de delaminações em compósitos laminados é útil para provetes em que a delaminação é significativamente superior ao diâmetro do parafuso. A sua utilidade diminui para provetes em que o tamanho da delaminação é semelhante ou inferior ao diâmetro do parafuso.

**Palavras-chave:** Compósito Carbono/Epóxi, Delaminação, Reparação, Correlação Digital de Imagem, Ensaio de compressão.

## **Abstract**

The main objective of this work is to study the application of a screw in laminated composites as a way of repair the delamination in this kind of materials. For this purpose specimens of carbon/epoxy were prepared with different sizes of delaminations: 2mm, 5mm, 15mm and 20mm, previously induced. In order to study the effect of the screw, four specimens were created for each size of delamination. In two of them was applied a screw in the delamination area to be possible to compare the results obtained with the other samples where the repair technique wasn't applied. All specimens were subjected to compression tests, and their displacements and deformations recorded simultaneously by a technique of digital image correlation.

It was concluded that the application in laminated composite is useful for specimens in which the delamination size is significantly higher than the diameter of the screw. Its utility decrease for specimens with delamination's size similar or lower than the screw diameter.

**Keywords** Composite Carbon/Epoxy, Delamination, Repair, Digital Image Correlation, Compressive Tests.

## Índice

Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas .....	viii
Simbologia e Siglas .....	ix
Simbologia.....	ix
Siglas .....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Compósitos .....	3
2.2. Defeitos.....	9
2.3. Formas de reparação .....	14
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	17
3.1. Carbono/Epoxi.....	17
3.2. Processo de fabrico dos provetes .....	18
3.3. Ensaios de Compressão .....	20
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	24
4.1. Ensaios de Compressão .....	24
4.2. Sequência de Rotura .....	29
4.3. Comparação entre deformação global e local.....	32
4.4. Caracterização das superfícies de rotura.....	33
5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO.....	38
5.1. Conclusões .....	38
5.1. Propostas de trabalho futuro .....	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39
APÊNDICE A – CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO.....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Exemplo de uma delaminação. ....	1
Figura 2.1. Sequência de empilhamento típico para um compósito quase isotropico.....	4
Figura 2.2. Descrição dos materiais usados na construção do Boeing 787.....	5
Figura 2.3. (a) Esquema de utilização da técnica termográfica (b) Imagens termais obtidas através da técnica.....	12
Figura 2.4. Esquematização da forma de reparação através da injeção de resina. ....	13
Figura 2.5. Provetes reparados pela técnica TTRR.....	14
Figura 3.1. Geometria dos provetes, onde $a$ é o comprimento da delaminação.....	18
Figura 3.2. Geometria final dos provetes com parafuso.....	19
Figura 3.3. Equipamentos utilizados: Instron 4206 e ARAMIS.....	20
Figura 3.4. Provetes prontos para serem ensaiados.....	21
Figura 3.5. Dimensões da secção transversal em milímetros.....	23
Figura 4.1. Exemplo de uma curva carga-deslocamento de um dos ensaios de compressão realizados.....	24
Figura 4.2. Curvas força-deslocamento de provetes com 20mm de delaminação com e sem parafuso....	25
Figura 4.3. Curvas força-deslocamento de provetes com 15mm de delaminação com e sem parafuso.....	25
Figura 4.4. Evolução da força máxima com o tamanho da delaminação nos provetes sem parafuso.....	26
Figura 4.5. Evolução da força máxima com o tamanho da delaminação nos provetes com parafuso. ....	27
Figura 4.6. Comparação entre a força máxima para os provetes com e sem parafuso.....	28
Figura 4.7. Sequência de imagens obtidas pelo ARAMIS ao longo do ensaio de um provete com 15mm de delaminação com parafuso.....	29
Figura 4.8. Sequência de imagens obtidas pelo ARAMIS ao longo do ensaio de um provete com 15mm de delaminação sem parafuso.....	30
Figura 4.9. Sequência de imagens obtidas pelo ARAMIS ao longo do ensaio de um provete com 5mm de delaminação com parafuso.....	31
Figura 4.10. Comparação entre o deslocamento global e o local.....	32
Figura 4.11. Provetes sem defeito.....	33

Figura 4.12. Provetes com delaminação (a) 2mm (b) 5mm (c) 15mm (d) 20mm.....	34
Figura 4.13. Provetes com parafuso (a) 2mm (b) 5mm (c) 15mm (d) 20mm.....	35
Figura 4.14. Provetes com parafuso (a) 2mm (b) 5mm (c) 15mm (d) 20mm.....	36
Figura 4.15. Morfologia da fissura num provete com 20mm de delaminação sujeito à técnica de reparação.....	37
Figura A.1. Curva força-deslocamento de um provete sem parafuso com 2mm de delaminação.....	42
Figura A.2. Curva força-deslocamento de um provete com parafuso com 5mm de delaminação.....	42
Figura A.3. Curva força-deslocamento de um provete sem parafuso com 5mm de delaminação.....	43
Figura A.4. Curva força-deslocamento de um provete com parafuso com 15mm de delaminação.....	43
Figura A.5. Curva força-deslocamento de um provete com parafuso com 15mm de delaminação.....	44
Figura A.6. Curva força-deslocamento de um provete sem parafuso com 15mm de delaminação.....	44
Figura A.7. Curva força-deslocamento de um provete com parafuso com 20mm de delaminação.....	45
Figura A.8. Curva força-deslocamento de um provete com parafuso com 20mm de delaminação.....	45
Figura A.9. Curva força-deslocamento de um provete sem parafuso com 20mm de delaminação.....	46
Figura A.10. Curva força-deslocamento de um provete sem parafuso com 20mm de delaminação.....	46



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades mecânicas de compósitos de matrizes epóxi reforçados por fibras de vidro, carbono e aramida, contínuas e alinhadas nas direções longitudinais e transversais .....	7
Tabela 3.1. Propriedades mecânicas de uma placa de carbono/epóxi .....	17

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\lambda$  – Índice de esbelteza

$\mu$  – Constante relativa ao tipo de encastramento

$A$  – Área da secção transversal

$i$  – Raio de giração

$I_{min}$  – Momento de inércia mínimo

$L$  – Comprimento entre as amarras

### Siglas

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DIC – Correlação de imagem digital

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

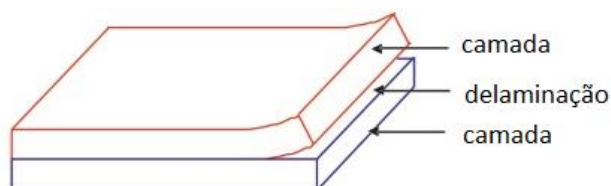
GOM – Medição ótica global

TTRR – Reparação de reforço ao longo da espessura

## 1. INTRODUÇÃO

Tem existido um grande crescimento no uso de materiais compósitos reforçados por fibras em áreas da engenharia, como a aeroespacial, automóvel, construção civil, indústria aeronáutica, entre outras. Prevê-se que esse crescimento se mantenha ao longo dos anos, o que tem motivado a realização de diversos estudos em prol de um melhor conhecimento deste tipo de materiais. O crescente uso de materiais compósitos reforçados por fibras, acontece devido ao fato destes materiais apresentarem boas propriedades mecânicas, tais como elevada rigidez, boa estabilidade, boa resistência à corrosão e à fadiga e baixo peso, quando comparados com os materiais tradicionais. Com o uso de materiais compósitos é possível criar estruturas igualmente resistentes, mas com um peso reduzido, pois é possível encontrar compósitos com uma rigidez específica extremamente elevada, o que leva a que os materiais compósitos sejam vistos com bons olhos, pois na maioria das aplicações práticas procura-se atingir desempenhos de excelência e reduzir os gastos associados ao consumo de combustível, principalmente em veículos terrestres ou aeronaves.

Contudo, as propriedades mecânicas dos compósitos, tais como a resistência à compressão, são gravemente afetadas por diferentes tipos de defeitos que possam ocorrer durante o processo de fabrico do material ou durante o tempo de serviço do equipamento. As delaminações são o tipo de defeito mais comum em compósitos laminados, por isso este tipo de defeito tem sido estudado ao longo do tempo, desenvolvendo-se técnicas de detecção e de reparação deste problema. A delaminação caracteriza-se por ser um fenómeno em que duas ou mais camadas constituintes de um compósito laminado se separam. Existem vários motivos que podem levar à ocorrência de delaminações, mas vários autores indicam o impacto é a principal causa da delaminação, sendo este um dos fatores que leva a que o uso de compósitos laminados esteja ainda um pouco limitado para algumas aplicações. Na figura 1.1 pode ser visto um exemplo de delaminação.



**Figura 1.1.** Exemplo de uma delaminação.

Cada vez mais se está rodeado por materiais compósitos e muitas empresas já entenderam que o futuro passa muito pelo uso deste tipo de materiais nos mais diversos tipos de aplicações, mas ainda existem muitos caminhos para serem explorados, pois ainda não foi retirado todo o potencial que estes materiais apresentam.

O principal objetivo deste trabalho é estudar o uso de um parafuso como forma de reparação de delaminações em compósitos laminados. A tese apresentada analisa esta questão e está dividida em cinco capítulos, o primeiro dos quais constitui esta introdução. No capítulo dois resume-se o estado da arte sobre compósitos laminados, sendo descritas as suas principais diferenças relativamente a outros tipos de materiais, juntamente com os tipos de defeitos mais comuns e por último mostram-se as técnicas de deteção e reparação desses mesmos defeitos, dando especial atenção às delaminações. No capítulo três são apresentados os procedimentos experimentais utilizados ao longo deste trabalho e no capítulo quatro são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as principais conclusões que se puderam retirar com a realização deste trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLOGRÁFICA

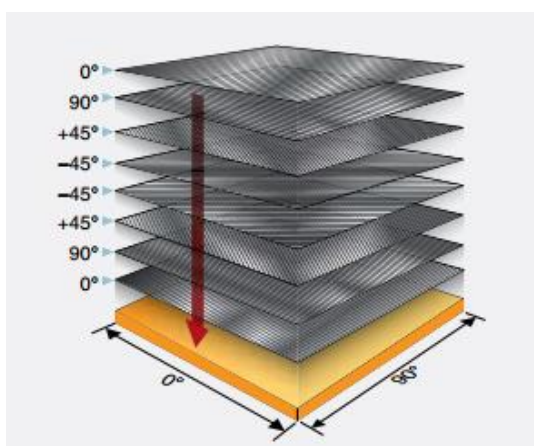
### 2.1. Compósitos

A classificação de um material é habitualmente baseada na sua composição, podendo um material ser classificado como metálico, cerâmico, polimérico ou compósito. Conforme já referido o uso de materiais compósitos está a ter um grande crescimento nos últimos anos nas áreas de engenharia, tais como a automóvel, aeronáutica, aeroespacial, entre outras. Segundo Smith *et al* (1998) os materiais compósitos definem-se como uma mistura ou combinação de dois ou mais macroconstituintes, que diferem entre si na forma e/ou composição, sendo insolúveis entre si, combinando as melhores características de cada um dos constituintes envolvidos; assim é possível obter materiais com propriedades distintas das dos seus componentes quando considerados de forma isolada. Este tipo de materiais é constituído por uma fase de reforço, que é composta por fibras, partículas ou folhas (elementos de reforço), dispersa numa matriz (fase contínua). Normalmente, os componentes podem ser identificados por análise visual ou com o auxílio de um microscópio, sendo visível a interface entre os constituintes do material compósito. A principal vantagem dos materiais compósitos é a possibilidade de conjugar os diferentes tipos de materiais e as suas características de forma a obter compósitos que consigam responder às necessidades do Homem (*Materials Today*, 2004).

A título de exemplo existem vários fatores que definem as propriedades mecânicas de um material compósito, tais como os materiais selecionados para fazerem parte da sua constituição ou a orientação das fibras durante a sobreposição das mesmas no processo de fabrico do material. Os compósitos avançados são normalmente compostos por fibras embebidas numa resina, geralmente laminados com diferentes orientações, de forma a melhorar a resistência do material. Nestes materiais são as fibras que suportam a maioria dos carregamentos, tendo a matriz o objetivo de suportar as fibras e de dar coesão ao material, tal como de transferir a energia das cargas aplicadas entre as diferentes camadas de fibras e ainda de proteger as fibras dos efeitos negativos do ambiente a que o material pode estar sujeito (Mei li, 2000). No caso dos compósitos constituídos por uma matriz de resina,

os efeitos do ambiente surgem primeiramente na matriz e na interface entre as diferentes camadas, enquanto que as fibras apresentam uma relativa insensibilidade quando o material é sujeito a alterações ambientais tais como a temperatura ou humidade, o que mostra a capacidade de a matriz proteger as fibras.

Os materiais constituídos por fibras não são algo novo para o Homem, sendo a madeira o material fibroso mais comum que o Homem conhece. Uma das características dos compósitos reforçados por fibras é o seu comportamento pouco isotrópico, ou seja, as suas propriedades não são uniformes em todas as direções. Estes materiais são mais fortes e resistentes na direção das fibras, exemplo disso são os compósitos unidirecionais que caracterizam-se por terem fortes propriedades mecânicas em apenas uma direção. As propriedades dos compósitos laminados, tais como a resistência à tração, compressão e flexão são afetadas pela forma como o empilhamento das diferentes camadas é feito, pois é este empilhamento que nos indica a orientação das fibras ao longo da espessura do material (*Federal Aviation Administration – “Advanced Composite Materials”*). Consoante os tipos de esforços que o material irá estar sujeito é possível criar compósitos laminados com fibras em várias direções, conseguindo atingir o comportamento mecânico desejado. Na figura 2.1 pode ser observado uma forma de empilhamento simétrica [0;90;45;-45] das diferentes camadas que consegue proporcionar um comportamento quase isotrópico. Esse fato resulta da existência de várias camadas com diferentes orientações 0°, +45°, -45°, 90°.

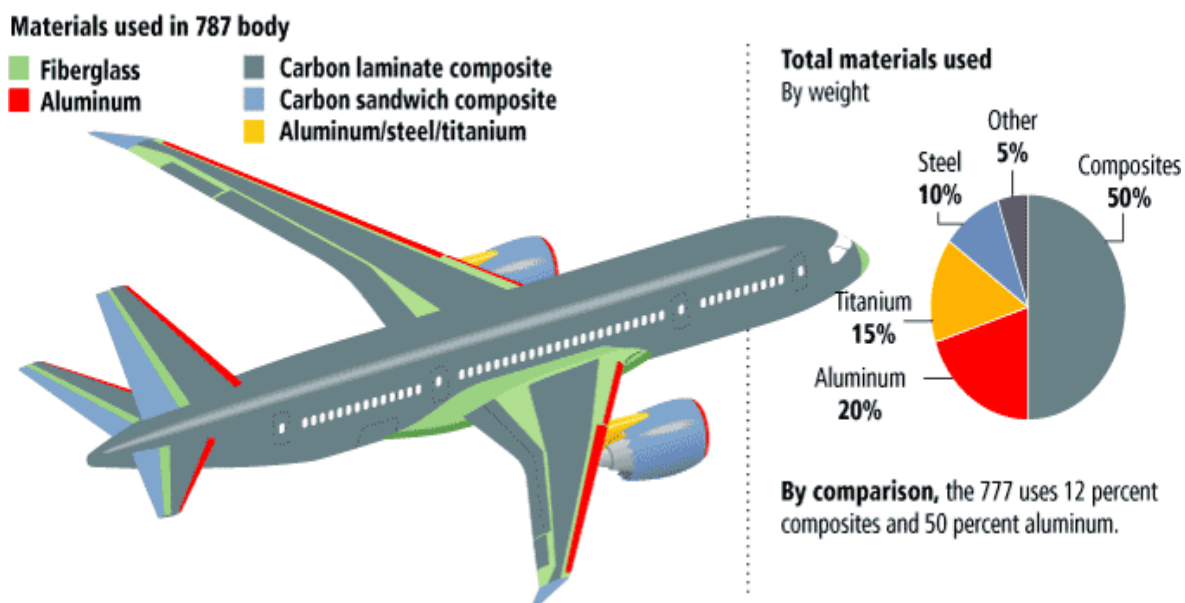


**Figura 2.1.** Sequência de empilhamento típica para um compósito *quasi* isotrópico.

Os compósitos como já foi referido estão a tornar-se uma alternativa aos materiais tradicionais, pois conseguem apresentar boas características mecânicas, tais como

uma elevada rigidez específica, excelente resistência à fadiga e à corrosão e boa estabilidade. Esta possibilidade de reduzir o peso mantendo as características mecânicas é o fator principal que tem levado o Homem a estudar este tipo de materiais. Segundo “*Histoty of Recent Science & Technology*” o grande crescimento dos compósitos iniciou-se nos anos 40, devido a necessidades do foro militar, pois era necessário tornar os veículos, tais como aviões e helicópteros mais leves de forma a ser possível transportar mais artilharias.

