



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Determinação de Tensões Residuais em Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Aplicando a Técnica do Furo Incremental**

## **Estudo da influência do processo de furação**

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

**Autor**

**Marco António Ferreira Ferraz**

**Orientador**

**Professor Doutor João Paulo da Silva Gil Nobre**

**Júri**

**Presidente** Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro  
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor João Paulo da Silva Gil Nobre  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra  
Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra  
Professor Doutor António Adriano Castanhola Batista  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Setembro 2011**

Aos meus avós, tios e amigos

## Agradecimentos

O trabalho presente nesta tese, só foi possível com a colaboração, incentivo e apoio de algumas pessoas, as quais presto a minha sincera gratidão, nomeadamente:

- ❖ Ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo da Silva Gil Nobre, pela sua dedicação, disponibilidade, orientação, ensino, compreensão e mais importante de tudo, por me ter presenteado com a sua amizade.
- ❖ Ao Professor Doutor António Adriano Castanhola Batista, pela sua disponibilidade e auxílio na fase inicial de preparação dos ensaios.
- ❖ Ao Engenheiro Rui Alves pela disponibilidade na resolução de algumas questões ao longo da tese.
- ❖ Aos meus Pais e Avó, por me proporcionarem esta oportunidade de prosseguir estudos, pela sua compreensão, pelo sacrifício suportado ao longo destes anos e acima de tudo pelo amor, carinho e excelente educação dados.
- ❖ Ao meu irmão pela sua amizade, ajuda e apoio quando foi necessário.
- ❖ Aos meus grandes amigos, em especial, da Gera-X e da Faculdade, pelo apoio, disponibilidade, pelos bons e maus momentos, por me terem brindado com a sua amizade e camaradagem

## Resumo

No presente trabalho foi utilizada uma metodologia para quantificar o efeito da furação durante a aplicação da técnica do furo incremental (IHD) para a determinação de tensões residuais em compósitos laminados, em particular, nos compósitos de matriz polimérica (PMC) reforçada com fibras de carbono (CFRP). A metodologia aplicada, permitindo quantificar as deformações induzidas pela operação de furação, visa a otimização destas operações pela minimização daquelas deformações. Deste modo, tendo em consideração as dificuldades inerentes às operações de corte neste tipo de materiais, as operações de furação poderão ser melhoradas, não só para a aplicação da técnica do furo, mas também para os processos de furação industriais em geral.

A metodologia utilizada no presente estudo é baseada num procedimento de calibração experimental seguido de uma simulação numérica de todo o processo. A comparação direta dos resultados experimentais e numéricos permite avaliar a deformação induzida pelo processo de furação no compósito.

A metodologia foi aplicada no estudo do processo de furação a alta velocidade de dois tipos de laminados carbono/epóxico: Laminado unidirecional “*single-ply*”  $(0^\circ)_4$  e laminado multidirecional “*cross-ply*”  $(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$ . Nos dois provetes foi estudado o efeito da velocidade de corte, mantendo-se todos os outros parâmetros de furação inalterados, incluindo a geometria da ferramenta. O processo de furação utilizado foi a fresagem a alta velocidade usando ar comprimido, um processo normalmente utilizado com a técnica do furo. A variação da velocidade de corte foi conseguida através da alteração da pressão do ar à saída do compressor, sendo regulada a pressão entre 2,7 bar e 4 bar.

A comparação dos resultados obtidos na calibração experimental e na simulação numérica, permitiram concluir que as deformações parasitas induzidas pela furação diminuem com o aumento da velocidade de corte. Além disso, os resultados obtidos permitem concluir que a técnica do furo poderá ser desenvolvida no futuro para ser aplicada na determinação de tensões residuais neste tipo de materiais.

**Palavras-chave:** Tensões Residuais, Técnica do Furo Incremental (IHD), Tensões de Furação, Polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP), Compósitos Laminados.

---

## Abstract

A methodology to quantify the effect of drilling during the application of the incremental hole drilling technique (IHD), for determining residual stresses in composite laminates, particularly the carbon-fibres reinforced polymers (CFRP), was used in the present study. This methodology, allowing quantifying the deformation induced by the drilling operation, seeks to optimize these operations by minimizing those deformations. Thus, taking into account the difficulties inherent to this type of cutting materials, drilling operations can be improved, not only for the application of the hole-drilling technique, but also for industrial processes in general.

The methodology used in this study is based on experimental calibration procedure followed by a numerical simulation of the entire process. Direct comparison of experimental and numerical results allows us to evaluate the deformation induced by the process of drilling in the composite.

The methodology was applied to study the process of high speed drilling of two types of composite laminates carbon/epoxy. Unidirectional laminate "*single-ply*"  $(0^\circ)_4$  and multidirectional laminate "*cross-ply*"  $(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$ . In both cases we have examined the effect of cutting speed, keeping all other parameters of drilling, including the geometry of the tool. The drilling process was used to high speed machining using compressed air, a process normally used with the incremental hole-drilling technique. The variation of cutting speed was achieved by changing the air pressure outside the compressor, the pressure is regulated between 2.7 bars and 4 bars.

The comparison of experimental results obtained in the calibration and numerical simulation seems to show that the parasite drilling-induced strain decreases when cutting speed increases. In addition, the results show that the hole-drilling technique could be developed in the future to be applied for residual stress determination in this kind of materials.

**Keywords** Residual stress, Incremental hole-drilling, Drilling stress, Carbon Fibre Reinforcement Polymer (CFRP), Composites Laminates.

## Índice

Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas .....	vii
Simbologia e Siglas .....	viii
Simbologia.....	viii
Siglas .....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Estrutura da tese.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP).....	5
2.1.1. Matriz Polimérica .....	6
2.1.2. Fibras de Reforço .....	8
2.1.3. Disposição das Fibras nos Laminados.....	10
2.2. Tensão-Deformação em Materiais Ortotrópicos.....	12
2.2.1. Teoria Clássica dos Compósitos.....	12
2.2.2. Concentração de Tensão em torno do Furo .....	13
2.3. Tensão Residual em Materiais Compósitos.....	14
2.4. Técnica do Furo Incremental .....	16
2.4.1. Aplicação aos Materiais Compósitos .....	16
2.4.2. Determinação da Tensão Residual em Materiais Compósitos .....	18
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	21
3.1. Material Carbono/epóxido .....	21
3.2. Procedimento Experimental.....	22
3.2.1. Máquina de tração e Sistema de Medida.....	22
3.2.2. Parâmetros da Furação.....	24
3.3. Princípio e Calibração Experimental .....	26
3.3.1. Aplicação ao caso em estudo.....	29
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	30
4.1. Provetes unidirecional $(0^{\circ})_4$ .....	30
4.1.1. Comportamento Elástico .....	30
4.1.2. Relaxação da deformação.....	31
4.2. Provetes multidirecional $(0^{\circ}_2/90^{\circ}_2)_{2s}$ .....	32
4.2.1. Comportamento Elástico .....	32
4.2.2. Relaxação da deformação.....	33
5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA E DISCUSSÃO .....	34
5.1. Modelo Numérico .....	34
5.2. Carbono/epóxido $(0^{\circ})_4$ .....	36
5.2.1. Comportamento Elástico .....	36
5.2.2. Relaxação da deformação.....	37
5.3. Carbono /epóxido $(0^{\circ}_2/90^{\circ}_2)_{2s}$ .....	42
5.3.1. Comportamento Elástico .....	42
5.3.2. Relaxação de deformação.....	43
6. CONCLUSÕES.....	47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Avião orbital X-34 da NASA ( <a href="http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/x-34.html">http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/x-34.html</a> ) .....	1
Figura 2. <i>Cross-ply</i> CFRP (Nobre 2010).....	5
Figura 3. Distribuição da tensão na matriz e na fibra (Soung,2009).....	6
Figura 4. Representação esquemática, A) linear, B) ramificada, C) reticulada, dos polímeros. ( <a href="http://energy-in-industry.joanneum.at">http://energy-in-industry.joanneum.at</a> ).....	7
Figura 5. Estrutura cristalina da grafite (Berthelot,1999).....	9
Figura 6. a) Laminado unidirecional ( $0^\circ$ ); b) Construção laminado $[0/+45/-45/90]_s$ laminado simétrico (Staab,1999).....	11
Figura 7. Metade de uma camada ( $0^\circ / 90^\circ$ ) s indicando a tensão residual existente (Dato,1991).....	15
Figura 8. Interpretação física dos coeficientes de calibração, para cada incremento (Sicot et al., 2003).....	19
Figura 9. Modelo de calibração com extensómetros nas direções principais (Sicot et al.,2003).....	20
Figura 10. Máquina de tração e sistema de medida.....	23
Figura 11. Sistema anti flexão. ....	23
Figura 12. Vishay RS-200. ....	24
Figura 13. Broca apoiada no equipamento. ....	24
Figura 14. Exemplo da disposição do extensómetro no provete. ....	25
Figura 15. Furo no centro da roseta. ....	25
Figura 16. Provete com extensómetros todos colados (Nobre 2010).....	25
Figura 17. Fluxograma do método aplicado (Nobre 2010). ....	26
Figura 18. Princípio de calibração (Nobre 2010). ....	27
Figura 19. Carregamento cíclico do provete na furação (Stiffel,2010).....	29
Figura 20. Ensaio de tração provete unidirecional. ....	30
Figura 21. Relaxação da deformação a 2.7 bar.....	31
Figura 22. Relaxação da deformação a 4 bar.....	31
Figura 23. Ensaio de tração provete multidirecional “ <i>cross-ply</i> ”. ....	32
Figura 24. Relaxação da deformação no provete “ <i>cross-ply</i> ” a 4 bar.....	33
Figura 25. Elemento quadrático 3D com 20 nós ( <a href="http://web.mit.edu/calculix_v2.0/CalculiX/ccx_2.0/doc/ccx/node16.html">http://web.mit.edu/calculix_v2.0/CalculiX/ccx_2.0/doc/ccx/node16.html</a> ) .....	34
Figura 26. Malhagem do modelo numérico para o provete $(0^\circ)_4$ .....	35
Figura 27. Malhagem do modelo numérico para o provete $(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$ .....	35
Figura 28. Comparação dos valores experimentais e numéricos do ensaio de tração.....	36
Figura 29. Relaxação da deformação a $0^\circ$ . ....	38
Figura 30. Relaxação da deformação a $90^\circ$ . ....	39
Figura 31. Relaxação da deformação a $45^\circ$ . ....	40
Figura 32. Distribuição da tensão Sigma X, tensão normal segundo X, em torno do furo. ....	41
Figura 33. Distribuição da deformação segundo X em torno do furo. ....	41
Figura 34. Distribuição da tensão Sigma Y, tensão normal segundo Y, em torno do furo. ....	41
Figura 35. Distribuição da deformação segundo Y em torno do furo. ....	41
Figura 36. Ensaio de tração provete $(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$ . ....	42
Figura 37. Relaxação da deformação a $0^\circ$ . ....	44
Figura 38. Relaxação da deformação a $90^\circ$ . ....	44