Hoje em dia, vive-se num mundo em que a busca de soluções para os problemas relacionados com a poluição tem sido cada vez mais urgente e pode-se encontrar nos materiais compósitos uma forma de reduzir essa poluição. O Boeing 787 Dreamliner, avião comercial mais recente da construtora aeronáutica Boeing, é constituído por cerca de 50% de material compósito, mais concretamente por compósitos reforçados por fibras (fibra de carbono e fibra de vidro), reduzindo bastante o seu peso final comparado com os seus aviões comerciais concorrentes. Esta redução de peso permite que o consumo de combustível seja reduzido em cerca de 20% comparando com aviões do mesmo porte, diminuindo assim significativamente a emissão de gases poluentes (Modernairliners.com). Na figura 2.2 pode ser vista a descrição dos materiais usados no corpo de um Boeing 787.



**Figura 2.2** Descrição dos materiais usados na construção do Boeing 787. (Fonte – Modernairliners.com)

Segundo Berthelot (1992), a classificação dos compósitos pode ser feita quanto à forma e quanto à natureza dos seus constituintes. Relativamente à forma, estes podem ser compósitos de partículas ou compósitos de fibras. Os compósitos de fibras reforçam a matriz e as fibras podem ser contínuas ou descontínuas. Nos compósitos de partículas, estas são utilizadas para aumentar a resistência à abrasão, diminuir o coeficiente de dilatação térmica ou como enchimento para reduzir custos. Em relação à natureza dos constituintes os compósitos podem ser classificados consoante o tipo de fibras; é possível então encontrar vários tipos tais como compósitos com fibra de vidro, kevlar, fibras de carbono ou fibras cerâmicas. As fibras de carbono, como as fibras de vidro, foram os primeiros reforços utilizados para aumentar a rigidez e resistência de materiais compósitos avançados leves. Além da resistência e rigidez, as fibras de carbono possuem excelente resistência à fadiga, características de amortecimento de vibrações, resistência térmica e estabilidade dimensional. Estas possuem também uma boa condutibilidade térmica e são quimicamente inertes, exceto quanto à oxidação (Callister, 1997). As principais características das fibras de vidro são um baixo custo, resistência à corrosão, baixa condutibilidade térmica e elétrica, baixo peso e baixo custo de manutenção. Relativamente ao kevlar, este é o nome dado às fibras de aramida. A principal vantagem deste tipo de fibras é a sua elevada resistência ao impacto, associada a um baixo peso. As suas principais desvantagens são a sua baixa resistência à compressão e a sua higroscopia, o que leva a que em muitas aplicações seja necessário introduzir uma proteção em torno do material, (Callister, 1997).

Algumas propriedades mecânicas de compósitos com matrizes poliméricas de resina epóxi, reforçadas com fibras de vidro, carbono e aramida estão indicadas na tabela 2.1. Desta forma, pode ser feita uma comparação entre as características mecânicas desses três materiais, tanto para a direção longitudinal como para a direção transversal.



**Tabela 2.1** Propriedades mecânicas de compósitos de matrizes epóxi reforçados por fibras de vidro, carbono e aramida, contínuas e alinhadas nas direções longitudinais e transversais (Fonte - Callister (2002)).

Propriedades	Vidro	Carbono	Aramida
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,1	1,6	1,4
Módulo de Tração:			
Longitudinal (GPa)	45	145	76
Transversal (GPa)	12	10	5,5
Limite de Resistência à Tração:			
Longitudinal (MPa)	1020	1240	1380
Transversal (MPa)	40	41	30
Deformação no Limite de Resistência à Tração:			
Longitudinal (%)	2,3	0,9	1,8
Transversal (%)	0,4	0,4	0,5

Tal como as fibras, existem vários tipos de matrizes para os compósitos, podendo ser do tipo polimérico, metálico ou cerâmico. Relativamente às matrizes poliméricas a principal vantagem dos compósitos constituídos por matrizes deste tipo é que a sua fabricação envolve baixas temperaturas, evitando-se problemas associados com a degradação do reforço. Por essa razão, o desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica ocorreu rapidamente, Denículi (1999). É possível dividir este tipo de matrizes em dois grandes grupos que são os termoplásticos e os termoendurecíveis. Segundo de Moura *et al* (2011) os termoplásticos são formados a partir de macromoléculas individuais lineares sem qualquer reticulação entre si. Quando se aquecem os polímeros termoplásticos, as ligações secundárias são temporariamente quebradas e passa a existir mobilidade molecular que permite a reconformação. Com o arrefecimento posterior, as moléculas fixam-se nas posições entretanto alcançadas, restabelecendo-se as ligações químicas. Em geral, os termoplásticos salientam-se por apresentarem maior resistência ao impacto, maior tenacidade e bastante menor nível de higroscopia quando comparados com os polímeros termoendurecíveis. Estes podem ser reciclados, o que constitui um ponto importante nos dias de hoje (Caroline Baillie, 2004).

No caso de matrizes termoendurecíveis estas são constituídas por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais bastante rígidas. Os termoendurecíveis, ao contrário dos termoplásticos, não podem ser reprocessados. Uma vez aquecidos assumem

uma forma permanente. Uma das principais vantagens das resinas termoendurecíveis é a maior facilidade de impregnação do reforço, dado que, antes da cura, apresentam viscosidades inferiores às dos termoplásticos.

As resinas pertencem ao grupo dos polímeros e são bastante usadas no mundo dos compósitos devido à sua capacidade de adquirirem qualquer forma, serem compatíveis com a maioria dos materiais, a sua cura ser bastante rápida quando lhe são aplicadas calor ou um catalisador e serem um excelente agente adesivo (Bryan Harris, 1999). As variações da composição e morfologia de uma resina e a presença de impurezas ou contaminações nela pode afetar a maneabilidade, a processabilidade, o desempenho e a durabilidade do material compósito. Dentro das resinas pode-se destacar alguns tipos tais como o epoxy, poliéster e poliamida. As resinas epoxy têm as vantagens de apresentarem uma elevada rigidez, baixo níveis de volatilidade, excelente adesão, boa resistência química e fácil processamento. As maiores desvantagens das resinas epoxy são a sua fragilidade e a redução das suas propriedades na presença de humidade. A gama de valores mais comum para a cura deste material é entre 120°C e 180°C. Comparativamente com as resinas de poliéster, as de epoxy tem um preço mais elevado e a sua cura é mais lenta. As resinas de poliéster conseguem apresentar também uma maior resistência e processam-se mais facilmente (Bryan Harris, 1999). No caso das resinas de poliamida estas apresentam um excelente comportamento a elevadas temperaturas, devido ao seu baixo coeficiente de expansão, mas têm a desvantagem de para a realização da sua cura ser necessário utilizar temperaturas bastantes elevadas, cerca de 290°C.

Como foi referido anteriormente existem vários fatores tais como a composição e morfologia do material que definem as suas propriedades mecânicas. Contudo, essas características mecânicas dos compósitos são gravemente afetadas devido aos diferentes tipos de defeitos que possam ocorrer.

## 2.2. Defeitos

Os defeitos em materiais compósitos podem surgir em diversos momentos, tais como no seu processo de fabrico, durante o seu tempo de serviço e ainda em atividades de manutenção dos mesmos. Dentro dos defeitos que podem surgir durante o processo de fabrico podemos encontrar (*Federal Aviation Administration – “Advanced Composite Materials”*):

- Delaminação;
- Áreas com falta de resina;
- Áreas com excesso de resina;
- Bolhas de ar;
- Rugosidades;
- Presença de vazios no interior do material;
- Problemas térmicos;

Estes defeitos resultam maioritariamente de uso inapropriado das técnicas de fabrico, os mesmos autores indicam algumas fontes dos defeitos apresentados anteriormente:

- Processo de maquinação inapropriada;
- Cura inapropriada;
- Contaminações;
- Queda de ferramentas;
- Perfuração inadequada;
- Uso de ferramentas inadequadas;
- Maus tratos do material;

Para a obtenção de materiais com qualidade é necessário ter bastante cuidado durante todo o processo de fabrico, pois cada dano sofrido irá reduzir a vida desse mesmo material, o que leva a que seja importante ter procedimentos de controlo de qualidade durante o processo de fabrico.

Relativamente aos defeitos que podem surgir durante o tempo de serviço do material são referidos os seguintes defeitos (*Federal Aviation Administration – “Advanced Composite Materials”*):

- Delaminação;
- Descolamento entre a fibra e a matriz;
- Arrancamento das fibras;
- Quebra da matriz;
- Erosão;
- Fissuras devido a cargas localizadas;
- Degradação devido ao ambiente;

Dos defeitos apresentados os mais comuns são a delaminação, o arrancamento de fibras, a quebra da matriz e o descolamento entre a matriz e a fibra. Estes tipos de danos são preocupantes pois normalmente não são possíveis de detetar na superfície do material, sendo necessárias técnicas específicas para o fazer, tais como o uso do ultras-sons (Amaro *et al.*, 2008).

A delaminação caracteriza-se por ser um fenómeno que ocorre quando as camadas de um compósito laminado se separam. Este fenómeno ocorre geralmente entre as camadas do material que têm orientações diferentes, pois a diferença de orientação entre as camadas dificulta a propagação da energia absorvida durante um impacto. Assim observa-se um acumular de energia entre as camadas com orientações diferente, o que pode levar à ocorrência de defeitos, tais como a delaminação. As delamiasões podem ser provocadas devido a vários fatores tais como contaminações durante o processo de fabrico ou a impactos de baixa velocidade durante o tempo de serviço. O dano sofrido através de impacto de baixa velocidade é considerado como a principal causa de fenómenos de delaminação durante o tempo de serviço de um material compósito laminado, podendo reduzir a tensão de rotura em cerca de 60% em ensaios de compressão. Esta redução pode ser explicada com o aumento da concentração de tensões na zona do defeito. Esta baixa tolerância ao impacto faz com que os compósitos tenham ainda algumas limitações em diferentes tipos de aplicações (Collombet *et al* 1996). Em relação ao impacto a elevadas velocidades, apesar de este provocar defeitos superiores às resultantes por impacto a baixa velocidade, estes não são de

grande preocupação, pois podem ser observados facilmente através de inspeção visual e posteriormente devidamente reparados.

Diversos autores têm estudado o efeito das delaminações no comportamento mecânico dos compósitos. De acordo com Amaro *et al* (2014) a capacidade de carga em materiais compósitos laminados diminui significativamente com a existência de delaminações, independentemente da sua forma ou tipo. Os mesmos autores também verificaram que a resistência à compressão é fortemente afetada pelo número e pelo tamanho das delaminações.

Zhang *et al.* (2008) analisaram placas laminadas com 2, 4 e 6 mm de espessura e sujeitas a compressão após impacto e observaram que para laminados com a mesma espessura e submetidos a um impacto equivalente, a redução de resistência encontrava-se dentro de um intervalo de 45 a 50% quando comparadas com placas sem dano.

X. W. Wang *et al.* (2004) levaram a cabo um estudo do efeito de múltiplas delaminações no ensaio de compressão de fibras de vidro em matriz plástica. As múltiplas delaminações resultam numa maior redução na resistência à compressão comparando com as delaminações simples.

Um dos problemas dos materiais compósitos é a sua composição pouco homogénea devido ao facto de serem constituídos por dois ou mais materiais, o que leva a que as características mecânicas e físicas dos materiais compósitos sejam bastante controladas pela estrutura e propriedades da interface entre as diferentes camadas. Assim, torna-se relevante estudar os efeitos do ambiente em compósitos, pois o facto de serem constituídos por dois ou mais materiais pode levar a que o seu comportamento seja heterogéneo. As fibras e a matriz podem ter comportamentos diferentes quando sujeitos a alterações ambientais, o que pode levar à ocorrência de defeitos.

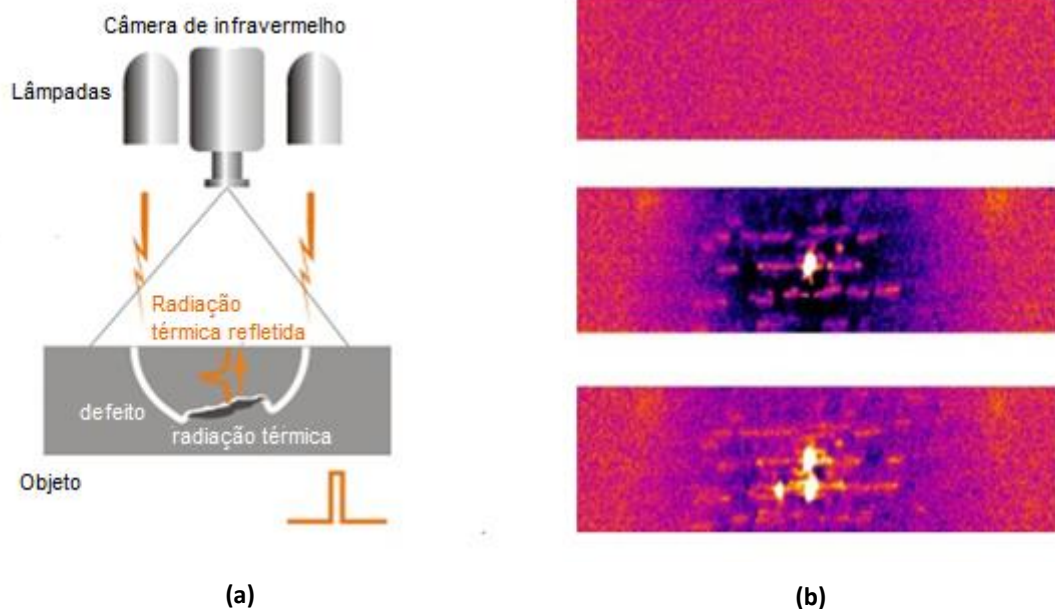
Um grande número de compósitos são constituídos por uma matriz polimérica e é conhecido que os polímeros são materiais que sofrem bastante com a temperatura, assim os compósitos de matriz polimérica são extremamente afetados com o aumento da temperatura. De acordo com Detassis *et al* (1995) a força necessária para ocorrer cisalhamento entre camadas do compósito diminui com o aumento da temperatura. Uma das razões que leva a que a temperatura afete os compósitos é o facto de os materiais que integram o compósito terem diferentes coeficientes de expansão térmica, criando assim forças

residuais na interface dos materiais podendo originar pequenos buracos ou mesmo quebras do material. A influência negativa na resistência à compressão do aumento da temperatura em compósitos laminados por Amaro *et al* (2010).

Como tem sido descrito ao longo deste trabalho defeitos, tais como a delaminação, são fenómenos que ocorrem no interior do material, sendo a maiorias das vezes impossível de os detetar através de uma visualização da superfície. Devido a isso, é necessário utilizar técnicas para detetar esses defeitos, de preferência não destrutivas. Uma das técnicas mais rudimentares possíveis de utilizar para a deteção de defeitos é a técnica do toque. Esta técnica consiste em bater no material de preferência com um objeto metálico várias vezes ao longo do material. Do toque do objeto metálico com o material surge um som que em caso do material possuir um defeito se irá alterar, sendo possível então concluir que o material tem um defeito. A técnica do toque é uma técnica pouco precisa sendo difícil de detetar a localização exata do defeito no material. Devido à fraca precisão da técnica do toque existem técnicas que se baseiam no mesmo princípio (som), mas bastante mais precisas. Um exemplo dessas técnicas é a técnica do ultrassons. Este método consiste em fazer atravessar ondas ultrassonoras pelo material. A propagação das ondas é influenciada pelos defeitos internos que possam existir, tais como as delaminações, pois introduzem descontinuidades locais no material, modificando a sua acústica. Este método consegue detetar a profundidade do defeito e tem a vantagem de ser uma técnica portátil, pois muitas vezes o material que é necessário verificar encontra-se em zonas de difícil acesso. Contudo, as técnicas que usam ultrassons têm uma grande desvantagem que é a necessidade de usar um líquido de acoplamento de forma a permitir a transmissão da energia do som ao material, evitando que seja dissipada para o ar, tornando assim este método muito difícil de aplicar em objetos de grande porte e elevada rugosidade.

Para contrariar as desvantagens que as técnicas de ultrassons possuem, existem outras técnicas tal como a termografia ativa ou passiva. Esta técnica consiste em detetar defeitos através da medição de gradientes térmicos no material. A diferença entre termografia ativa e passiva é que na ativa é fornecido calor ao material para observar como a temperatura se comporta ao longo do tempo. Nos casos em que já existe uma diferença entre o material e o ambiente em que ele se encontra não existe a necessidade de lhe fornecer calor, denominando-se assim por termografia passiva. As maiores vantagens desta técnica

são o fato de ser uma técnica sem contato, não destrutiva e de poder ser usada de forma rápida em componentes de grande porte e complexos. Associado a isto, este método é indicado para materiais compósitos pois estes têm normalmente uma condutibilidade térmica baixa. Contudo, esta técnica é relativamente cara pois necessita de câmaras com grande sensibilidade termal (K.B. Katnam *et al* (2015)). Na figura 2.5 pode-se visualizar como a técnica termográfica é utilizada e imagens obtidas através desta técnica.

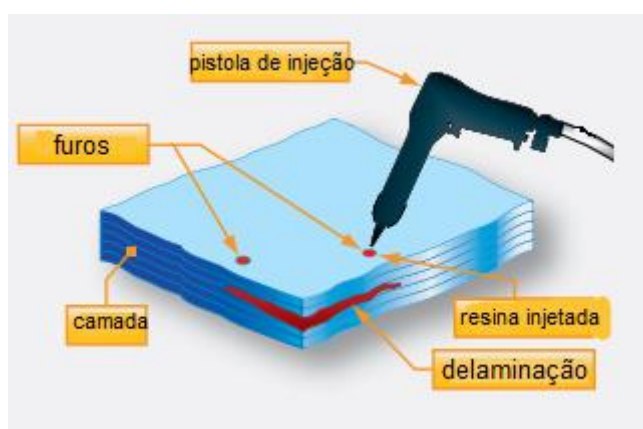


**Figura 2.3** (a) Esquema de utilização da técnica termográfica (b) Imagens termais obtidas através da técnica. (Fonte - interjacm.com)

### 2.3. Formas de reparação

O homem tem desenvolvidos ao longo dos tempos diversas formas de reparação de delaminações em laminados compósitos. Antes de reparar qualquer material é importante prepará-lo, de forma a reduzir a possibilidade de ocorrência de contaminações que podem reduzir drasticamente a eficácia de cada método usado. Para isso é importante secar e limpar o material antes de aplicar qualquer técnica de reparação (K.B. Katnam *et al* (2015)).

Um dos métodos usados como forma de reparação é a injeção de resina. O objetivo deste método é religar as camadas onde a delaminação está presente. Este método consiste em perfurar o material somente até a zona delaminada com dois furos, sendo injetada resina num dos furos até que esta flua pelo outro buraco. É extremamente importante ter cuidado com a seleção da broca a usar na perfuração, pois os compósitos de fibra de carbono e resina epóxi são bastante duros e abrasivos. Esta técnica por vezes torna-se ineficiente devido ao fato de a zona a tratar poder-se encontrar contaminada diminuindo a capacidade de a resina religar as camadas que se pretendem reparar (H.C.H. Li *et al* (2006)). Outra desvantagem deste método é a necessidade de as fibras do compósito serem perfuradas, podendo criar novas delaminações, alterando assim o comportamento mecânico do material. Outros inconvenientes são a dificuldade de remover a humidade da zona danificada e a dificuldade de obter uma completa infusão da resina. Por fim, outra dificuldade inerente a esta técnica é a impossibilidade de visualizar a qualidade do processo realizado através de técnicas de visualização não destrutivas. Na figura 2.6. está esquematizada esta forma de reparação.



**Figura 2.4.** Esquematização da forma de reparação através da injeção de resina.



Outra prática usada para reparar delaminações em compósitos de matriz polimérica é a técnica TTRR (through-thickness reinforcement repair). Esta técnica foi estudada por H.C.H. Li *et al* (2006) e consiste em perfurar totalmente a espessura do compósito na região delaminada, criando vários furos equidistantes com 1mm de diâmetro formando círculos concêntricos. Posteriormente é aplicada uma resina epóxi de forma a preencher os espaços criados. Antes de a resina secar são aplicados parafusos M1 nos furos onde a resina se encontra. Os autores afirmam que nesta técnica a possibilidade de ocorrer problemas relacionados com contaminações é inferior à técnica apresentada anteriormente, devido ao fato de se estarem a criar fenómenos de adesão em furos “frescos” com parafusos pré tratados. Na figura 2.4. podemos observar provetes reparados pela técnica TTRR.

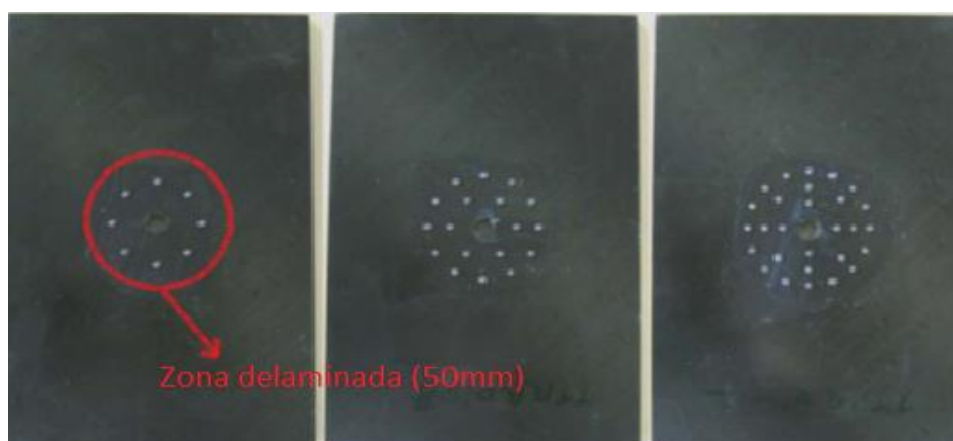


Figura 2.5. Provetes reparados pela técnica TTRR.

Os autores H.C.H. Li *et al* (2006) usaram ensaios de compressão para testar esta técnica e chegaram à conclusão que os provetes que sofrem delaminação e são reparados por esta técnica conseguem atingir resistências à compressão de 93% quando comparadas com provetes sem qualquer tipo de defeito. Na figura 2.4. podem ser observados três provetes reparados por esta técnica, onde em cada um deles varia a densidade de furos criados. Os autores concluíram que o número de furos não é significativo, pois obtiveram resultados semelhantes para os diferentes provetes.

Bastantes técnicas de reparação de delaminações em compósitos laminados usam a criação de furos na zona delaminada como base, para depois poderem aplicar uma

resina com o objetivo de religar o material. Visto isto, é de relevante interesse estudar que tipo de influência esses furos podem ter na delaminação e no comportamento do material. Amaro *et al* (2013) estudaram a influência de furos em compósitos delaminados sujeitos a impacto de baixa velocidade. Nesse trabalho estudaram três tipos de provetes com delaminação: sem furo, com um furo e com dois furos. Os autores chegaram à conclusão que na presença de furos a força máxima diminui de forma bastante reduzida, considerando assim que a presença de furos não tem uma influência muito significativa nas curvas força-deslocamento. Em termos energéticos, os autores chegaram à conclusão que os provetes que tinham furos absorveram mais energia e conseqüentemente apresentaram uma zona danificada maior.

Para que a presença de furos não afete o comportamento do material de forma negativa um dos importantes fatores a ter em conta é a escolha da broca usada durante o processo de furação de um material.

Durão *et al* (2010) afirma que a geometria das brocas é um fator importante na obtenção de furos em laminados, de qualidade aceitável, pois a força axial necessária para efetuar o avanço da broca e os valores de momento torsor variam consoante o tipo de broca.

Para além da escolha adequada da broca existem outros modos de reduzir o impacto da furação em compósitos laminados. Durão *et al* (2008) estudou a influência da pré-furação no dano em laminados carbono/epóxi e verificou que a força axial necessária para efetuar o avanço da broca, diminui cerca de 20% com um pré-furo de 1.1 mm e cerca de 70% quando se utiliza uma pré-furação de 3.5mm. Chegou também à conclusão que o dano provocado pela furação diminui sempre que foi utilizado o pré-furo independentemente do diâmetro deste.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho pretende estudar a viabilidade do uso de parafusos como método de reparação de delaminações em compósitos laminados. Segundo os autores Kuo-Wei *et al* (1995) a resistência à compressão é um dos parâmetros mais importantes na idealização de um compósito reforçado por fibras; isto deve-se ao facto de geralmente a resistência à compressão ser menor do que a resistência à tração. Assim, foram realizados ensaios de compressão em diferentes provetes com delaminações previamente introduzidas de diferentes dimensões. De modo a obter o campo de deformações e de tensões na região laminada, foi usado um equipamento de correlação digital de imagem DIC (*Digital Image Correlation*).

#### 3.1. Carbono/Epoxi

O material usado nos ensaios foi o compósito carbono/epóxi. Este material caracteriza-se por ser um compósito de matriz polimérica reforçada por fibras de carbono.

Na tabela seguinte pode-se encontrar algumas das propriedades de uma placa de compósito carbono/epóxi, fornecidas pela RS Components, fábrica inglesa de componentes eletrónicos e eléctricos.

**Tabela 3.1** Propriedades mecânicas de uma placa de carbono/epóxi (Fonte – RS Components)

Propriedades	Valor [unidades]
Coefficiente de expansão termal - longitudinal	$2,1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Coefficiente de expansão termal - transversal	$2,1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Resistência à compressão - longitudinal	570 MPa
Resistência à compressão - transversal	570 MPa
Densidade	$1,6 \text{ g.cm}^{-3}$
Módulo de cisalhamento	5 GPa
Resistência ao cisalhamento	90 MPa
Fração volúmica das fibras	50 %
Módulo de Young - longitudinal	70 GPa
Módulo de Young - transversal	70 GPa

### 3.2. Processo de fabrico dos provetes

O compósito laminado utilizado foi fabricado usando 12 camadas de tecido, bidirecionais de fibra de carbono (com  $196 \text{ g/m}^2$ ), todas com a mesma direção 0/90, e resina epóxi como matriz. As fibras e a resina foram colocadas num molde manualmente e sujeitas a uma leve compressão. Posteriormente o molde foi inserido num saco sujeito a vácuo, onde se manteve 8h à temperatura ambiente para realizar a cura. A fração volúmica ( $V_f$ ) é de 0,66 e a espessura média é de 3mm. As delaminações foram simuladas colocando uma camada de teflon a meio da espessura do laminado (entre a sexta e a sétima camada). Foram consideradas delaminações com comprimentos de 2, 5, 15 e 20mm todas com a mesma largura de 12,5mm. O controlo de qualidade dos laminados foi feito através de inspeção visual da superfície final e do conteúdo vazio. Na figura 3.1. pode-se observar a geometria dos provetes usados nos ensaios.

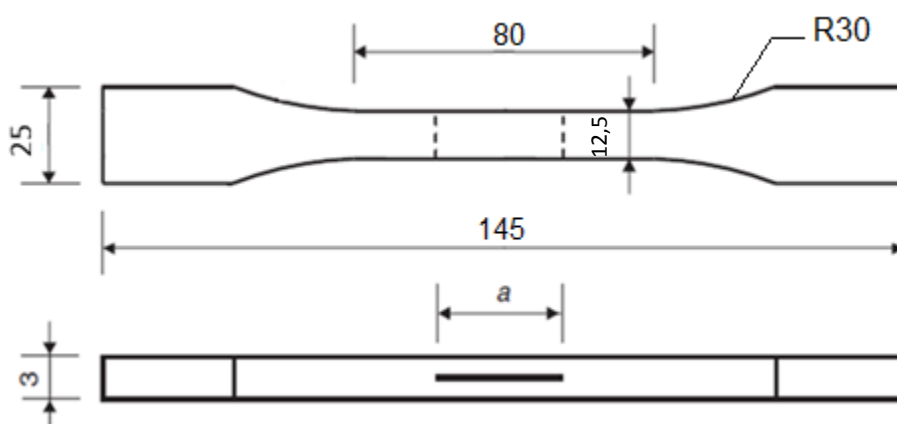


Figura 3.1. Geometria dos provetes, onde  $a$  é o comprimento da delaminação.

Após a maquinação alguns provetes foram furados na zona da delaminação e introduzido um parafuso M3 bem como duas anilhas e apertada uma porca através de um aperto de contato. A geometria final desses provetes está ilustrada na figura 3.2.

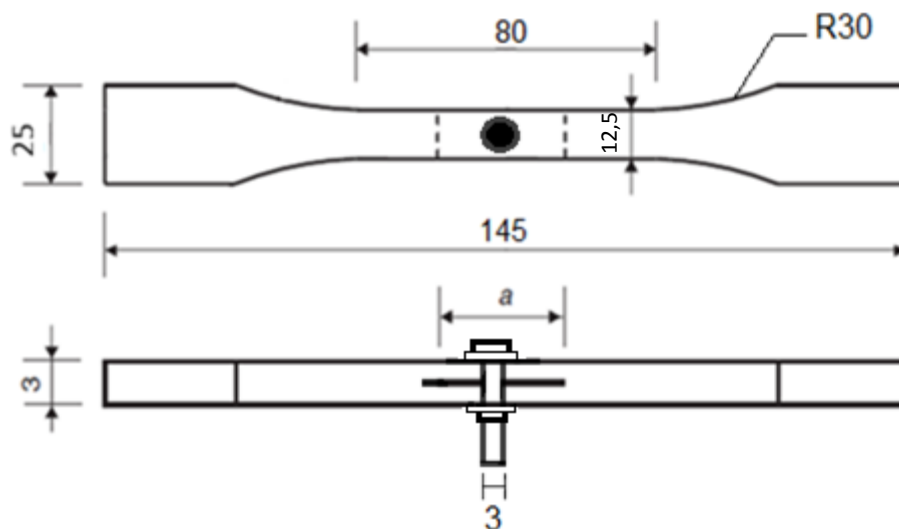


Figura 3.2 Geometria final dos provetes com parafuso

### 3.3. Ensaios de Compressão

Os ensaios foram realizados nas instalações do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra. Para a execução dos ensaios foi usado o equipamento electromecânico universal de tração/compressão Instron 4206, e o sistema ARAMIS de extensometria ótica, do fabricante GOM. Na figura 3.3 estão ilustrados os equipamentos devidamente montados para a realização dos ensaios.



**Figura 3.3.** Equipamentos utilizados: Instron 4206 e ARAMIS.

O ARAMIS é um equipamento que baseia o seu funcionamento na técnica DIC (*Digital Image Correlation*), técnica ótica sem contacto, o que permite eliminar a hipótese de interferência com a precisão dos resultados obtidos nos ensaios (Leitão *et al.*, 2013). O *software* associado a esta técnica possibilita a obtenção das curvas tensão-deformação locais e globais através do mapeamento das tensões globais (Leitão *et al.*, 2013).