Figura 39. Relaxação da deformação a 45° .....	45
Figura 40. Distribuição da tensão Sigma X, tensão normal segundo X, em torno do furo. ....	46
Figura 41. Distribuição da deformação segundo X, em torno do furo. ....	46



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades do compósito carbono/epóxico (Van Paepegem et al., 2010). .....	21
Tabela 2. Propriedades das fibras do carbono/epóxico (Van Paepegem et al.,2008).....	22
Tabela 3. Determinação da profundidade dos incrementos.....	29
Tabela 4. Valores experimentais e teóricos do ensaio de tração do provete (0°) <sub>4</sub> .....	37
Tabela 5. Valores experimentais e teóricos do ensaio de tração do provete (0° <sub>2</sub> /90° <sub>2</sub> ) <sub>2s</sub> ....	43

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$A_{in}$  – Coeficiente de calibração

$\alpha$  – Ângulo em torno do furo

$B_{in}$  – Coeficiente de calibração

$C_{in}$  – Coeficiente de calibração

$\Delta\varepsilon(z)$  – Tensão residual induzida na furação

$\Delta\varepsilon_{EXP}(Z)$  – Relaxação de tensão de deformação em função de profundidade experimental

$\Delta\varepsilon_{FEM}(Z)$  – Relaxação de tensão de deformação em função de profundidade numérica

$\Delta\varepsilon(z)$  – Relaxação de tensão de deformação em função de profundidade

$\Delta\sigma$  – Tensão de calibração

$E$  – Módulo de Young

$E(z)$  – Erro associado entre valores teóricos e práticos

$E_1$  – Módulo de Young no eixo principal-1

$E_2$  – Módulo de Young no eixo principal-2

$\overline{E}_1$  – Módulo de Young longitudinal do compósito laminado

$\overline{E}_2$  – Módulo de Young transversal do compósito laminado

$E_f$  – Módulo de Young da fibra

$E_L$  – Módulo de Young da camada no sistema de coordenadas-L

$E_m$  – Módulo de Young da matriz

$E_T$  – Módulo de Young da camada no sistema de coordenadas-T

$E_\alpha$  – Módulo de elasticidade da camada anisotrópica na direção  $\alpha$

$\phi$  – Ângulo do eixo principal do laminado

$F_1$  – Força de tração mínima aplicada

$F_2$  – Força de tração máxima aplicada

$G$  – Módulo de elasticidade transversal

$\overline{G}_{12}$  – Módulo de elasticidade transversal do compósito laminado

$G_{12}$  – Módulo de elasticidade transversal no sistema de eixos principal (1,2)

- 
- $G_f$  – Módulo de elasticidade transversal da fibra  
 $G_{LT}$  – Módulo de elasticidade transversal da camada nas coordenadas (L,T)  
 $G_m$  – Módulo de elasticidade transversal de matriz  
 $K$  – Constantes adimensionais  
 $n$  – Constantes adimensionais  
 $\nu$  – Coeficiente de Poisson  
 $\overline{\nu}_{12}$  – Coeficiente de Poisson do compósito laminado  
 $\nu_{12}$  – Coeficiente de Poisson no sistema de eixos principal (1, 2)  
 $\nu_f$  – Coeficiente de Poisson da fibra  
 $\nu_{LT}$  – Coeficiente de Poisson da camada nas coordenadas (L,T)  
 $\nu_m$  – Coeficiente de Poisson da matriz  
 $\sigma_\alpha$  – Tensão tangencial em torno do furo,  
 $\sigma_{1n}$  – Tensão principal longitudinal residual da camada i  
 $\sigma_{2n}$  – Tensão principal residual da camada i  
 $Tg$  – Temperatura de transição vítrea  
 $Tm$  – Temperatura de fusão  
 $\theta_i$  – Direção principal no extensómetro  
 $U_{in}$  – Deformação radial na superfície  
 $V_f$  – Volume da fibra  
 $V_m$  – Volume da matriz

## **Siglas**

ABS – Poli-acrilonitrilo-butadieno-estireno

ASTM – American Society for Testing and Materials

CFRP– Carbon fiber reinforcement polymer

CTE – Coeficiente de expansão térmica

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FRP– Fiber reinforcement polymer

IHD– Incremental hole-drilling

MFI – Método do furo incremental

MIT – Massachusetts Institute of Technology

PA – Poliamida

PAI – Poliamida-imida

PC – Policarbonato

PE – Polietileno

PEEK – Poliéster-éter cetona

PEI – Poliéster-imida

PET – Politereftalato de etileno

PMC– Polymer matrix composite

PMMA – Polimetacrilato de metil

POM – Poliacetal ou óxido de polifenileno

PP – Polipropileno

PPS – Sulfureto de polifenileno

PS – Poliestireno

PSU – Polissulfona

PVC – Policloreto de vinil

## 1. INTRODUÇÃO

Com a evolução dos tempos e das tecnologias, os materiais compósitos de matriz polimérica, devido à sua excelente razão resistência/peso, associada à sua boa resistência à fadiga e corrosão (Piloto e Michino,1994), são cada vez mais utilizados em diferentes tipos de indústria, principalmente a indústria aeroespacial (figura 1), aeronáutica, automóvel e mais recentemente em aplicações na construção civil, como elementos de reforço (Soung,2009).



**Figura 1.** Avião orbital X-34 da NASA  
(<http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/x-34.html>)

A evolução tecnológica permitiu um aumento das aplicações destes materiais nas indústrias devido às suas características, ressaltando as elevadas variações de combinações de compósitos possíveis de efetuar, com o objetivo de obter determinadas características específicas, como por exemplo, a utilização de fibras de carbono ou de vidro no reforço de matrizes poliméricas ou fibras metálicas combinadas com matrizes cerâmicas ou poliméricas.

Com a combinação de materiais que possuem um comportamento térmico diferente, como no caso dos polímeros reforçados com fibras, surgem tensões residuais durante o processo de cura. Estas tensões podem influenciar negativamente o comportamento em serviço destes materiais. O comportamento mecânico é também complexo devido ao facto dos materiais serem anisotrópicos, ortotrópicos ou quase

isotrópicos, dependendo do tipo de matriz, do tipo de fibras utilizadas bem como da orientação das mesmas no material.

Hoje em dia ainda não existe um método científico normalizado para a determinação de tensões residuais em profundidade nos materiais compósitos laminados. Dada a natureza não cristalina da microestrutura de grande parte dos compósitos de matriz polimérica (PMCs), que não permite a utilização normalizada de procedimentos baseados, por exemplo, em difração de raios-X ou de neutrões, sendo estas, técnicas não destrutivas. Neste contexto, a técnica do furo incremental (IHD) é uma técnica promissora para a determinação das tensões residuais, comparada com outras técnicas semidestrutivas (ASTM E 837), carecendo ainda de otimização para a aplicação a este tipo de materiais, uma vez que existem estudos que comprovam ser possível contabilizar as tensões residuais no interior do material compósito (Sicot et al.,2004).

## 1.1. Objetivos

A realização da presente tese tem como objetivo a aplicação e desenvolvimento de uma metodologia, utilizada para a verificação e validação da técnica do furo incremental na determinação de tensões residuais em materiais compósitos laminados, no que concerne ao efeito da operação de furação no material. Neste tipo de materiais é bem conhecida a dificuldade de maquinagem como demonstrado por Durão et al. (2004). Por esse motivo, antes do desenvolvimento de teorias que permitam determinar as tensões residuais instaladas, a partir de um conjunto de curvas de relaxação de deformação superficial *vs* profundidade do furo, obtidas durante a aplicação da técnica do furo incremental, é necessário avaliar a influência que o próprio processo de furação tem no estado de tensão residual inicial que se pretende determinar. Este é um estudo inicial absolutamente decisivo para a validação da aplicação da IHD aos PMC's.

A metodologia utilizada baseia-se em dois métodos complementares:

Numa primeira fase é efetuada uma calibração experimental, usando dispositivos de tração que permitem impor uma tensão de tração uniaxial bem conhecida ao material, determinando-se assim as curvas de relaxação *versus* profundidade do furo, correspondentes ao estado de tensão aplicado.

Numa segunda fase, através da criação de um modelo numérico usando o método dos elementos finitos, é feita uma simulação do processo de furação em condições que se podem considerar ideais.

A comparação direta entre as curvas de relaxação de deformação experimentais e numéricas permite avaliar o efeito do processo de furação, isto é, permite determinar as deformações induzidas pelo processo de furação. Deste modo o processo de furação poderá ser desenvolvido e otimizado de forma a minimizar a introdução destas deformações parasitas induzidas pelo processo. Assim, no futuro, a técnica do furo poderá ser aplicada de forma fiável na determinação de tensões residuais nos materiais PMC's.

No presente trabalho foi estudado, em particular, o efeito da velocidade de corte nos processos de fresagem alta velocidade

## **1.2. Estrutura da tese**

A presente tese é composta por seis capítulos. Seguidamente faz-se um resumo de cada capítulo do documento.

### **Capítulo 2:** Revisão Bibliográfica.

Neste capítulo são inseridos conceitos básicos científicos sobre o comportamento mecânico dos materiais compósitos laminados. É apresentado o método do furo incremental, o seu princípio físico e um método de cálculo possível para a determinação de tensões residuais neste tipo de materiais. É também revista a chamada teoria clássica dos compósitos para a análise do comportamento elástico destes materiais durante os ensaios de tração.

### **Capítulo 3:** Materiais e Procedimentos experimentais.

No capítulo 3 é descrito o material investigado com os diferentes tipos de propriedades. Este contém, em geral, a caracterização mecânica dos dois provetes de carbono / epóxico: um provete de camadas unidireccionais ( $0^\circ$ ) e um de camadas multidireccionais ( $0^\circ_2/90^\circ_2$ )<sub>2s</sub>. Os valores apresentados para a caracterização mecânica da amostra estão separados por secção, o que significa que são dados os valores das propriedades das fibras e do composto final (fibras e matriz).

**Capítulo 4:** Resultados experimentais.

No capítulo 4 são exibidos os resultados obtidos referentes aos ensaios de tração dos provetes e, os ensaios da aplicação do técnica do furo incremental para a furação a alta velocidade. Os resultados são apresentados na forma de gráfico para uma melhor visualização e interpretação dos mesmos.

**Capítulo 5:** Simulação numérica e discussão de resultados.

No capítulo 5 são exibidos os resultados da simulação numérica na forma de gráfico. Estes resultados são comparados aos valores obtidos via experimental para as velocidades referentes à pressão de 2,7 bar e 4 bar. Verificando-se assim quais as diferenças entre o caso ideal e a furação real. É ainda efetuada uma discussão dos resultados finais obtidos por comparação, sendo calculados os erros associados aos mesmos valores.

**Capítulo 6:** Conclusões.

Neste capítulo, são apresentadas as principais conclusões da tese e uma proposta de trabalho futuro para otimização e desenvolvimento da metodologia utilizada.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP)

Os materiais investigados na presente tese pertencem a um grupo materiais compósitos formados por uma matriz polimérica (PMC) e um reforço de fibras de carbono.

A figura 2, exemplifica a construção estratificada deste tipo de material, sendo composto por uma camada de fibras segundo a direção longitudinal ( $0^\circ$ ) e seguida de uma camada de fibras segundo a direção transversal ( $90^\circ$ ). A espessura resina (matriz) não é visível ao microscópio, sendo que a função da resina é servir unicamente para ligar as fibras, estando as estas completamente envolvidas pela resina.

Nas subsecções seguintes descrevem-se os diversos componentes que constituem este compósito.

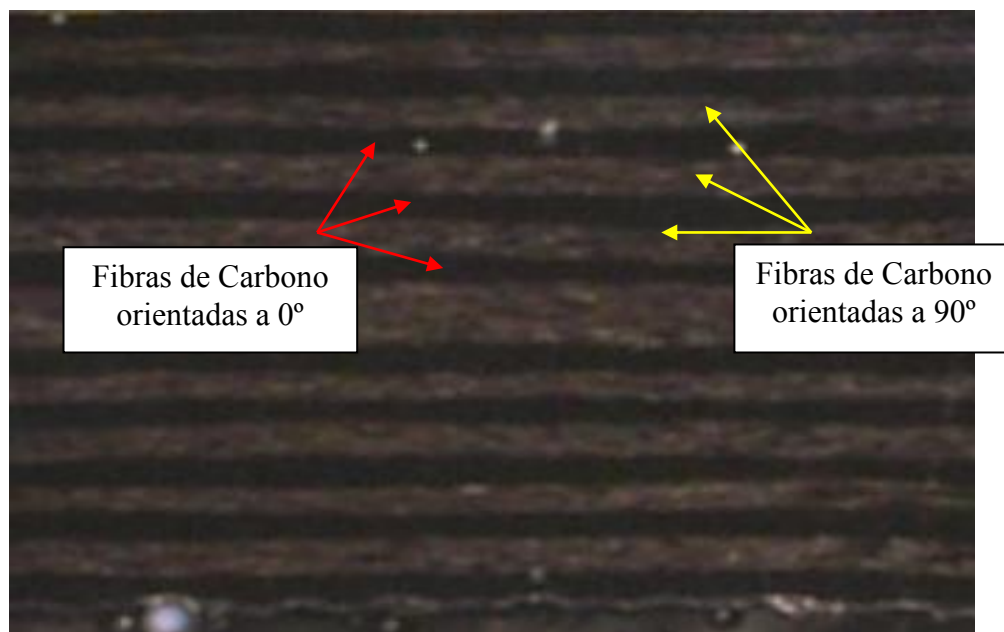


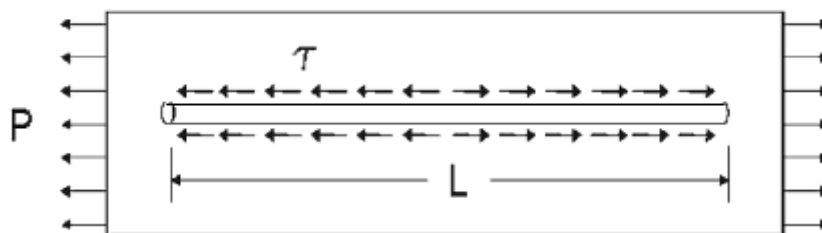
Figura 2. *Cross-ply* CFRP (Nobre 2010).

### 2.1.1. Matriz Polimérica

A matriz de um material compósito é um elemento estrutural preponderante para a sua estrutura e comportamento mecânico, sendo a sua escolha baseada nas propriedades mecânicas e adaptabilidade ao reforço de fibras adicionado. Existem diferentes tipos de matrizes importantes na indústria:

- Matrizes poliméricas.
- Matrizes metálicas.
- Matrizes cerâmicas.
- Matrizes de cimento.
- Matriz carbono-carbono.

A função deste elemento é de garantir uma excelente adesão entre o composto matriz/fibras, permitindo assim um alinhamento correto das fibras nas devidas direções, possibilitando uma distribuição uniforme ao longo do compósito como exemplificado na figura 3. (Piloto e Michino,1994; Soung,2009).

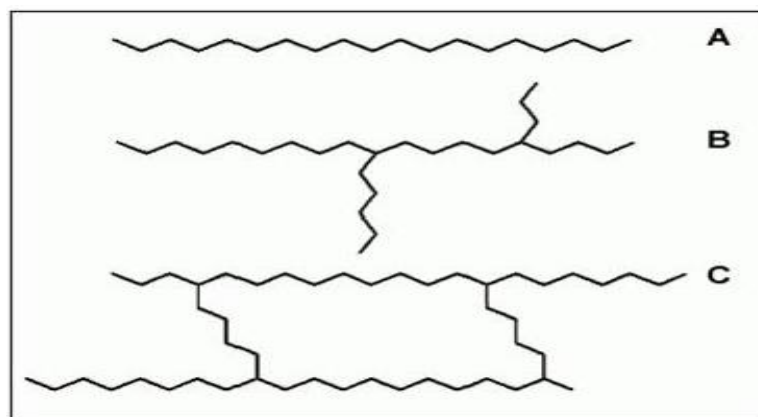


**Figura 3.** Distribuição da tensão na matriz e na fibra (Soung,2009).

Berthelot (1999), refere que um aspecto bastante importante na matriz, que consiste na capacidade de absorver energia e transmitir tensões entre as fibras, fornecendo assim uma maior resistência à fratura, criando assim, uma camada protetora para o material quando submetido as ambientes mais hostis.