De forma a obter imagens de qualidade dos ensaios no ARAMIS, foi necessário preparar os provetes. A preparação consistiu na criação de um padrão que permitisse uma análise correta por parte do sistema. O padrão foi criado pintando os provetes com um spray branco e, posteriormente, de forma extremamente leve e com o

auxílio de um aerógrafo, de preto, obtendo assim um padrão com pontos pretos num fundo branco. Para a aplicação da tinta foi necessário limpar os provetes com a ajuda de álcool etílico e após cada pintura foi preciso esperar cerca de 30 minutos para a tinta secar. Na figura 3.4. estão ilustrados alguns provetes prontos para serem ensaiados.



**Figura 3.4.** Provetes prontos para serem ensaiados.

Os ensaios de compressão foram realizados com uma velocidade constante de 1mm/min, à temperatura ambiente e a distância entre as amarras foi de 25mm.

O objetivo deste trabalho foi estudar o uso de um parafuso como forma de reparação de delaminações em compósitos laminados. Para isso foram realizados ensaios de compressão em provetes sem qualquer tipo de delaminação de forma a obter as curvas características para provetes sem qualquer tipo de defeito. Posteriormente foram realizados ensaios em provetes com delaminação e por último em provetes com delaminação e com um parafuso (técnica de reparação). É importante referir que foram usados provetes com diferentes tamanhos de delaminação, existindo provetes com delaminações de 2, 5, 15 e 20 mm. Durante os ensaios usou-se um aparelho DIC (*Digital Image Correlation*), com a capacidade de captar a cada instante as tensões e deformações locais sofridas na zona delaminada. Tratando os resultados obtidos foi possível chegar a algumas conclusões relativamente à utilidade do parafuso como forma de reparação.

Antes de apresentar quaisquer resultados relativos aos ensaios de compressão, é importante referir que foi feito um breve estudo sobre a possibilidade da ocorrência de flambagem durante os ensaios de compressão. Para verificar essa possibilidade foi necessário calcular o índice de esbelteza do material, pois o fenómeno de flambagem ocorre geralmente quando o índice de esbelteza apresenta valores superiores a 80 para o caso de fibras de carbono. De seguida são apresentados os cálculos para a determinação desse mesmo índice.

O índice de esbelteza,  $\lambda$ , é dado por:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot L}{i} \quad (3.1)$$

onde  $L$  é o comprimento entre as amarras durante o ensaio de compressão,  $\mu$  é uma constante relativa ao tipo de encastramento e  $i$  é o raio de giração da secção transversal e é dado pela seguinte equação 4.2:

$$i = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} \quad (3.2)$$

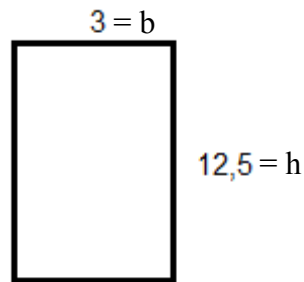
em que  $I_{min}$  é o momento de inércia mínimo da secção transversal e  $A$  é área da secção transversal. As medidas da secção transversal podem ser vistas na figura 3.5.

Considerando as medidas da secção transversal na figura 4.1, o  $I_{min}$  é dado por:

$$I_{min} = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.3)$$

em que  $b$  é o comprimento da base e  $h$  a altura.





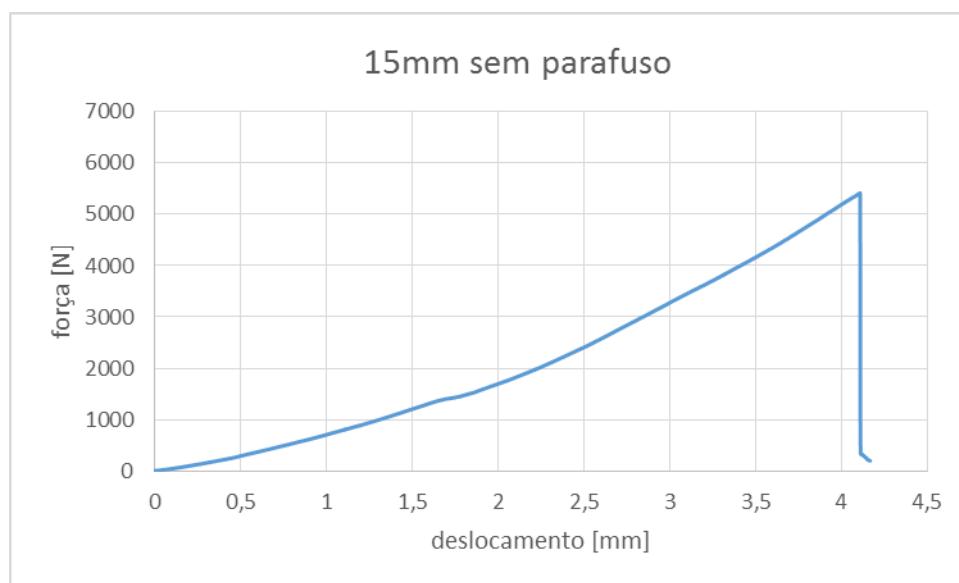
**Figura 3.5** Dimensões da secção transversal em milímetros.

Resolvendo a equação 4.3 com os valores indicados na figura 4.1 obtêm-se um momento de inércia mínimo de  $28,13 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$ . Com este valor é possível determinar o raio de giração da secção transversal resolvendo a equação 4.2. Esta equação dá um valor de 0,866 para o raio de giração. Considerando o valor de  $L$  igual a 25mm (distância entre as amarras durante o ensaio) e o valor de  $\mu$  como sendo 0,65 (valor tabelado para bi-encastamento), pode-se resolver a equação 4.1, obtendo um valor de 18,76 para o índice de inércia. Este valor prova que não existia risco de ocorrência de flambagem durante os ensaios de compressão, pois é um valor baixo quando comparado com os 80 (valor tabelado para fibras de carbono).

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. Ensaios de Compressão

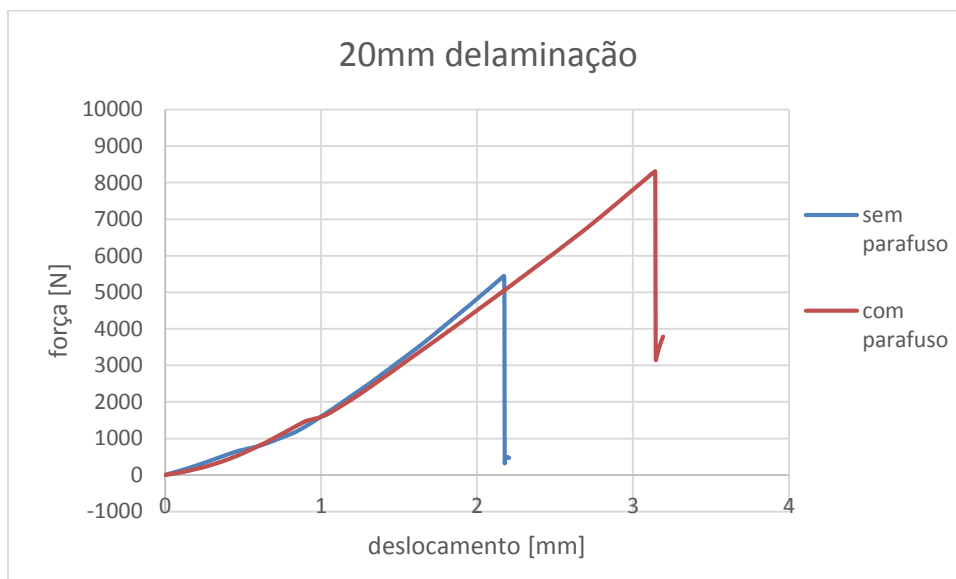
Para ser possível estudar a influência da aplicação de um parafuso na zona delaminada realizaram-se ensaios de compressão em provetes que não sofreram a técnica de reparação, provetes de teste, de acordo com o já referido, de forma a ser possível comparar posteriormente com os resultados obtidos nos provetes em que a técnica de reparação foi usada. Assim, foram realizados ensaios de compressão em provetes com delaminações de 2, 5, 15 e 20 mm com e sem parafuso. Na figura 4.1. está representada uma curva típica força-deslocamento de um dos ensaios de compressão realizados, mais concretamente de um provete com 15mm de delaminação sem parafuso. Esta curva representa o comportamento observado em todos os provetes durante os ensaios. No apêndice A encontram-se os gráficos relativos aos restantes ensaios.



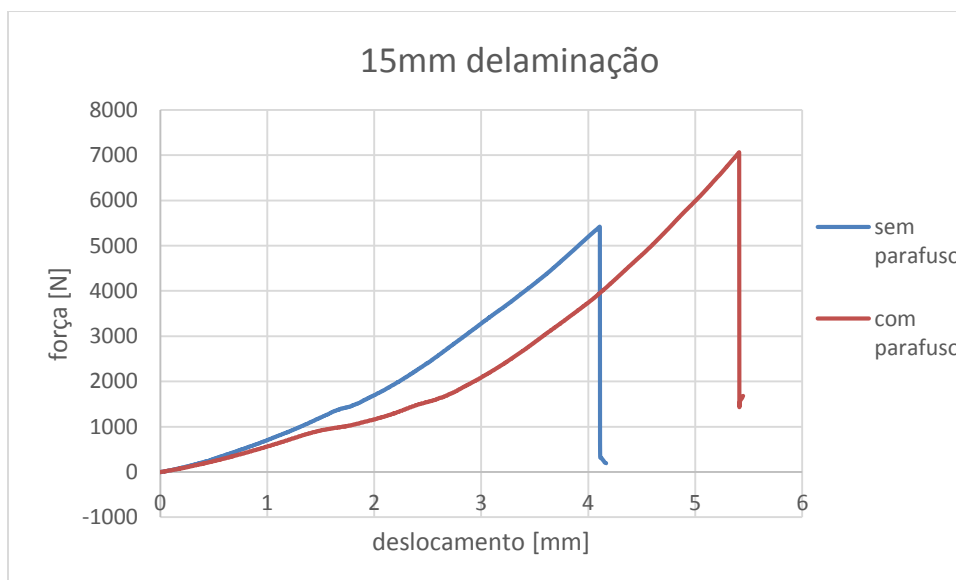
**Figura 4.1.** Exemplo de uma curva força-deslocamento de um dos ensaios de compressão realizados.

Pelo gráfico da Figura 4.1 pode-se observar que a força aumenta ao longo do ensaio até o material fraturar. Da referida figura é possível retirar a força máxima suportada por cada provete e o seu deslocamento global.

Nas figuras 4.2 e 4.3 pode-se ver a comparação das curvas força-deslocamento de um provete com parafuso com o correspondente sem parafuso. A figura 4.2 diz respeito a provetes com delaminação de 20mm e a figura 4.3 a provetes com delaminação de 15mm.



**Figura 4.2** Curvas força-deslocamento de provetes com 20mm de delaminação com e sem parafuso.

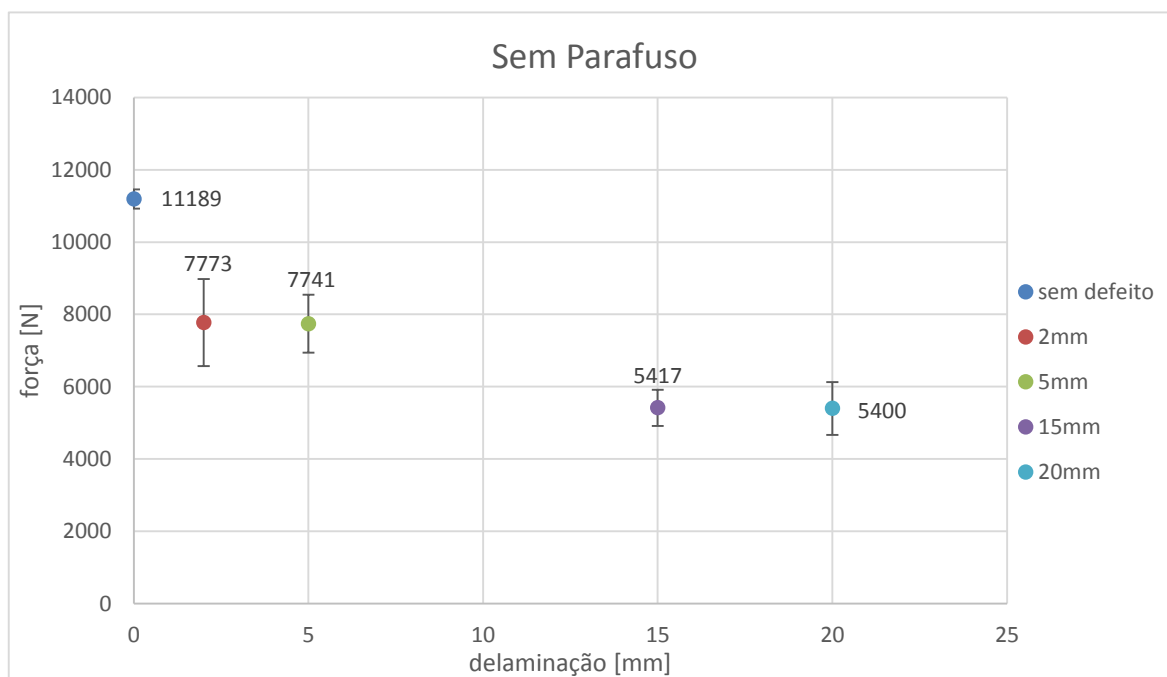


**Figura 4.3** Curvas força-deslocamento de provetes com 15mm de delaminação com e sem parafuso.

Como é possível observar-se pelas figuras 4.2 e 4.3 a aplicação do parafuso fez alterar as curvas força-deslocamento, fazendo com que os valores de força e deslocamento aumentassem, 31% e 34% respetivamente. Contudo nem todos os provetes apresentaram

esse comportamento quando lhes foi aplicado o parafuso, de seguida será mostrado mais profundamente que influência o parafuso teve em todos os provetes em função dos tamanhos de delaminação induzida.

O principal parâmetro usado para realizar as comparações entre os diversos provetes ao longo deste trabalho foi a força máxima a que estiveram sujeitos durante o ensaio, visto que a área transversal dos provetes se mantém constante. Na figura 4.4. está representada a média e a banda de dispersão da força máxima a que os diferentes tipos de provetes sem parafuso estiveram sujeitos durante os ensaios.