Os polímeros atualmente mais utilizados e investigados estão concentrados em duas grandes classes, a classe dos polímeros termoplásticos e a classe dos polímeros termoendurecíveis.

A matriz termoplástica é constituída por grupos de moléculas individuais de estrutura linear (figura 4 A), possuindo ligações fracas entre os grupos de moléculas, ligações de Van der Walls.



**Figura 4.** Representação esquemática, A) linear, B) ramificada, C) reticulada, dos polímeros. (<http://energy-in-industry.joanneum.at>).

Devido ao grande número de matrizes termoplásticas existentes Suong (2009), sugere a alocação destas em duas categorias: matrizes de uso industrial (polipropileno (PP); polietileno (PE); policloreto de vinil (PVC); poliestireno (PS); polimetacrilato de metil (PMMA); poli-acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)), e, matrizes de alto desempenho que possuem propriedades úteis em engenharia.

- Nylons ou poliamida (PA)
- Poliacetal ou óxido de polifenileno (POM)
- Poliamida-imida (PAI)
- Policarbonato (PC)
- Poliéster-éter cetona (PEEK)
- Poliéster-imida (PEI)
- Polissulfona (PSU)
- Politereftalato de etileno (PET)
- Sulfureto de polifenileno (PPS)

A matriz termoendurecível é formada por uma estrutura molecular reticulada (figura 4 C) possuindo ligações primárias covalentes. Estas ligações reticuladas ou cruzadas, são provenientes dos processos de fabrico de polimerização utilizados para melhorar ao máximo as propriedades da matriz, fornecendo assim um reforço estrutural à matriz (Piloto e Michino,1994; Smith,1998).

Estas matrizes possuem grandes vantagens em aplicações de engenharia, destacando-se a sua rigidez, estabilidade térmica elevada, resistência a deformação, baixo

peso e excelentes propriedades de isolamento térmico e elétrico. Deste grupo de materiais destacam-se as seguintes matrizes.

- Fenólica
- Poliéster
- Melamina
- Ureia com celulose
- Alquilamida
- Epóxida

Piloto e Michino (1994), afirmam que as propriedades térmicas dos polímeros são caracterizadas por duas temperaturas principais: a temperatura de fusão ( $T_m$ ) e a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ).

A  $T_g$  é a temperatura a partir do qual o material começa a amolecer, começando a apresentar um aspeto semelhante à borracha. Este nível de temperatura marca o início do movimento molecular, afectando de forma significativa as propriedades da matriz, como por exemplo, o volume específico, o índice de refração, a rigidez e a dureza. Esta temperatura é normalmente referenciada em matrizes termoendurecíveis.

A  $T_m$  é a temperatura a partir da qual o material começa a deformar-se, sendo que neste tipo de material, o comportamento e as propriedades mecânicas são severamente afetadas pela temperatura, causando uma significativa diminuição do seu valor. Esta temperatura é normalmente referenciada em matrizes termoplásticas.

### **2.1.2. Fibras de Reforço**

Em geral, existem diferentes tipos de fibras de reforço, que são usados em combinação com diferentes matrizes. Estas fibras são divididas em dois grupos: um grupo de fibras inorgânicas, como as fibras de vidro ou as fibras de cerâmica, e, um grupo de fibras orgânicas, como a aramida ou as fibras de carbono. Para os estudos experimentais desta tese o reforço selecionado foi as fibras de carbono.

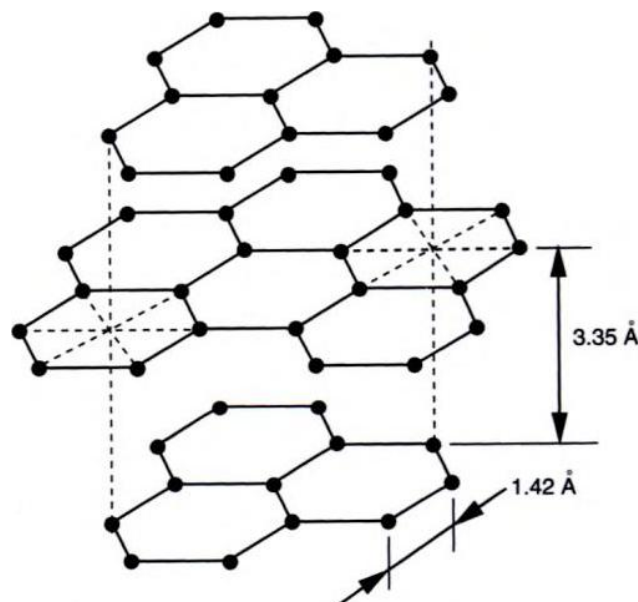
As fibras de carbono utilizadas como reforço em matrizes poliméricas, existem em duas variedades dependendo do seu módulo de resistência à tração. Os valores são desde 207 GPa para fibras de baixa resistência, e 650 GPa para fibras de alta resistência (Berthelot, 1999). As vantagens destas fibras são o seu rácio elevado resistência/peso, um coeficiente muito baixo de dilatação térmica linear e de alta resistência à fadiga. As

desvantagens das fibras de carbono é possuírem uma resistência ao impacto baixa e alta condutividade elétrica, que pode ser perigoso em equipamentos elétricos.

A estrutura da fibra contém uma combinação de uma mistura amorfa de grafite. A razão para o seu módulo de elasticidade ser elevado é devido à organização estrutural da grafite, na qual, os átomos de carbonos estão dispostos em planos cristalograficamente paralelos de hexágonos regulares (figura. 5). A distância entre os planos é maior do que a distância entre os átomos no próprio plano.

Os planos de carbono na grafite são empilhados em uma sequência AB, de modo a aumentar a sua rigidez na malha através de uma configuração estrutural bastante forte. Estes átomos de carbono no plano são conectados por ligações fortes covalentes, no entanto os planos são conectados entre si por ligações fracas, ligações do tipo Van der Waals. Como consequência as fibras carbono apresentam propriedades físicas e mecânicas anisotrópicas.

Os cristais de grafite nos planos estão alinhados ao longo do eixo das fibras, de modo que o alinhamento possa ser circunferencial, radial, ou uma combinação aleatória como radial-circunferencial (Huang,2009; Berthelot,1999).



**Figura 5.** Estrutura cristalina da grafite (Berthelot,1999).

Na produção de fibras de carbono o método utilizado é a pirólise, ou seja, a decomposição através do calor, de material rico em carbono. Este material retém a sua forma fibrosa através de tratamentos térmicos que resultam em carbonização com alto teor carbónico. O processo inicia-se com um pré-tratamento onde a matéria-prima recebe tensões mecânicas que provocam o seu alongamento utilizando vapor. Em seguida os filamentos são esticados a uma temperatura constante de forma a poder alinhar as cadeias poliméricas na direção do filamento, seguindo-se um aquecimento constante e controlado a 250°C aproximadamente.

Durante o processo é necessário fazer uma estabilização físico-química, isto ocorre devido ao surgimento de ligações transversais entre as cadeias moleculares. Após a estabilização físico-química vem o processo de carbonização em atmosfera inerte a alta temperatura, o gás mais utilizado neste ponto do processo é o *Árgon* e a temperatura a utilizada é em torno de 1000 °C. Finalmente os filamentos passam pelo processo de grafitização por aquecimento a 2000 °C onde se proporciona a cristalização ordenada dos cristais de carbono no interior da fibra (Huang, 2009).

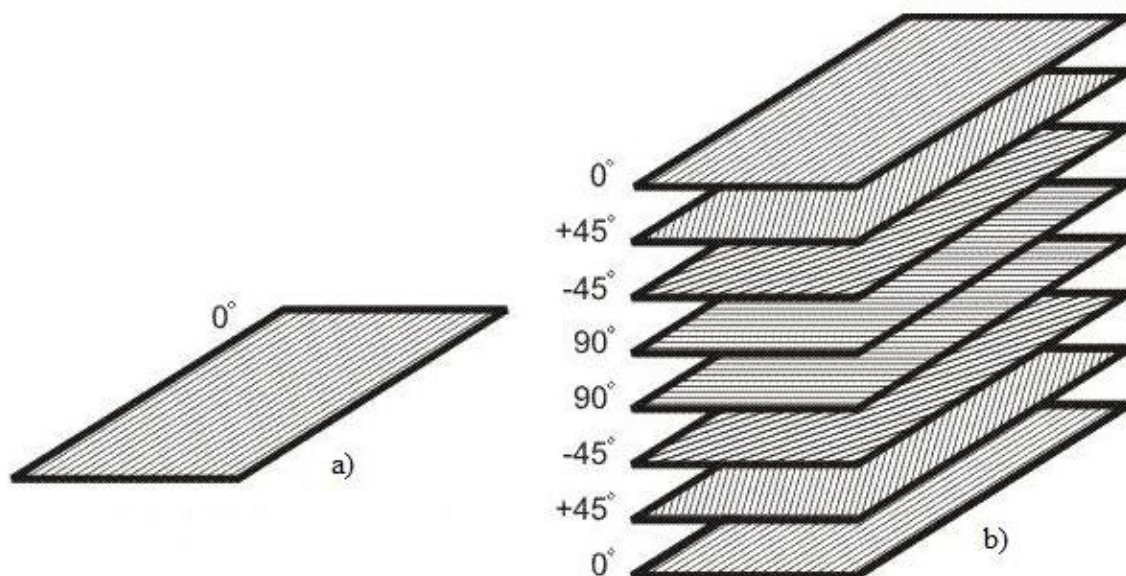
### 2.1.3. Disposição das Fibras nos Laminados

A construção de materiais compósitos laminados é feita em função dos esforços e ambientes a que vão estar sujeitos. Com esse propósito, a nível industrial, desenvolveram-se e otimizaram-se técnicas para melhorar o comportamento e as propriedades mecânicas do laminado, aumentando assim a sua aplicabilidade cada vez maior em componentes estruturais.

A técnica consiste em colocar as fibras de reforço em diferentes direções dentro do laminado, variando ao longo da profundidade. Staab (1999), sugere a seguinte nomenclatura.

- **Laminado de camada única:** Este tipo de laminado é composto por fibras orientadas segundo uma só direcção, disposto em múltiplas camadas.
- **Laminado antissimétrico:** As camadas neste laminado são dispostas em uma forma antissimétrica em relação ao plano médio, por exemplo [-45/-30/-60/60/30/45].
- **Laminado de ângulo:** Neste laminado, as fibras estão orientadas com determinados ângulos nas camadas, por exemplo [... - $\theta$ / $\theta$ /- $\theta$ / $\theta$ ...].

- **Laminado Cruzado:** No laminado cruzado os ângulos de orientação das fibras estão alternados nas camadas, por exemplo [... 0/90/0/90...].
- **Laminado simétrico:** A orientação das fibras deste composto é estruturada simetricamente sobre o plano médio do laminado, o que significa que cada camada acima do plano médio tem uma camada idêntica à distância similar abaixo do plano médio (figura. 6). O laminado composto simétrico, por exemplo, com os ângulos de orientação das fibras [0 / 30 / -30/-30 / 30 / 0] pode ser descrito como [0 / ± 30] s, o índice s significa simetria em relação ao plano médio do laminado composto. Um composto com uma orientação das fibras [0/90/0/90/0/90/90/0/90/0/90/0] é simétrico, mas também tem apenas dois diferentes tipos de camadas em ambos os lados em relação ao plano médio, uma designação para esta construção pode ser laminado multidirecional [0/90]<sub>3s</sub>.
- **Laminado Quasi-Isotrópico:** Este tipo de laminado é produzido com as fibras dispostas, no mínimo, em três orientações diferentes permitindo assim obter um comportamento isotrópico. Alguns exemplos de laminados *quasi-isotrópicos* podem ser [0 / 60 / -60] ou [0 / 45 / -45 / 90], um laminado *quasi-isotrópico* muito frequentemente utilizado na indústria é [0 / 45 / -45 / 90].



**Figura 6.** a) Laminado unidirecional (0°); b) Construção laminado [0/+45/-45/90]s laminado simétrico (Staab,1999).

## 2.2. Tensão-Deformação em Materiais Ortotrópicos

As propriedades elásticas de um compósito unidirecional podem ser descritas segundo Hollaway (1990), presentes nas equações 1, 2 e 3.

$$E = \tilde{f}(E_f, V_f, E_m, V_m) \quad (1)$$

$$\nu = \tilde{f}(\nu_f, V_f, \nu_m, V_m) \quad (2)$$

$$G = \tilde{f}(G_f, V_f, G_m, V_m) \quad (3)$$

Nas equações os símbolos  $E$ ,  $\nu$ ,  $G$  são o módulo de Young, o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade transversal respetivamente, os índices  $f$ ,  $m$  indicam se a constante elástica pertence à fibra ou à matriz.  $V_m$  e  $V_f$  representam a fração de volume pertence à matriz ou fibra existente no compósito laminado.

### 2.2.1. Teoria Clássica dos Compósitos

Para efetuar o cálculo das constantes elásticas do compósito laminado, Ko (1985) sugere um método de cálculo para ser usado em procedimentos experimentais controlados. O método é baseado na **Teoria Clássica dos Compósitos Laminados**, nas equações 4 até 11, as constantes elásticas estão definidas para dois sistemas de coordenadas, um sistema de coordenadas global ( $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$ ) do compósito e um sistema de coordenadas local relacionado com o eixo do material ( $E_L, E_T, G_{LT}, \nu_{LT}$ ) da lâmina.

$$E_1 = \frac{E_L}{\left[ \cos^4\theta + \frac{E_L}{E_T} \sin^4\theta + \frac{1}{4} \left( \frac{E_L}{G_{LT}} - 2\nu_{LT} \right) \sin^2 2\theta \right]} \quad (4)$$

$$E_2 = \frac{E_L}{\left[ \sin^4\theta + \frac{E_L}{E_T} \cos^4\theta + \frac{1}{4} \left( \frac{E_L}{G_{LT}} - 2\nu_{LT} \right) \sin^2 2\theta \right]} \quad (5)$$

$$G_{12} = \frac{E_L}{\left[ 1 + 2\nu_{LT} + \frac{E_L}{E_T} - \left( 1 + 2\nu_{LT} + \frac{E_L}{E_T} - \frac{E_L}{G_{LT}} \right) \cos^2 2\theta \right]} \quad (6)$$

$$\nu_{12} = \frac{E_1}{E_L} \left[ \nu_{LT} - \frac{1}{4} \left( 1 + 2\nu_{LT} + \frac{E_L}{E_T} - \frac{E_L}{G_{LT}} \right) \sin^2 2\theta \right] \quad (7)$$

Onde  $E_1$  e  $E_2$  são os módulos de Young global segundo a direção 1 e 2 respetivamente,  $G_{12}$  é o módulo de elasticidade transversal sobre o eixo (1,2) e  $\nu_{12}$  é o coeficiente de



Poisson segundo a direção (1,2). Os símbolos  $E_L$ ,  $E_T$ ,  $G_{LT}$ ,  $\nu_{LT}$  significam o módulo de Young segundo a longitudinal e transversal, módulo de elasticidade transversal e coeficiente de Poisson, para a fibra.

No caso de o material ter  $N$  camadas diferentes de fibras e mais do que uma orientação das mesmas, aplica-se a regra das misturas devido ao compósito ser multidirecional, nesse caso as constantes elásticas do material ( $\overline{E}_1, \overline{E}_2, \overline{G}_{12}, \overline{\nu}_{12}$ ) são expressas através das equações 8 até 11, para cada orientação das fibras existente no material ( $\theta_j$ ).

$$\overline{E}_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N E_1(\theta_j) \quad (8)$$

$$\overline{E}_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N E_2(\theta_j) \quad (9)$$

$$\overline{G}_{12} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N G_{12}(\theta_j) \quad (10)$$

$$\overline{\nu}_{12} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \nu_{12}(\theta_j) \quad (11)$$

### 2.2.2. Concentração de Tensão em torno do Furo

Num compósito, quando realizado um furo circular, carregado com uma tensão  $\sigma_\infty$  com um ângulo  $\phi$  segundo o eixo longitudinal do laminado, o material tende a encontrar um novo estado de equilíbrio, originando uma concentração de tensão em torno do furo, devido à remoção do material.

O fator de concentração de tensão  $\kappa$  em torno do furo circular pode ser calculado como sugerido por Lekhnitskii e Tsai (1968).

$$\kappa = \frac{\sigma_\alpha}{\sigma_\infty} = \frac{E_\alpha}{E_1} \left\{ \begin{array}{l} [-\cos^2\phi + (k+n)\sin^2\phi] * k * \cos^2\alpha \\ + [(1+n)\cos^2\phi - k * \sin^2\phi] * \sin^2\alpha \\ - n(1+k+n)\sin\phi * \cos\phi * \sin\alpha * \cos\alpha \end{array} \right\} \quad (12)$$

Onde  $\sigma_\alpha$  é a tensão tangencial em torno do furo,  $\alpha$  é o ângulo onde se pretende calcular  $\sigma_\alpha$  em torno do furo,  $E_\alpha$  é o módulo de elasticidade da camada anisotrópica na direção  $\alpha$ , e  $k$  e  $n$  são constantes adimensionais, onde os seus valores se encontram nas equações 14 e 15 respetivamente.