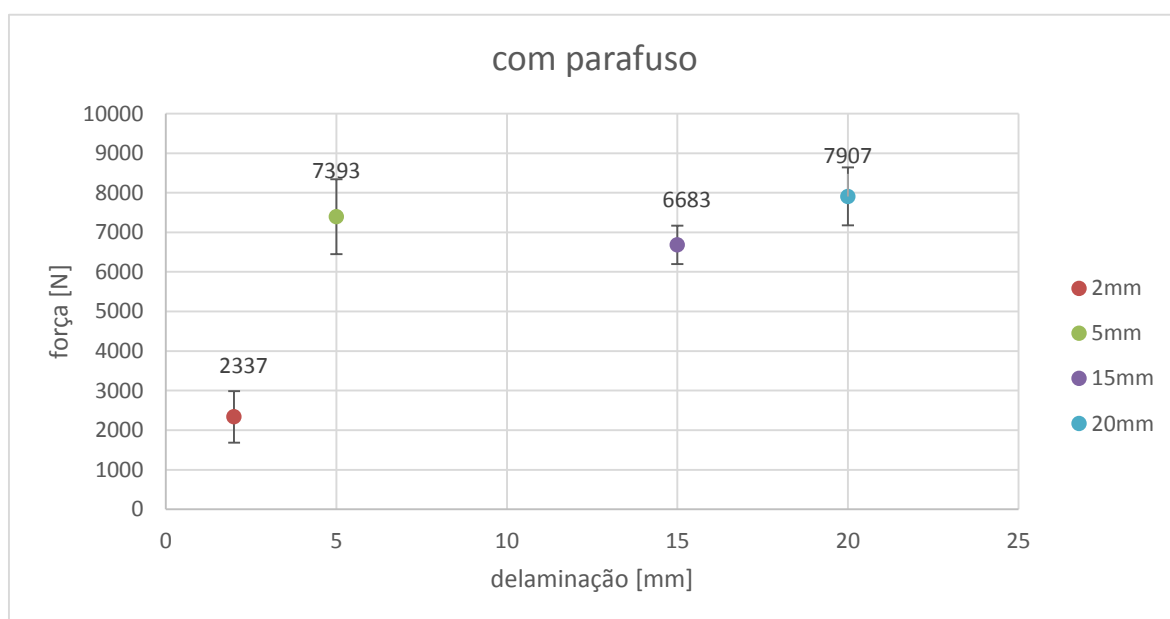


**Figura 4.4.** Evolução da força máxima com o tamanho da delaminação nos provetes sem parafuso.

Analisando a figura 4.4. pode-se observar que os provetes que apresentaram uma maior resistência à compressão foram os provetes sem qualquer tipo de defeito, como seria de esperar. É possível reparar também que a resistência à compressão diminui significativamente com a presença de uma delaminação. Relativamente aos provetes com delaminações, os que apresentam um melhor comportamento são os que têm os comprimentos de delaminação mais baixos (2 e 5mm). Nos provetes que possuíam delaminações maiores (15 e 20mm) o seu comportamento piorou comparativamente com os

outros. Consegue-se observar que não existe diferença significativa entre os provetes com delaminação de 2 e 5mm e entre os provetes com 15 e 20mm. Este facto está em conformidade com o estudado por Reis *et al* 2009, que através da realização de ensaios de tração, indicou que a presença de uma delaminação promove a diminuição da força, mas para delaminações muito pequenas ou muito grandes a variação do tamanho da delaminação não tem uma influência muito significativa na resistência.

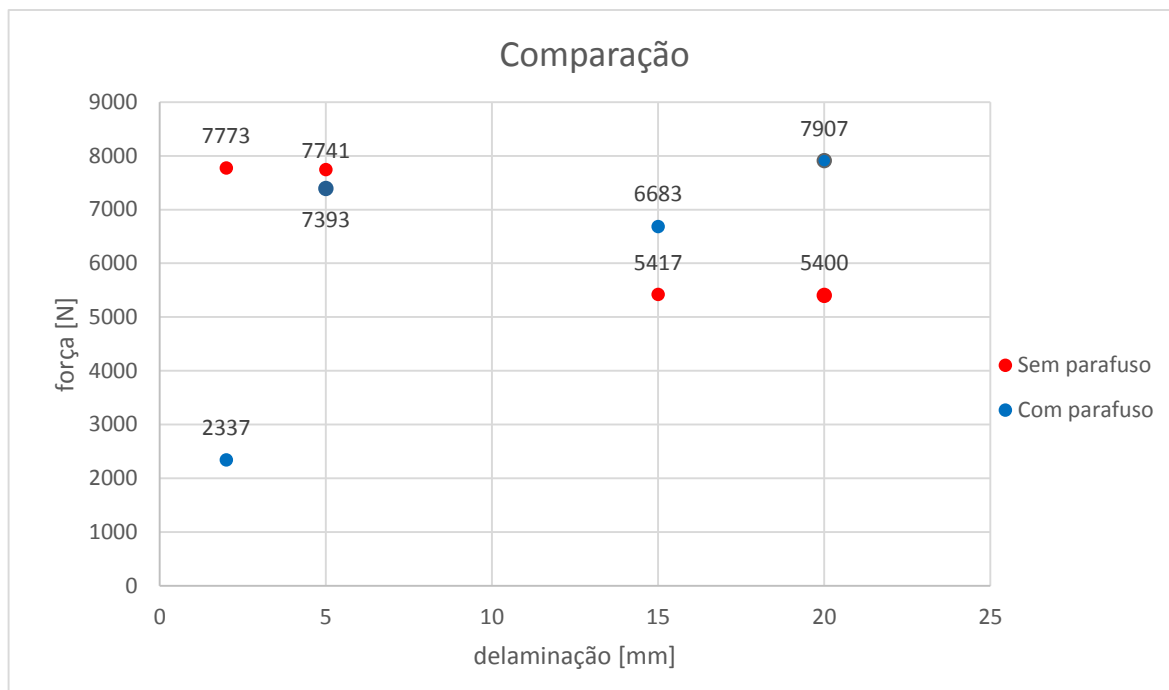
De forma a estudar a influência da aplicação da técnica de reparação em provetes delaminados, foram realizados ensaios de compressão em provetes que foram sujeitos à aplicação de um parafuso ao longo da espessura do provete no centro da região delaminada. Na figura 4.5 está representada a média e a banda de dispersão da força máxima a que os diferentes tipos de provetes com parafuso estiveram sujeitos durante os ensaios.



**Figura 4.5.** Evolução da força máxima com o tamanho da delaminação nos provetes com parafuso.

Pela figura 4.5 pode-se verificar que os provetes com 2mm de delaminação foram os que apresentaram uma força máxima menor, enquanto que os restantes provetes apresentam valores de força não muito diferentes. Verifica-se que existem valores de força máxima para os provetes de 5, 15 e 20 mm que encontram-se dentro da banda de dispersão de todos eles o que prova que a diferença entre os resultados obtidos não é muito significativa.

Para uma melhor comparação e compreensão dos resultados obtidos entre os provetes sem parafuso com os provetes com parafuso a figura 4.6. mostra a sobreposição desses mesmo resultados sem os desvios padrão, pois já foram mostrados anteriormente.



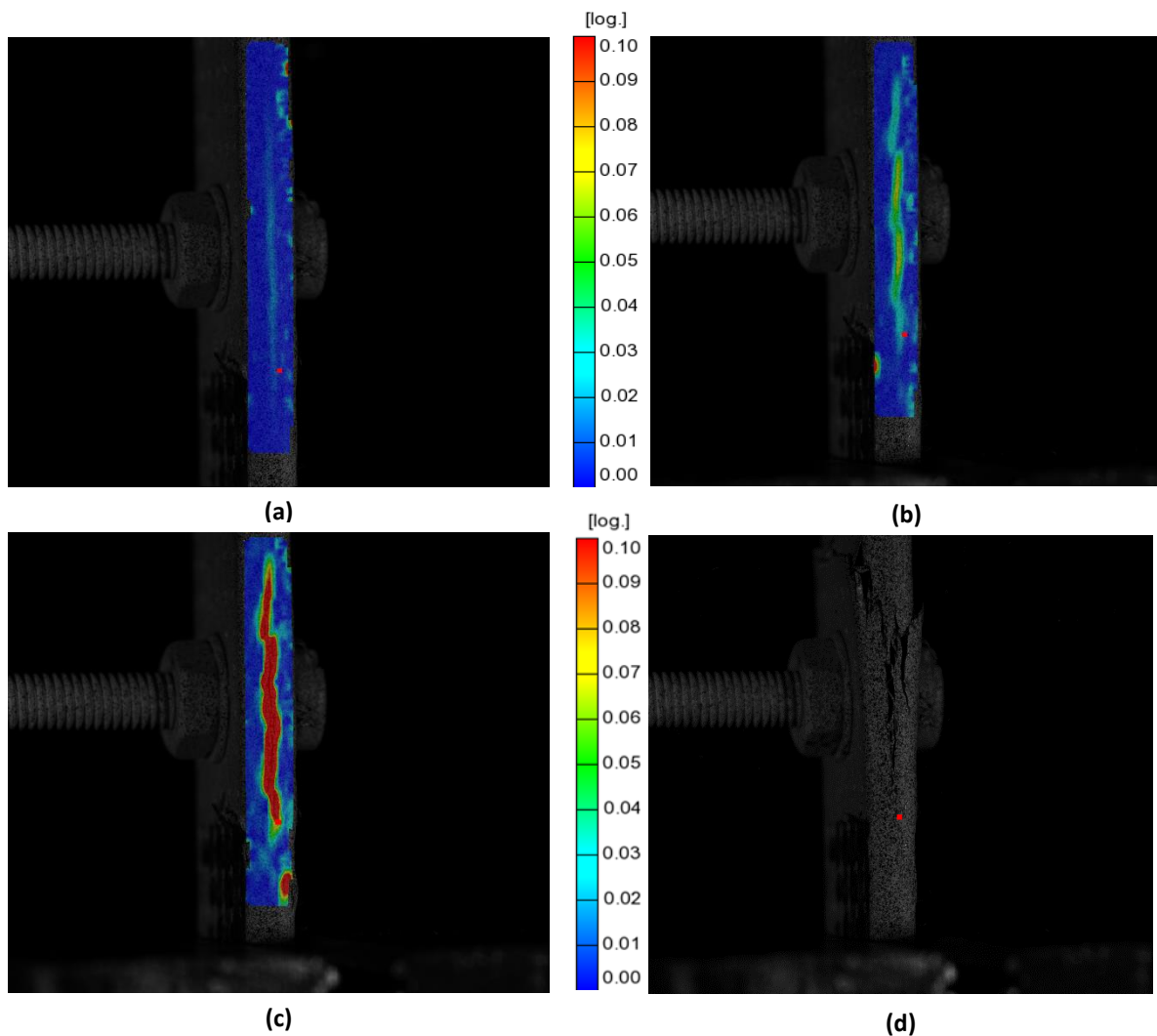
**Figura 4.6.** Comparação entre a força máxima para os provetes com e sem parafuso.

Ao analisar primeiramente os provetes com 2mm de delaminação verifica-se que quando lhe é aplicado um parafuso a força máxima que estes provetes suportam diminui bastante significativamente. Isto pode ser justificado pelo facto de o parafuso aplicado ter 3mm de diâmetro e a delaminação apenas ter 2mm de comprimento. Assim, ao ser aplicado o parafuso estão a ser introduzidas tensões superiores às já existentes devidas à delaminação, as quais podem piorar o comportamento do provete. Assim, pode-se concluir que a técnica de aplicar um parafuso não é útil quando o comprimento da delaminação é inferior ao diâmetro do parafuso. No caso dos provetes com delaminação de 5mm o parafuso não irá ter grande influência relativamente à força máxima que os provetes conseguem aguentar. A justificação encontrada é semelhante à de os provetes com 2mm de delaminação, pois apesar de o diâmetro do parafuso para o caso dos provetes com 5mm de delaminação já ser inferior, essa diferença não é grande o suficiente para o parafuso se revelar útil no comportamento do provete. Observando os valores obtidos para os provetes de 15mm e de 20mm pode-se notar que a aplicação do parafuso revelou-se útil, pois a força máxima suportada pelos provetes

aumentou cerca de 23% e 46%, respetivamente. Através dos resultados obtidos é possível afirmar-se que a utilidade do parafuso aumenta com o aumento do tamanho da delaminação.

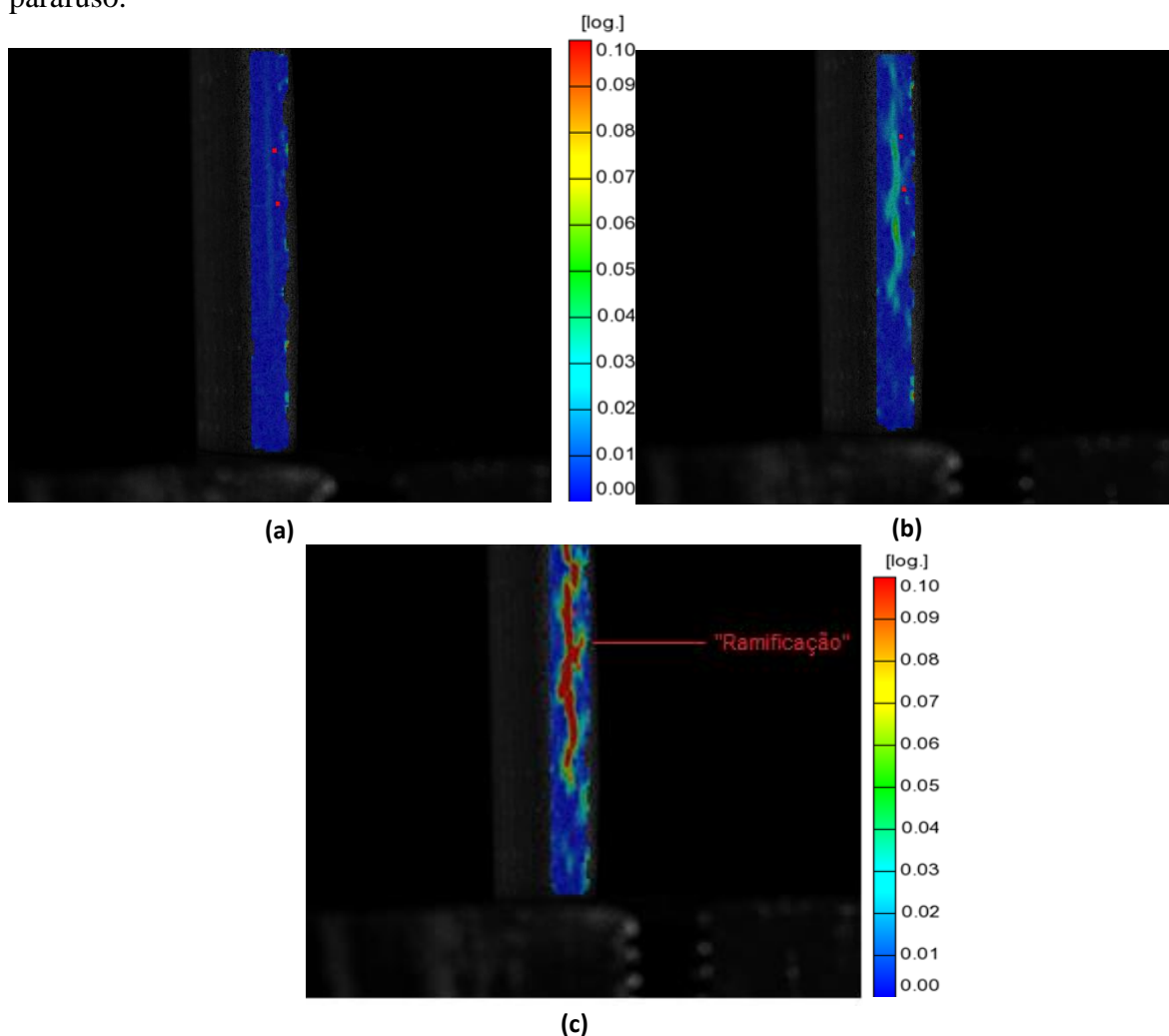
## 4.2. Sequência de Rotura

De acordo com o anteriormente referido, durante a execução dos ensaios foi usado o equipamento Instron 4206, e o sistema ARAMIS, do fabricante GOM. O ARAMIS permitiu obter o campo de deformações e de tensões na região laminada, fazendo o registo dos diversos estágios (de 2 em 2 segundos) de forma a ser possível observar-se o comportamento do material durante o ensaio. A figura 4.7. ilustra várias imagens retiradas pelo ARAMIS durante o ensaio de um provete com 15mm de delaminação.



**Figura 4.7.** Sequência de imagens obtidas pelo ARAMIS ao longo do ensaio de um provete com 15mm de delaminação com parafuso.

Pela imagem (a) da figura 4.7. observa-se perfeitamente a delaminação. Pelas imagens (b) e (c) consegue-se visualizar que valores máximos de deformação vão aumentando ao longo do ensaio e encontram-se na região da delaminação. É possível observar que a região deformada vai se expandindo ao longo do ensaio até levar à rotura do material, como pode ser visualizado na imagem (d). Esta sequência de imagens diz respeito a um provete com 15mm de delaminação reparado pela técnica do parafuso e representa o comportamento típico para os outros provetes, pois em todos eles os valores máximos de deformação encontraram-se na região delaminada e em todos eles a fratura deu-se nesta mesma região. Apesar de todos os provetes terem um comportamento algo semelhante existem algumas diferenças entre os provetes com e sem parafuso. Na figura 4.8 está ilustrada a sequência de imagens obtidas para um provete com 15mm de delaminação sem parafuso.