Para o cálculo do fator de concentração de tensão  $\kappa$  é necessário recorrer primeiro às equações 13, 14 e 15. Obtidos os valores das constantes substitui-se depois na equação 12, encontrando assim o fator de concentração de tensão em torno do furo e a tensão tangencial no furo  $\sigma_\alpha$ .

$$\frac{E_\alpha}{E_1} = \frac{1}{\left[ \text{sen}^4 \alpha + \frac{E_1}{E_2} \text{cos}^4 \alpha + \frac{1}{4} \left( \frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12} \right) \text{sen}^2 2\alpha \right]} \quad (2.13)$$

$$K = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \quad (2.14)$$

$$n = \sqrt{2 \left( \frac{E_1}{E_2} - \nu_{12} \right) + \frac{E_1}{G_{12}}} \quad (2.15)$$

### 2.3. Tensão Residual em Materiais Compósitos

Por definição, pode dizer-se que as tensões residuais são tensões multiaxiais estáticas, que existem num sistema isolado sem que sobre ele se exerça qualquer força ou momento exterior, e que se encontram em equilíbrio mecânico. De uma forma geral, toda a heterogeneidade de deformação introduzida numa estrutura conduz à existência de tensões residuais. O estado de tensão residual nos materiais reais resulta de uma sobreposição de ordens de tensão (Lu, 1996).

Fernlund (2003) sugere uma classificação das fontes de tensão residual em fontes internas e fontes externas.

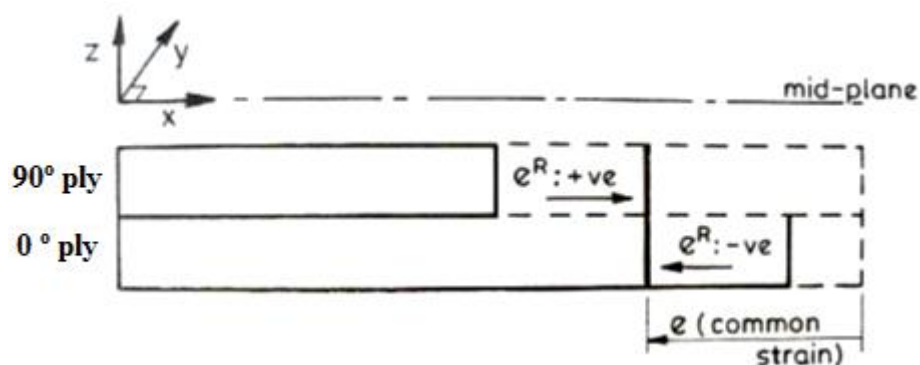
As fontes internas de tensão residual procedem do interior do material até a superfície. Estas estão relacionadas com o tipo de material e o *design*, sendo que, as tensões residuais surgem devido à variação do volume da matriz e das fibras e ao processo de cura do compósito, feito através de um tratamento térmico.

As fontes externas de tensão residual procedem da superfície do material até ao interior, este tipo de tensão residual não é própria do material, depende unicamente do processo mecânico utilizado e das condições de utilização do mesmo. Para o caso da operação de produção do material compósito, as tensões residuais inseridas no compósito dependem da interação ferramenta/material, verificando-se para das circunstâncias do processo e o tipo de processo utilizado, que provoca o aumento dos gradientes de tensão residual no comportamento do material.

O mesmo autor afirma que, a relação de interação fibra/matriz é mais influenciado por fontes internas, estas tensões resultantes são denominadas usualmente muitas vezes por tensões interlaminares, sendo que a nível do comportamento estrutural do compósito, este é mais influenciado por fontes externas. O efeito das tensões residuais no material compósito pode reduzir a força e distorcer a forma do laminado.

Strong (2008) sugere para materiais compósitos, dois tipos diferentes de tensões residuais. O primeiro tipo de tensões residuais ocorre numa camada individual, entre as fibras específicas e o material da matriz. O segundo tipo de tensões residuais resulta entre camadas contínuas na composição do laminado e as orientações de fibras em cada camada, embora ambos os tipos de tensões residuais serem o resultado de empenamento das estruturas do laminado. Além disso, as tensões residuais podem ser causadas por absorção de humidade, que influencia significativamente a expansão da matriz.

Na figura 7, encontra-se esquematizada duas camadas de fibras orientadas em direcções distintas, estas não podem deformar-se livremente e independentemente uma da outra, porque são ligadas entre si. Para manter a compatibilidade com as interfaces adjacentes, as camadas de fibras têm uma deformação adaptativa nas diversas direcções, para o mesmo valor de tensão aplicada.



**Figura 7.** Metade de uma camada ( $0^\circ/90^\circ$ ) s indicando a tensão residual existente (Dato,1991).

O processo de cura da matriz introduz alterações químicas no material. Essas alterações levam a uma maior deformação no sentido transversal do que na direção longitudinal de um laminado unidirecional e, portanto, a deformação de uma camada é constrangida por outras camadas de fibra com orientações diversas, causando tensões residuais em cada camada.

Naik (1984) sugere que as tensões residuais médias macroscópicas, especialmente de origem térmica e mecânica, podem ser medidas através da aplicação do método do furo incremental.

## **2.4. Técnica do Furo Incremental**

O método do furo incremental (IHM) é uma das técnicas das mais usadas para determinar tensões residuais. A técnica do furo incremental é classificada como uma técnica mecânica semidestrutiva segundo a ASTM E 837 (1994). A técnica consiste em fazer um pequeno furo na superfície do material onde se pretendem determinar as tensões residuais, de forma incremental, e medir a relaxação de deformação, devido ao efeito que os sucessivos incrementos do furo provocam no campo de tensão residual instalado no material, por meio de extensômetros elétricos, por exemplo.

Nos subcapítulos descreve-se o desenvolvimento e o princípio da aplicação do método do furo incremental na medição da relaxação de deformações e cálculo de tensões.

### **2.4.1. Aplicação aos Materiais Compósitos**

O método do furo incremental foi originalmente desenvolvido para materiais isotrópicos em geral, para metais em particular, sendo recomendado o sistema de turbina a ar comprimido para fazer furação ultrarrápida (Flaman,1982).

Sicot et al. (2000 e 2003) publicam trabalhos realizados em compósitos, onde a aplicação da técnica do furo foi estudada para velocidades de translação (2, 5, 10 e 50 mm / s) e velocidades de rotação (5000, 7000, 9000 e 11000 rpm) com o objetivo de conhecer quais os parâmetros que proporcionavam um furo melhor. Obtiveram um furo de melhor qualidade com uma broca de 2 mm para a velocidade de 5000 rpm.

O mesmo autor (Sicot et al.,2004) estudou ainda a influência da profundidade relativa dos incrementos de furação, por exemplo, aplicando um incremento por camada, dois incrementos por camada, etc., mantendo sempre constante a espessura da camada de fibras.

Uma vantagem da técnica do furo incremental é a sua capacidade de determinar a distribuição da tensão residual em profundidade. A precisão do método depende do número de incrementos e as suas respectivas profundidades. Efetuando-se um elevado número de incrementos, obtém-se um perfil mais representativo da tensão residual,

mas por outro lado, quanto maior o número de incrementos, maiores erros podem surgir devido ao efeito de propagação do erro, durante o cálculo de tensões residuais.

A seleção do número de incrementos é muito significativa, por exemplo, um incremento por camada, pode causar sobrestimação ligeira da tensão, o que parece ser feita por um relaxamento de tensão muito significativa, durante e após a furação. Para um tempo maior de furação, e dependendo da profundidade do incremento, ocorre um maior o contato entre a broca e o material, criando assim um aquecimento nessa zona. É necessário considerar também o efeito de delaminação provocado pelo processo de corte no material. Esses efeitos podem surgir como fissurações microscópicas parasitas que provocam um relaxamento, que vem sobreposto ao relaxamento total das tensões residuais.

É possível que a relação entre a profundidade do incremento e a espessura do laminado tem grande influência de sobre a relaxação total determinada. Se a profundidade do incremento for reduzida, observa-se que a sensibilidade do método para obter a distribuição de tensões residuais em profundidade no laminado pode ser aumentada, especialmente nas camadas individuais do compósito laminado.

Pagliari e Zuccarello (2007) estudaram as tensões residuais em materiais ortotrópicos por meio furos passantes. Teoricamente, o estudo comprova a sensibilidade da técnica do furo incremental, pois com o aumento das tensões residuais na direção longitudinal do material a anisotropia também aumenta, mas em contra partida com a anisotropia, a sensibilidade ao corte transversal e as tensões residuais são reduzidas. Os mesmos autores (Pagliaro e Zuccarello,2007) afirmaram ainda que para compósitos de ângulo e multicamada com um número de camadas superior a 16, bem como, a relação entre a espessura total e o raio médio da roseta for inferior a 0,25, os coeficientes de influência podiam ser alterados por erros menores entre 5 a 7%.

A aplicação do método foi corroborada por experiências, com a realização de ensaios para uma tensão planar com um carregamento inicial, obtendo os resultados e fazendo a comparação com a simulação numérica. A incerteza da tensão residual em materiais ortotrópicos homogênea é, em geral, inferior a 10%, o que permite uma comparação do método de determinação com a dos materiais isotrópicos.

### 2.4.2. Determinação da Tensão Residual em Materiais Compósitos

Cherouat et al. (2001), apresentam no seu trabalho uma abordagem teórica para o cálculo dos coeficientes de calibração, descrevendo a relação do estado de tensão e as deformações medidas à superfície, no caso de materiais ortotrópicos. O modelo utilizado para determinar a distribuição de tensões residuais em compósitos é baseado nos seguintes pressupostos:

- O material é elástico e ortotrópico.
- Os componentes de tensão em planos perpendiculares à superfície são muito pequenos.
- As tensões na superfície são medidas em três direções (0°; 45°; 90°).

As deformações radiais correspondentes às tensões principais de cada camada  $i$  com  $n$  incrementos, são funções dos coeficientes de calibração  $A_{in}$ ,  $B_{in}$ ,  $C_{in}$ . A tensão na superfície para qualquer local e para uma distância fixa em relação ao centro furo, é expresso pela equação 16.

$$\varepsilon_{in}(\theta_i) = A_{in}(\sigma_{1i} + \sigma_{2i}) + (\sigma_{1i} - \sigma_{2i})(B_{in} \cos 2\theta_i + C_{in} \sin 2\theta_i) \quad (16)$$

$\varepsilon_{in}$  descreve a contribuição da deformação de uma camada  $i$  para a deformação total determinada no incremento  $n$ , com uma profundidade na camada e um ângulo  $\theta_i$  entre o medidor de referência e a principal direção da tensão residual. Além disso, as tensões principais residuais de uma camada  $i$  são representados por  $\sigma_{1n}$  e  $\sigma_{2n}$ , bem como a calibração de coeficientes de  $A_{in}$ ,  $B_{in}$ ,  $C_{in}$  para a camada  $i$ , com  $n$  incrementos por camada.

Ao medir a tensão nas três direções diferentes, os valores desconhecidos de  $\sigma_{1n}$ ,  $\sigma_{2n}$ ,  $\theta_i$  para cada incremento de furação são determinados. Para o primeiro incremento, a tensão medida nas três direções é representado na equação 17 até 19.

$$\sigma_{1n} = \frac{\varepsilon_n^1(A_{in} + B_{in} \sin 2\theta_i + C_{in} \cos 2\theta_i) - \varepsilon_n^2(A_{in} - B_{in} \cos 2\theta_i - C_{in} \sin 2\theta_i)}{2A_{in}B_{in}(\sin 2\theta_i + \cos 2\theta_i) + 2A_{in}C_{in}(\sin 2\theta_i - \cos 2\theta_i)} \quad (17)$$

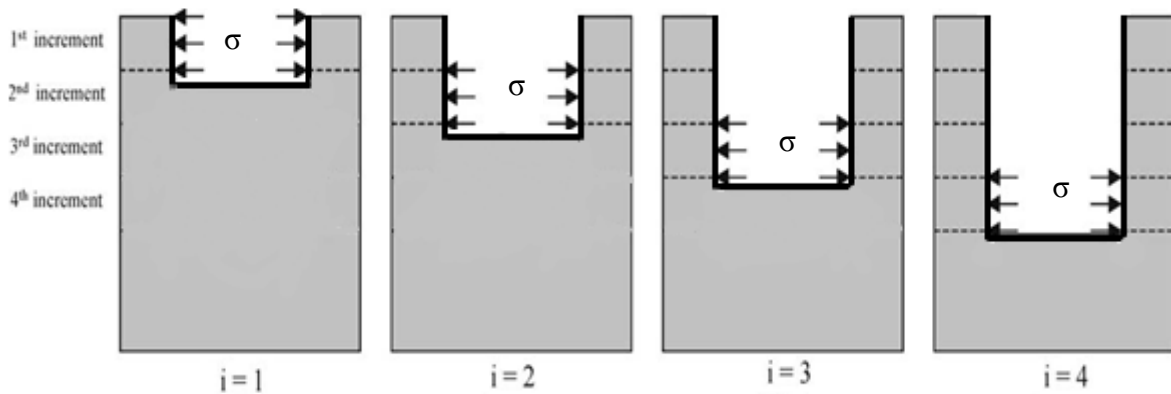
$$\sigma_{2n} = \frac{-\varepsilon_n^1(A_{in} - B_{in} \sin 2\theta_i + C_{in} \cos 2\theta_i) + \varepsilon_n^2(A_{in} + B_{in} \cos 2\theta_i + C_{in} \sin 2\theta_i)}{2A_{in}B_{in}(\sin 2\theta_i + \cos 2\theta_i) + 2A_{in}C_{in}(\sin 2\theta_i - \cos 2\theta_i)} \quad (18)$$

$$\tan 2\theta_i = \frac{2C_{in}(\varepsilon_n^3 - \varepsilon_n^2) - B_{in}(-2\varepsilon_n^1 + \varepsilon_n^2 + \varepsilon_n^3)}{C_{in}(-2\varepsilon_n^1 + \varepsilon_n^2 + \varepsilon_n^3) + B_{in}(\varepsilon_n^3 - \varepsilon_n^2)} \quad (19)$$

Os coeficientes de calibração,  $A_{in}$ ,  $B_{in}$ ,  $C_{in}$  não podem ser determinados experimentalmente, sendo necessário recorrer a uma análise e simulação de elementos finitos. A análise de elementos finitos destina-se começar com um modelo carregado com a tensão mínima aplicada, a simulação da introdução de um furo é feito numa segunda etapa, onde ocorre uma desativação do elemento na zona, para simular a remoção do material como acontece no ensaio real.

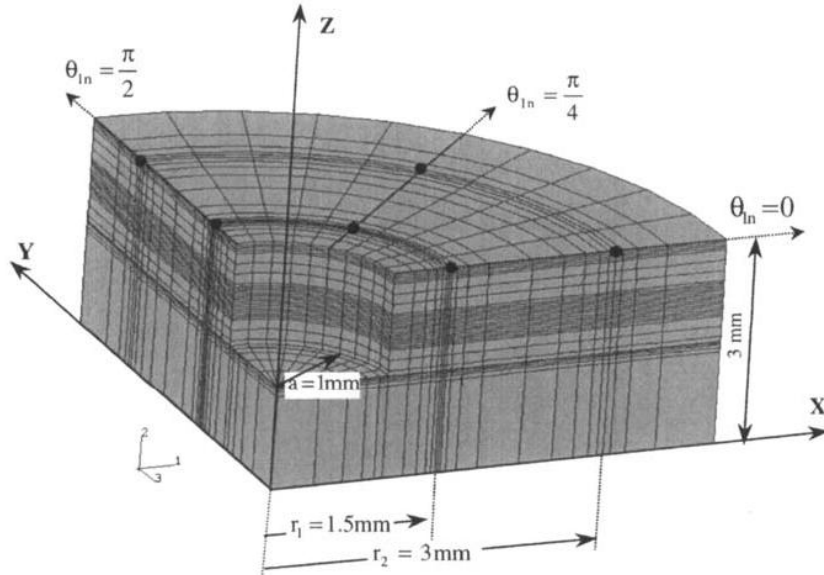
O método consiste em calcular os deslocamentos no plano da superfície produzido pelo furo incremental; utilizando um procedimento iterativo de carregamento. Analisando os campos desses deslocamentos a cada incremento, podemos estabelecer a relação entre deformações na superfície em redor do furo e as tensões residuais correspondentes em cada camada do compósito laminado.

Para caso de materiais ortotrópicos recorrendo à equação 16 pode-se determinar os coeficientes de calibração adimensionais, e quase sempre, dependendo do material, são obtidos pela aplicação de um estado de tensão biaxial equivalente, por exemplo,  $\sigma = \sigma_{1n} = \sigma_{2n}$  existentes na superfície interna do furo exemplificado na figura 8.



**Figura 8.** Interpretação física dos coeficientes de calibração, para cada incremento (Sicot et al., 2003).

Na figura 9 encontra-se representado  $\frac{1}{4}$  de um modelo numérico utilizado para realizar a simulação numérica. No modelo encontram-se indicadas as direções dos extensómetros e a sua distância ao centro do furo ( $r_1$  ;  $r_2$ ).



**Figura 9.** Modelo de calibração com extensómetros nas direções principais (Sicot et al.,2003).

Os coeficientes de calibração são calculados utilizando as equações 20 até 22.

$$A_{in} = \frac{U_{in}(r_2, 0) - U_{in}(r_1, 0)}{2\sigma(r_2 - r_1)} \quad (20)$$

$$B_{in} = \frac{U_{in}(r_2, \pi/2) - U_{in}(r_1, \pi/2)}{2\sigma(r_2 - r_1)} \quad (21)$$

$$C_{in} = \frac{U_{in}(r_2, \pi/4) - U_{in}(r_1, \pi/4)}{2\sigma(r_2 - r_1)} \quad (22)$$

$U_{in}$  é a deformação radial na superfície do material.



### 3. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Material Carbono/epóxico

O material usado neste trabalho é um compósito laminado carbono/epóxico com duas diferentes sequências de camadas de fibras. Este material em particular é utilizado no fabrico do mastro principal de uma das embarcações que participa na America's Cup World Series, que por razões de confidencialidade não pode ser revelado. Devido a este facto, a empresa produtora do material manteve a confidencialidade do método de produção do compósito, bem como as propriedades tanto da matriz como das fibras de carbono, indicando apenas, que as fibras de carbono tinham propriedades mecânicas com elevado módulo elástico (tipo M55J) e um volume de fibras bastante superior ao existente no mercado.