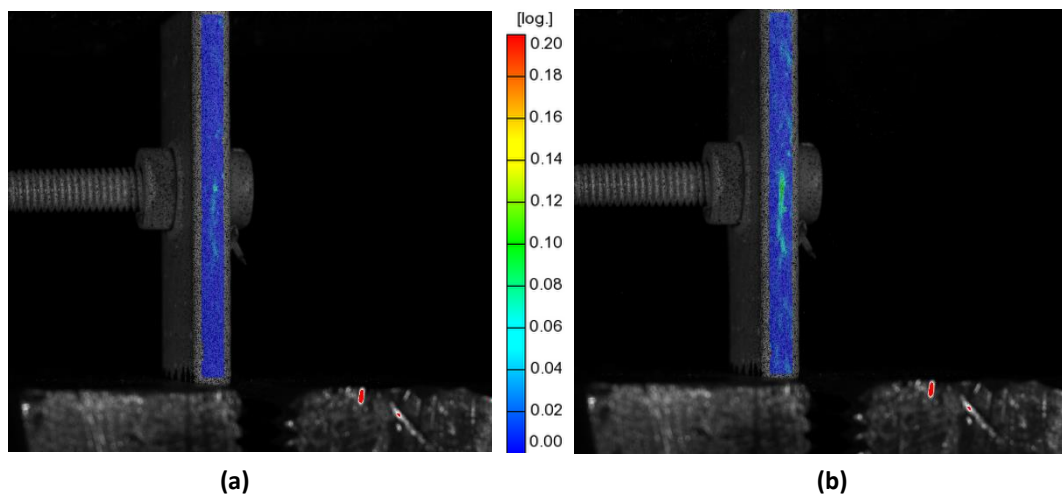


**Figura 4.8** Sequência de imagens obtidas pelo ARAMIS ao longo do ensaio de um provete com 15mm de delaminação sem parafuso.



Pela figura 4.8 pode-se observar que os valores de deformação e a área da zona deformada vão aumentando ao longo do ensaio tal como acontece no caso dos provetes com parafuso. Apesar desta semelhança nos provetes sem parafuso a propagação da área deformada dá-se de uma forma menos regular pois existe uma maior tendência de a zona deformada se propagar até à superfície, formando “ramificações” que surgem devido à acumulação de energia em pequenas irregularidades que o material possa apresentar no seu interior. No caso dos provetes com parafuso, a propagação da zona deformada é mais linear, pois a existência do parafuso leva a que esse fenómeno seja localizado na zona perto do parafuso, sendo que a acumulação de energia vai ser feita maioritariamente na zona do furo criado para inserir o parafuso, de acordo com Casavola *et al* (2012).

Apesar do comportamento dos provetes ser semelhante o tamanho da região deformada varia consoante o tamanho da delaminação. Em provetes com menores tamanhos de delaminação a região deformada será menor como se pode verificar na figura 4.9, que diz respeito a um provete com 5mm de delaminação com parafuso.



**Figura 4.9** Sequência de imagens obtidas pelo ARAMIS ao longo do ensaio de um provete com 5mm de delaminação com parafuso.

(Nota: a escala da deformação na figura 4.9 é diferente da escala apresentada nas figuras anteriores)

### 4.3. Comparação entre Deformação Local e Global

Com a realização dos ensaios foi possível retirar as deformações globais e as deformações locais dos provetes ao longo do ensaio. Na figura 4.10. faz-se a comparação desses dois tipos de deformação. As deformações globais foram retiradas diretamente da máquina (Instron) e as locais do sistema de correlação digital de imagem (ARAMIS).



Figura 4.10. Comparação entre o deslocamento global e o local.

Como se pode observar na figura 4.10. os dois diferentes tipos de deslocamentos têm valores máximos diferentes. Esta diferença justifica-se pelo facto de a deformação global ser efetuada de uma forma menos precisa quando comparada com a das deformações locais, pois a área de estudo no caso das deformações locais é muito menor levando a que a possibilidade de ocorrência de imprecisões seja menor. A deformação global é obtida através do deslocamento da máquina durante o ensaio e abrange toda a zona do provete em análise, e a deformação local é determinada através do deslocamento apenas de um dos pontos do provete.

#### 4.4. Caracterização das Superfícies de Rotura

Depois de realizados os ensaios, e de ter ocorrido a falha dos provetes foram tiradas fotografias destes, a partir das quais foi possível retirar uma ideia de como o defeito inicial se propagou, levando o material até à rotura.

A caracterização da superfície foi realizada através de um microscópio da marca alemã Zeiss, ao qual está acoplada uma máquina fotográfica Canon PowerShot G5, facultado pelo DEM da FCTUC, para conseguir visualizar com maior clareza as zonas em que houve rotura devido à força compressiva exercida durante o ensaio. Na figura 4.11 podem-se observar fotografias dos provetes sem qualquer tipo de defeito depois de terem sido ensaiados.

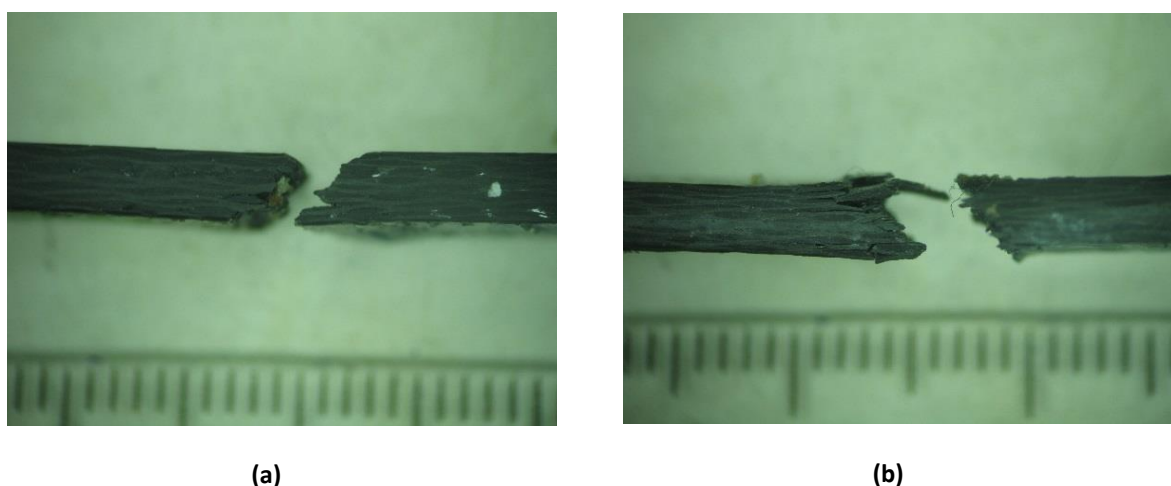
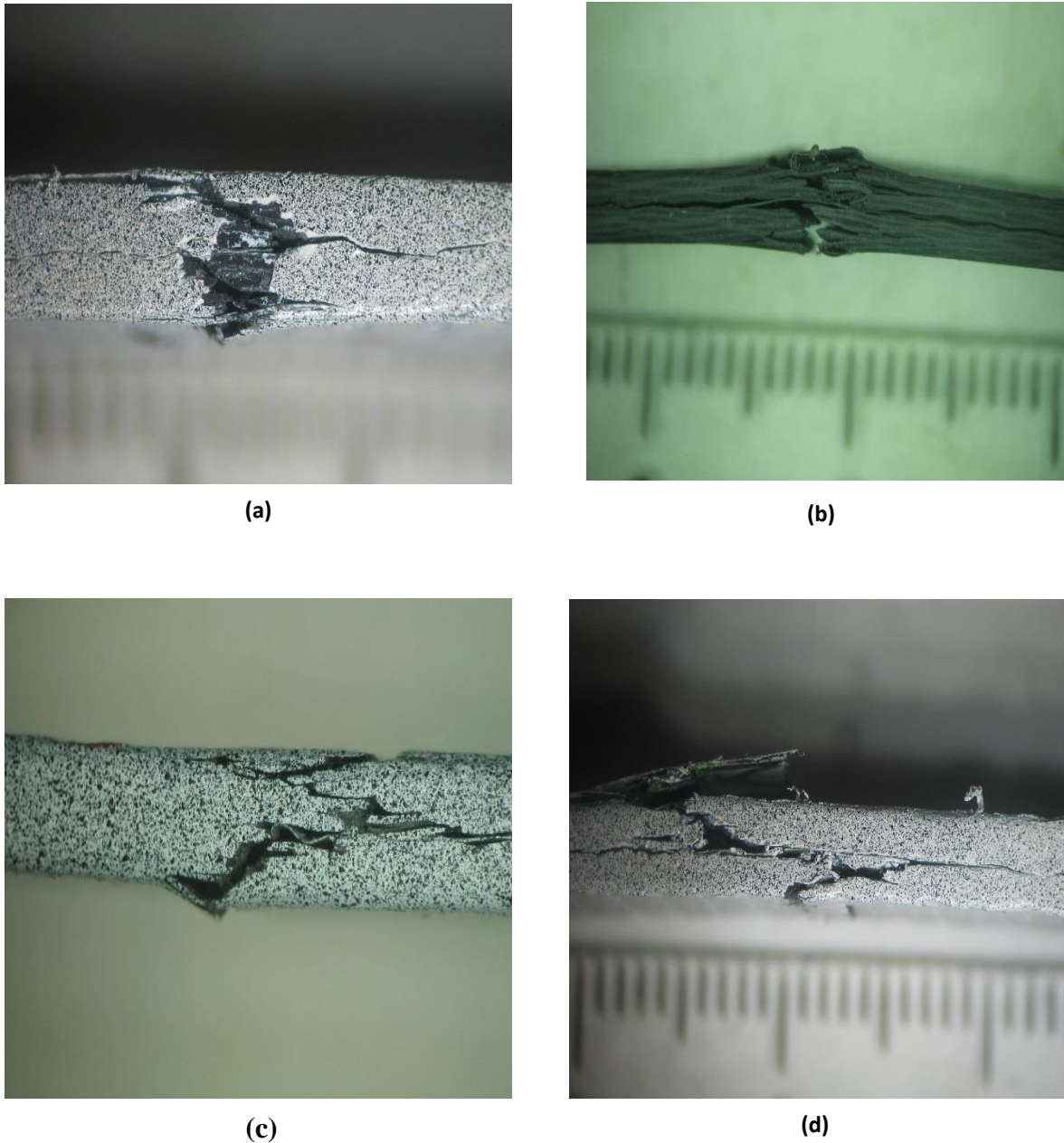


Figura 4.11 Provetes sem defeito

Como se pode verificar pela figura 4.11 os provetes sem defeito apresentam o comportamento semelhante ao dos materiais frágeis quando sujeito a ensaios de compressão, pois não apresentam uma fase elástica significativa. Estes não se deformam lateralmente e a rutura ocorre por cisalhamento e escorregamento devido a tensões de corte, ao longo de um plano inclinado de, aproximadamente  $45^\circ$ .

Na figura 4.12 pode-se observar as fotografias tiradas aos provetes com diferentes tamanhos de delaminação sem parafuso.

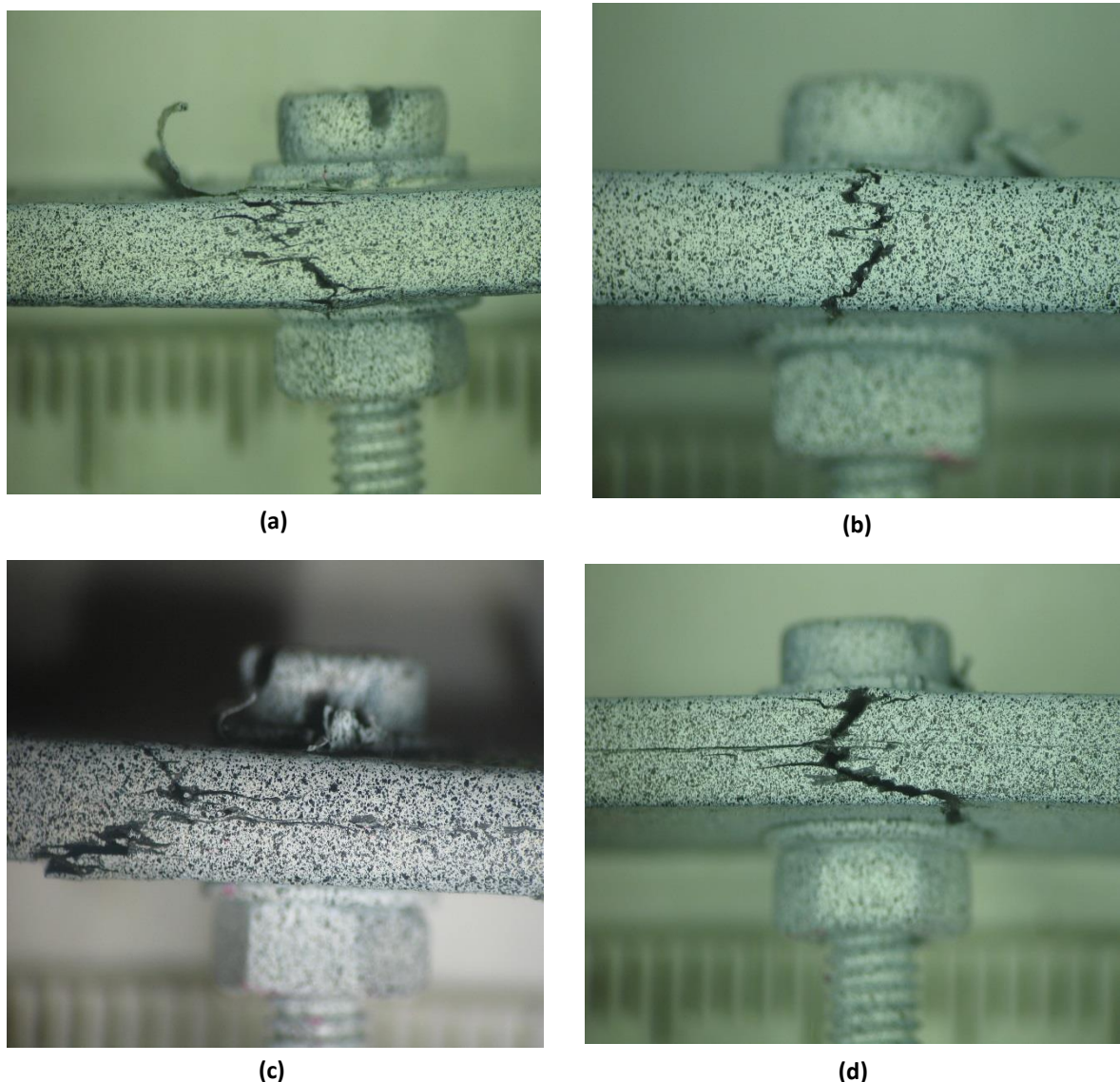


**Figura 4.12** Provetes com delaminação (a) 2mm (b) 5mm (c) 15mm (d) 20mm

Pela figura 4.12 verifica-se que o material fraturou maioritariamente devido à propagação do defeito inicial. Isto acontece pois existe uma maior concentração de tensões

e energia acumulada na região delaminada que tem tendência a se propagar até à superfície. Contudo nos provetes em que o tamanho da delaminação é menor (a) e (b) pode-se verificar que a rotura acontece também devido às tensões de corte.

Na figura 4.13 pode-se observar as fotografias retiradas aos provetes com diferentes tamanhos de delaminação com parafuso.

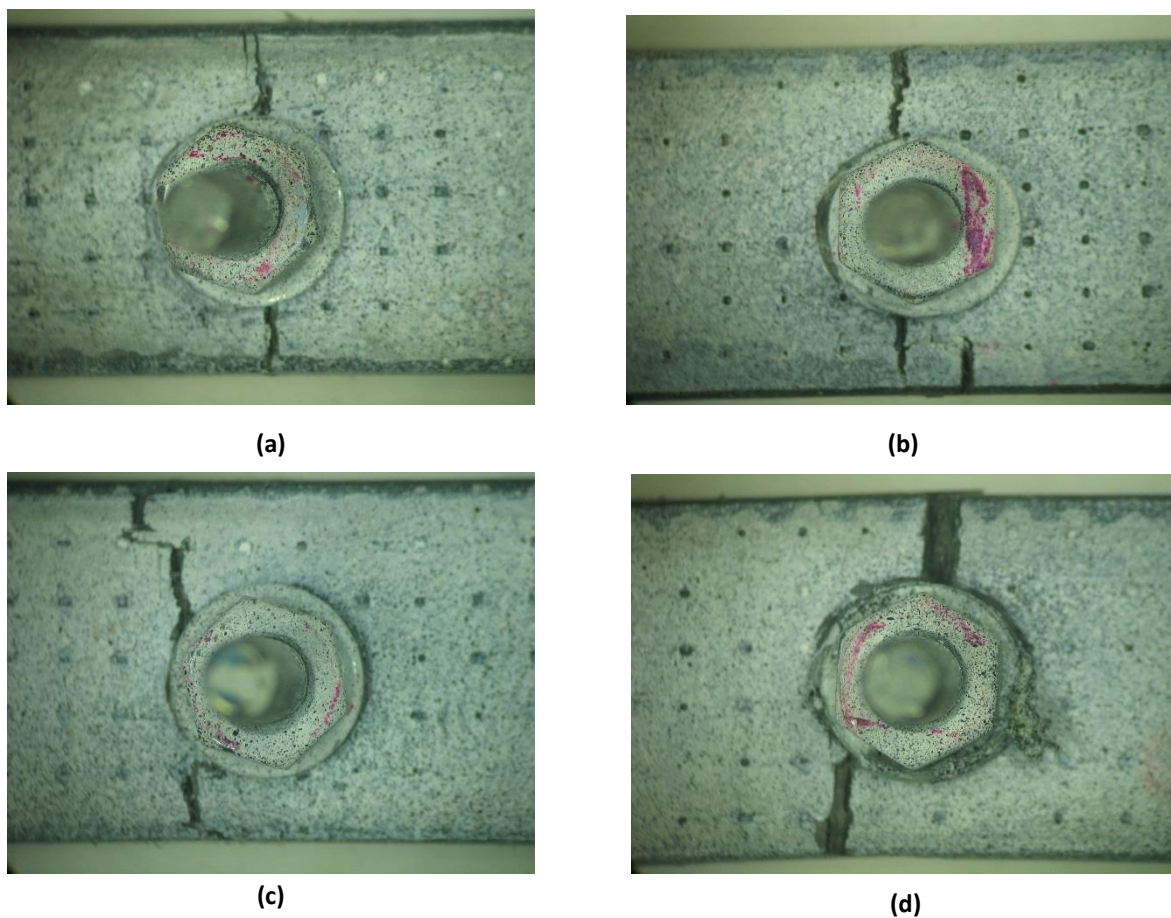


**Figura 4.13** Provetes com parafuso (a) 2mm (b) 5mm (c) 15mm (d) 20mm.

Pela figura 4.13 pode-se verificar que nos provetes com parafuso a região fraturada é menor do que nos provetes sem parafuso (figura 4.12), pois a fratura é localizada

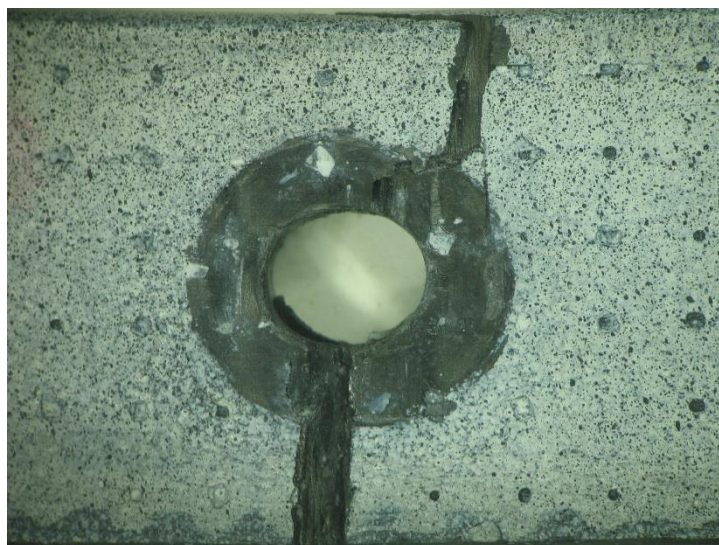
maioritariamente na região do furo criado para a colocação do parafuso. Casavola *et al* (2012) indicam que em provetes com furos, a aplicação de esforços produz um aumento das tensões na região da fronteira do furo, criando a iniciação de fraturas locais que originam uma redistribuição das tensões. Este facto leva a acreditar que nos provetes em que se aplicou um parafuso a fratura deveu-se maioritariamente devido ao furo para a introdução do parafuso e não à delaminação ou ao tamanho desta. Esta constatação pode ajudar a justificar o facto de os valores de força máxima obtidos durante os ensaios, exceto nos provetes com 2mm de delaminação, terem sido semelhantes para os provetes com parafuso independentemente do tamanho da delaminação.

Na figura 4.14 podem ser vistos os mesmos provetes mostrados na figura 4.13, mas de outra vista, de forma a ser possível visualizar a região onde a fratura se sucedeu.



**Figura 4.14** Provetes com parafuso (a) 2mm (b) 5mm (c) 15mm (d) 20mm.

Pela figura 4.14 é possível verificar e justificar o que foi dito anteriormente, pois pode-se visualizar que a fratura se sucedeu junto ao parafuso em todos os provetes, independentemente do tamanho da delaminação. Para uma melhor visualização da fratura foi retirado o parafuso de um provete (d), tal como se pode verificar na figura 4.15.



**Figura 4.15** Morfologia da fissura num provete com 20mm de delaminação sujeito à técnica de reparação.

Como se pode observar pela figura 4.15 a fratura atravessa a zona do furo, isto acontece pois existe um aumento da concentração de tensões na região do furo durante o ensaio, o que leva à iniciação de fraturas que se irão propagar até chegarem à superfície.

## **5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO**

### **5.1. Conclusões**

As principais conclusões que podem ser retiradas deste estudo são que a aplicação de um parafuso transversalmente na zona delaminada apenas tem uma influência positiva no comportamento do material quando o tamanho da delaminação é significativamente superior ao diâmetro do parafuso. Verificou-se que a utilidade do parafuso aumenta com o aumento do tamanho do defeito e diminui com a diminuição deste. Averiguou-se que nos casos em que o diâmetro do parafuso usado na reparação é inferior ou semelhante ao tamanho do defeito o parafuso não tem qualquer utilidade, podendo mesmo piorar o comportamento do material. Para além destas conclusões relativas ao uso do parafuso, concluiu-se que o tamanho da delaminação não tem uma influência muito significativa na força máxima suportada pelos provetes.

### **5.2. Propostas de Trabalho Futuro**

Para uma possível continuação deste trabalho, são apresentadas alguns pontos relacionados com o trabalho realizado possíveis de estudar. Um dos parâmetros que não se teve em conta ao longo deste trabalho foi a força de aperto do parafuso, força essa que pode ter alguma influência no comportamento do material, por isso seria interessante fazer um estudo onde a força de aperto fosse variada de forma a perceber de que forma ela pode influenciar o comportamento mecânico do material. De forma a aprofundar o trabalho realizado seria pertinente fazer o mesmo tipo de ensaios para diferentes tamanhos de delaminação, usando tamanhos superiores aos já realizados visto que a técnica usada revelou uma maior utilidade para os provetes que apresentaram os maiores tamanhos de delaminação.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

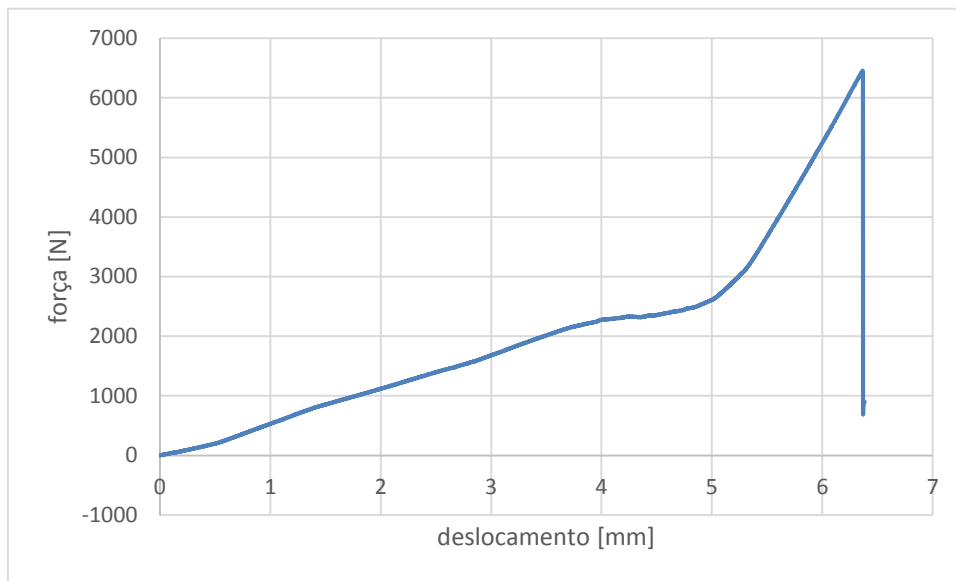
- A.M. Amaro, P.N.B. Reis, M.F.S.F. de Moura, M.A. Neto (2013) *Composite Structures* 97 239-244
- A. M. Amaro, P. N. B. Reis and M. F. S. F. de Moura (2011) *Strain An International Journal for Experimental Mechanics*
- A. M. Amaro, P. N. B. Reis, M. F. S. F. de Moura, and A. Neto (2014). *Fibers and Polymers* 2014, Vol. 15, No.3, 560-565
- A.M. Amaro and Reis P.N.B. (2010), Environmental Effects On Compressive Strength After Impact Loads In Composite Laminates, *Advanced Composites Letters*, Vol. 19, Iss. 3, 2010
- B. Caroline (2004) – “Green Composites – Polymer composites and the environment”, Woodhead Publishing Ltd.
- B. Harris, “*Engineering Composite Materials*”, The Institute of Materials, London 1999
- C. Casavola, R. Giannoccaro, C. Pappalettere and C. Soutis (2012) – “Open hole compressive strength of composite laminates and sandwich panels: comparison between Budiansky-Fleck-Soutis model and experiments” Article in *Plastics Rubber And Composites* . June 2012
- C. Leitão, Costa, M.I., Khanijomdi, K., Rodrigues, D.M. – “Assessing Strength and Local Plastic Behaviour of Welds by Shear Testing”, Elsevier Science Publishers Ltd, Coimbra, Portugal, 2013
- F. Collombet, ., Bonini, J. and Lataillade, J.L. (1996). A Three-dimensional Modelling of Low Velocity Impact Damage in Composite Laminates, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39: 1491-1516
- F. D. Denículo, *Determinação de Propriedades Termoelásticas de Compósitos Particulados de Matriz de Metal Utilizando um Modelo Micromecânico*, Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 1999, (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Processo de Fabricação)
- F. S. F. Marcelo, Alfredo B. de Moraes, António G. de Magalhães (2011) – “Materiais compósitos – Materiais, fabrico e comportamento mecânico”, Publíndústria, Produção de comunicação Lda
- F. W. Smith., *Princípios de Ciências e Engenharia dos Materiais*, 3º ed, Lisboa, Portugal, Editora Mc Graw-hill, 896pg, 1998;
- Federal Aviation Administration - “Advanced Composite Materials”- chapter 7  
[http://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aircraft/amt\\_airframe\\_handbook/media/ama\\_ch07.pdf](http://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_ch07.pdf)

- H.C.H. Li, P.J. Callus, I. Herszberg (2006), “Through-thickness reinforcement repair of delaminated carbon-epoxy panels”, In: *Composite Structures* 75 (2006) 539-544
- J. M. Berthelot, (1992), “A Model for Predicting Damage in Graphite/Epoxy Laminated Composites Resulting from Low-Velocity Point Impact”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 14, 2134 - 2169
- K. B. Katman, A.J. Comer, D. Roy, L. F. M. da Silva & T. M. Young (2015) *Composite Repair in Wind Turbine Blades: An Overview*, *The Journal of Adhesion*, 91:1-2, 113-139
- L. Mei - “*Temperature and Moisture effects on Composite Materials for Wind Turbine Blades*” - March, 2000.
- L.M. Pereira Durão, João Manuel R. S. Tavares, A. Torres Marques, A. Gonçalves Magalhães, M. Freitas – “Estudo da Influência da Preé-Furação no Dano em Laminados Carbono/Epóxido” - Centro de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica, Depto de Engenharia Mecânica, ISEP (2008)
- L.M. Pereira Durão, João Manuel R. S. Tavares, A. Torres Marques, A. Gonçalves Magalhães, M. Freitas – “Estudo da Furação de Laminados Carbono/Epóxido com diferentes Brocas” - Centro de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica, Depto de Engenharia Mecânica, ISEP (2010)
- Modern Airliners - <http://modernairliners.com/>
- M. R. Wisnom, - “The role of delamination in failure of fibre-reinforced composites” (2012) - <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/370/1965/1850>
- P. N. B. Reis, Ferreira, J. A. M., Costa, J.D.M. and Richardson, M.O.W. (2009). Fatigue Life Evaluation for Carbon/Epoxy Laminate Composites under Constant and Variable Block Loading, *Composites Science and Technology*, 69: 154-160.)
- P. N. B. Reis, J. A. M. Ferreira, F. V. Antunes, M. O. W. Richardson (2009). Effect of Interlayer Delamination on Mechanical Behavior of Carbon/Epoxy Laminates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, No. 22/2009
- R. A. Smith “*Materials Science and Engineering – Vol. III – Composite Defects and Their Detection*” Structural Material Centre, QinetiQ Ltd, Cody Technology Park, Farnborough, UK <http://www.eolss.net/sample-chapters/c05/e6-36-04-03.pdf>
- Resistência dos Materiais II - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra – Apontamentos das aulas
- T. Palucka, B. Bensaude-Vincent, - “History of Recent Science & Technology” – *Composites Overview*  
[http://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/composites/Composites\\_Overview.htm](http://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/composites/Composites_Overview.htm)
- W. Kuo-Wei, Chang-Lun Lee, Yuan-Chang Chang, Ching-Long Ong (1995), “Compressive strength of delaminated and repaired composite plates”, In: *Materials Chemistry and Physics* 43 (1996) 173-177

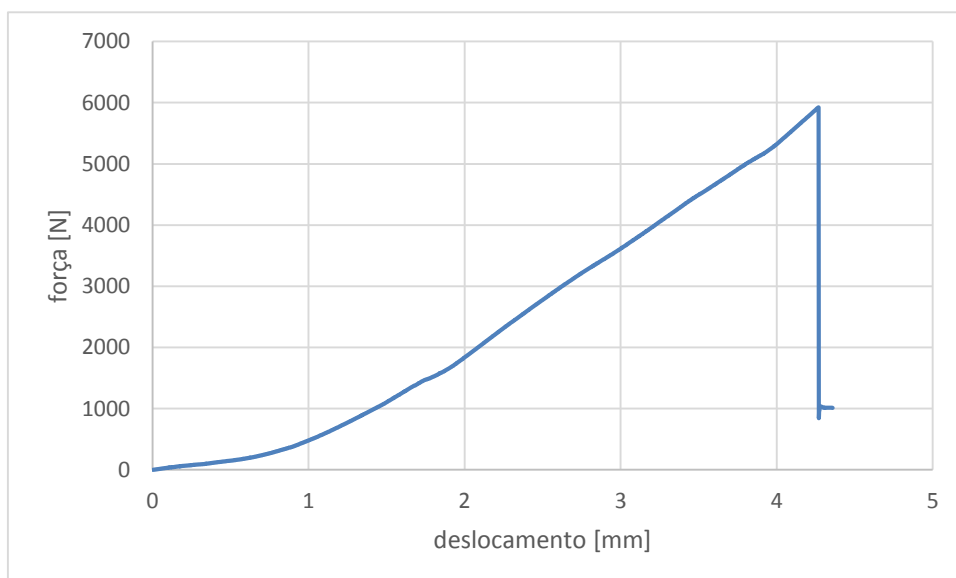
W. D. Callister, *Material Science and Engineering*. New York: Ed. John Wiley Sons.  
Inc, 1997.

## APÊNDICE A – CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO

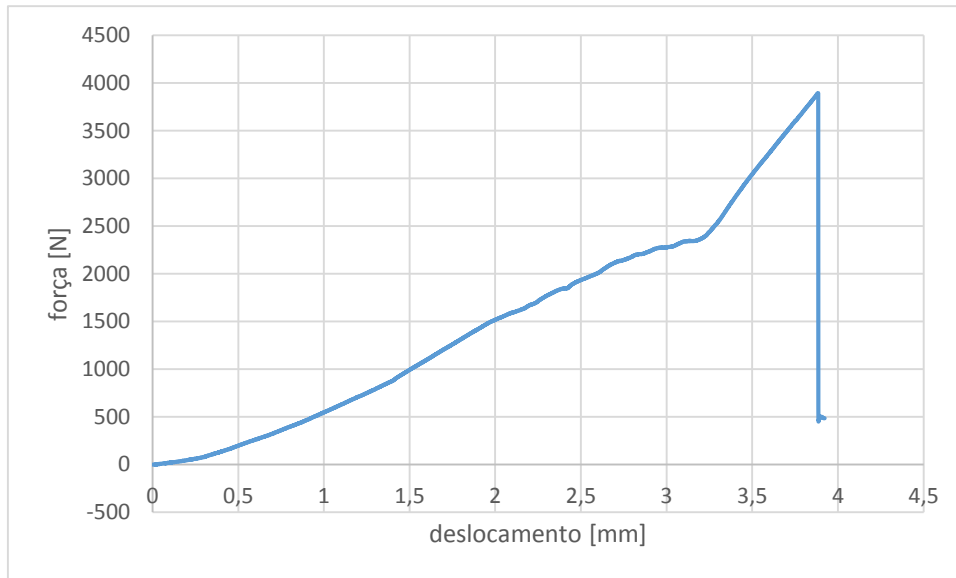
Gráficos relativos ao subcapítulo 4.1.



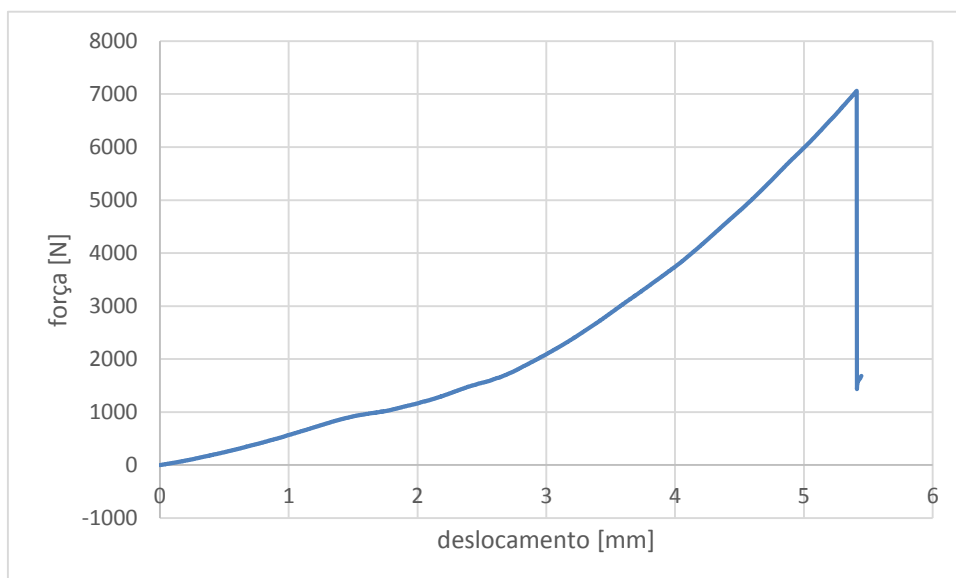
**Figura A.0.1** Curva força-deslocamento de um provete sem parafuso com 2mm de delaminação.



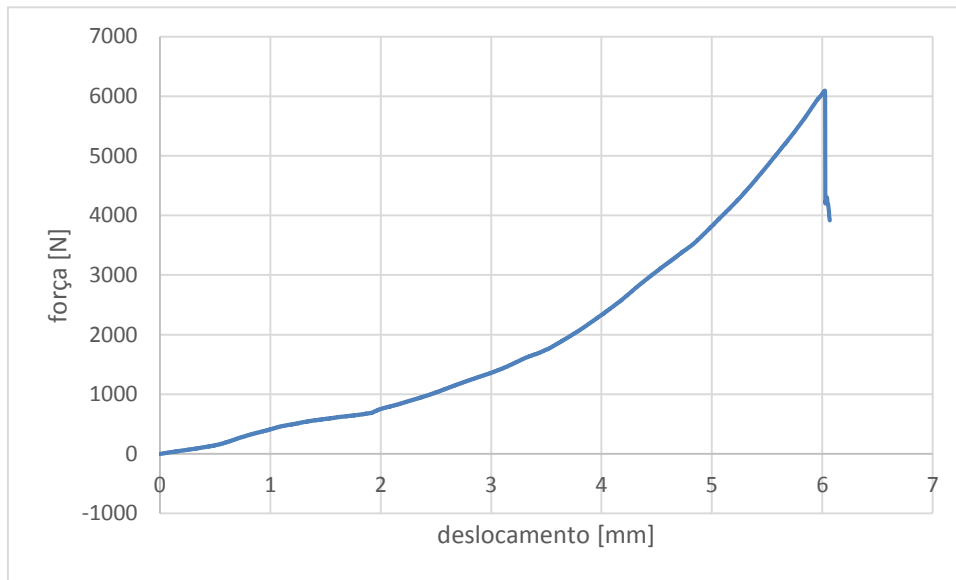
**Figura A.2** Curva força-deslocamento de um provete com parafuso com 5mm de delaminação.



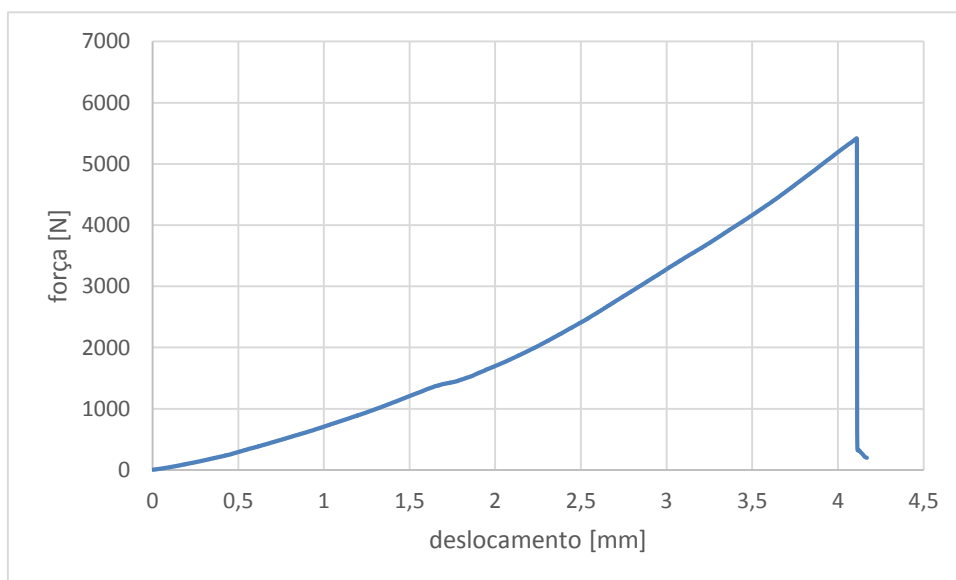
**Figura A.3** Curva força-deslocamento de um provete sem parafuso com 5mm de delaminação.



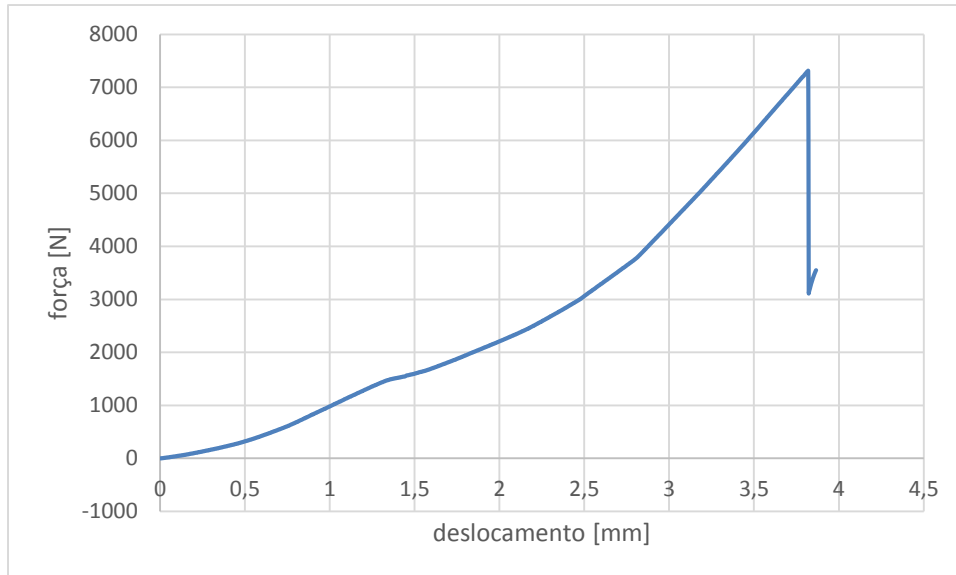
**Figura A.4** Curva força-deslocamento de um provete com parafuso com 15mm de delaminação.



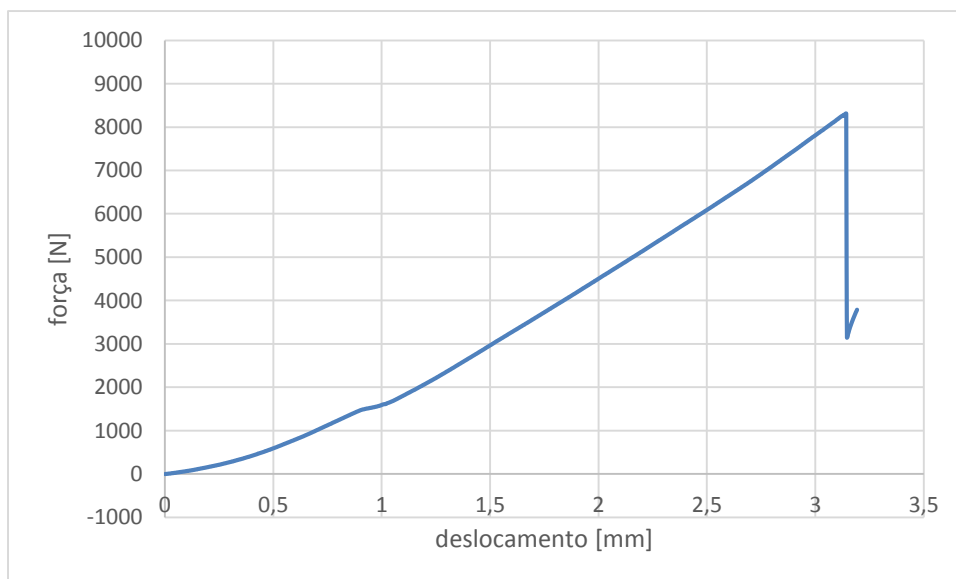
**Figura A.5** Curva força-deslocamento de um provete com parafuso com 15mm de delaminação.



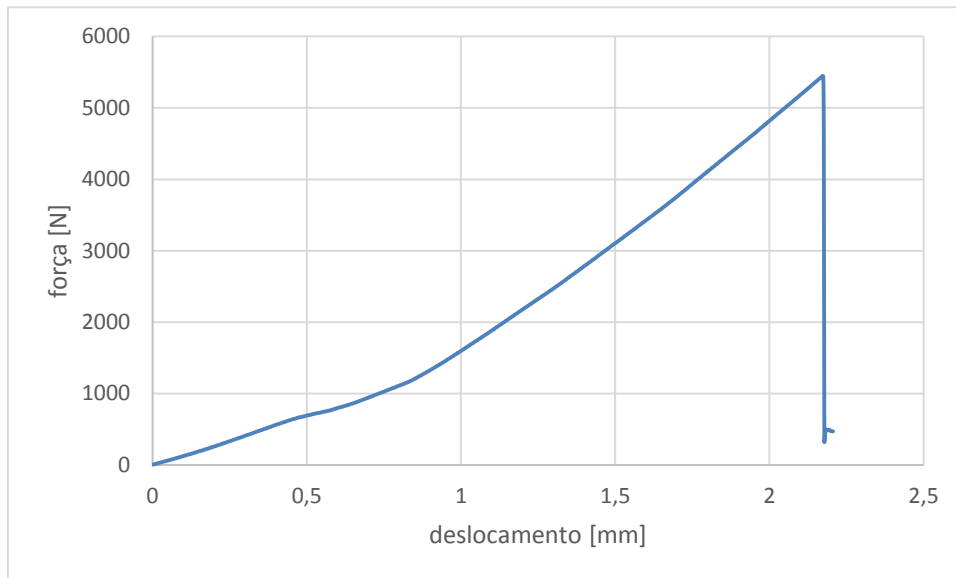
**Figura A.6** Curva força-deslocamento de um provete sem parafuso com 15mm de delaminação.



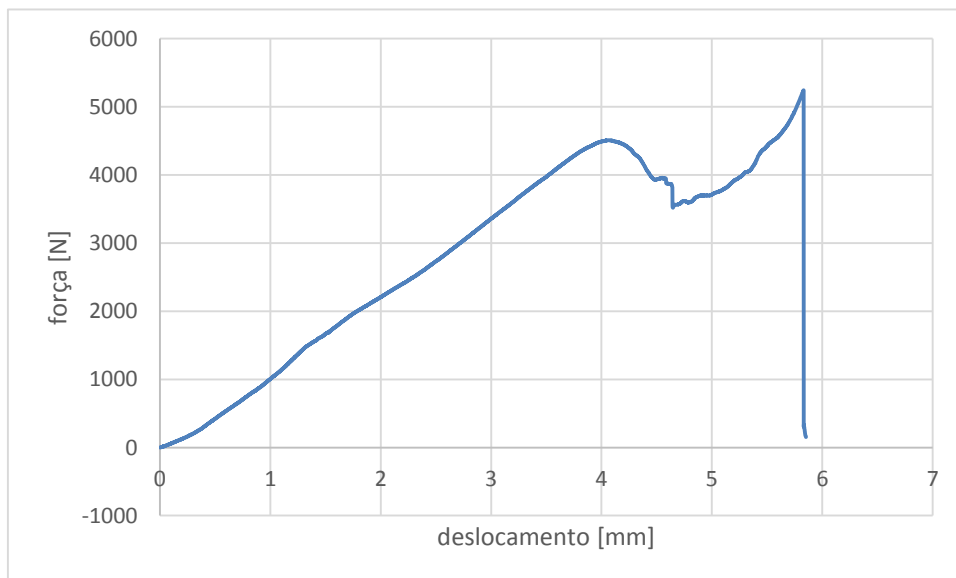
**Figura A.7** Curva força-deslocamento de um provete com parafuso com 20mm de delaminação.



**Figura A.8** Curva força-deslocamento de um provete com parafuso com 20mm de delaminação.



**Figura A.9** Curva força-deslocamento de um provete sem parafuso com 20mm de delaminação.



**Figura A.10** Curva força-deslocamento de um provete sem parafuso com 20mm de delaminação.