Foram utilizados dois tipos de provete carbono/epóxico com orientações de fibras diferentes. Os provetes unidireccionais  $(0^\circ)_4$  têm dimensões **164,5 x 24,45 x 1,10** mm e são compostos por 4 camadas de fibras. Os provetes multidireccionais simétricos  $(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$  têm uma disposição na estrutura com duas camadas de fibras orientadas a  $0^\circ$ , seguidas de duas camadas orientadas a  $90^\circ$  e assim sucessivamente. A dimensão destes provetes é **164,5 x 30,15 x 1,57** mm, sendo compostos por 16 camadas de fibras.

Através de um estudo realizado por Van Paepegem et al. (2008 e 2010), foram retiradas as propriedades mecânicas do compósito laminado e das fibras de carbono (Prepreg), encontrando-se as constantes elásticas do compósito e das fibras de carbono representadas na tabela 1 e 2, respetivamente.

**Tabela 1.** Propriedades do compósito carbono/epóxico (Van Paepegem et al., 2010).

Módulo de Young longitudinal ( $E_{11}$ )	239,1 GPa
Módulo de Young transversal ( $E_{22}$ )	6,74 GPa
Módulo de elasticidade transversal ( $G_{12}$ )	4,7 GPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ )	0,27
Coefficiente de Poisson ( $\nu_{21}$ )	0,0075

**Tabela 2.** Propriedades das fibras do carbono/epóxico (Van Paepegem et al.,2008).

Módulo de Young longitudinal ( $E_{11}$ )	300 GPa
Módulo de Young transversal ( $E_{22}$ )	6 GPa
Módulo de rigidez ( $G_{12}$ )	4,3 GPa
Módulo de rigidez ( $G_{23}$ )	2,14 GPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ )	0,29
Coefficiente de Poisson ( $\nu_{23}$ )	0,38
Coefficiente de Poisson ( $\nu_{13}$ )	0,003

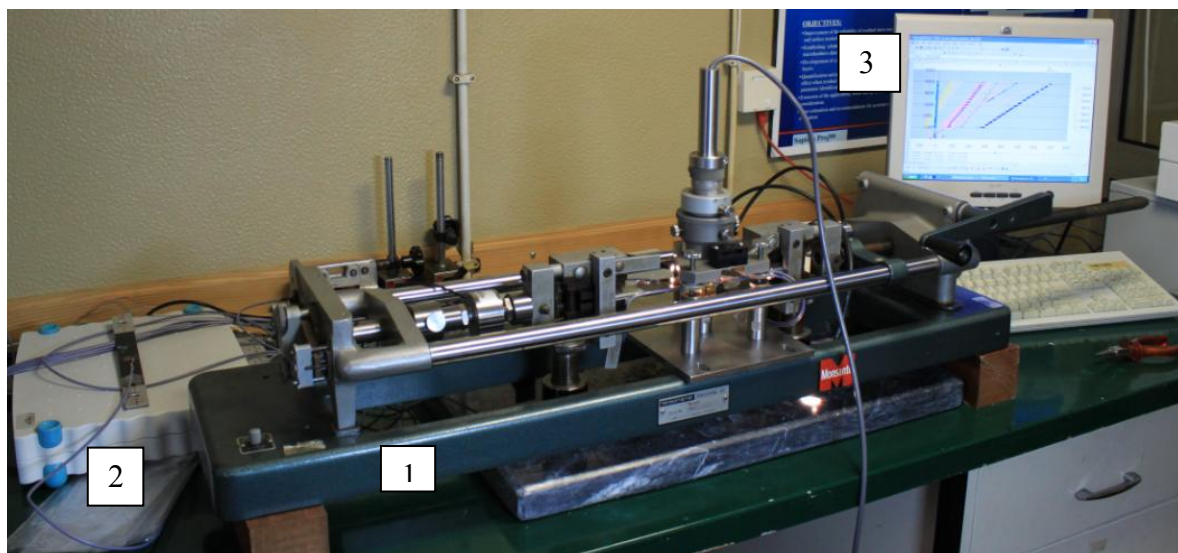
## 3.2. Procedimento Experimental

### 3.2.1. Máquina de tração e Sistema de Medida

Para a calibração experimental foi utilizada uma máquina de tração baseada num *kit* de educação da marca Monsanto, em que força de tração é imposta manualmente usando um sistema de manivela que aciona o cabeçote da máquina através de uma engrenagem roda helicoidal-parafuso sem-fim de elevada relação de transmissão.

Este equipamento utiliza um sistema de medida HBM Spider8-30 com 8 canais em ponte de Wheatstone, onde um dos canais em ponte completa é usado para medição da força aplicada ao provete, e os restantes 7 em  $\frac{1}{4}$  de ponte são usados para medir deformações. Destes, um dos canais é usado para a ligação de um extensómetro externo para compensação de temperatura e os restantes 6 para medir as deformações na superfície do provete em diferentes direções.

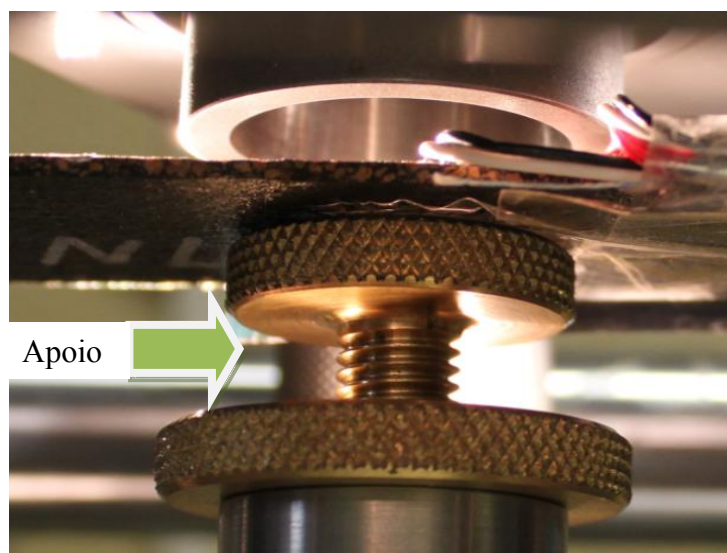
A célula de carga U9B, também fabricada pela HBM, tem uma capacidade de carga de 50 kN. A carga e as deformações são mostradas em tempo real durante os testes, com o apoio do *software* HBM "Catman Express".



**Figura 10.** Máquina de tração e sistema de medida.

Na figura 10, está a montagem experimental utilizada na calibragem experimental, o equipamento encontra-se numerado, **1** é a máquina de tração manual, **2** é o sistema de medida HBM Spider8-30 e **3** o *hardware* utilizado para retirar as deformações.

O equipamento experimental utiliza um sistema de porca e contraporca que serve como um apoio, permitindo assim eliminar o efeito da flexão nos provetes aquando da aplicação da furação, representado na figura 11.



**Figura 11.** Sistema anti flexão.

### 3.2.2. Parâmetros da Furação

No processo de corte a alta velocidade foi utilizado um sistema de turbina alimentado a ar comprimido. No presente estudo, com o objetivo de estudar o efeito da velocidade de corte, fez-se variar a pressão do ar entre 2,7 bar e 4,0 bar, a que correspondem velocidades de furação de 210.000 rpm e 280.000 rpm, respetivamente.

Com a máquina de furar perfeitamente calibrada, as velocidades são obtidas recorrendo a uma análise do ruído da máquina. Através de um programa em MatLab<sup>®</sup>, é realizada uma análise do espectro, recorrendo às transformadas de Fourier, retira-se a frequência rotacional do sistema de furação para uma dada pressão de ar.

O processo de furação foi realizado com o chamado método “toque e remove”, o que significa que a fresa quando toca a superfície por um período de tempo muito pequeno, sendo depois imediatamente removida. Deste modo o material é removido sucessivamente durante uma pequeníssima fração de tempo, promovendo-se ao mesmo tempo a refrigeração da zona de contacto fresa/peça pela circulação do ar, diminuindo-se ao máximo o efeito do aquecimento devido ao atrito. Este procedimento é repetido, incremento a incremento, até à profundidade final.

As fresas utilizadas nos ensaios eram revestidas com nitreto de titânio (TiN), tendo um diâmetro de 1,6 mm. Na figura 12 mostra-se máquina da Vishay RS-200, este instrumento serve de apoio e fixação para centrar broca (figura 13), de modo a ser possível aplicar a técnica do furo incremental para realizar um furo centrado.

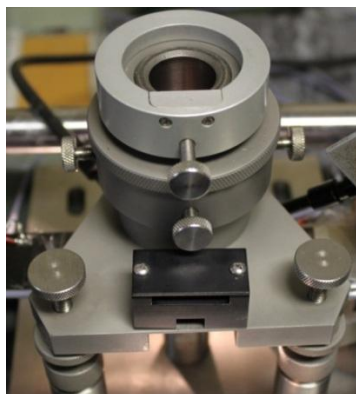


Figura 12. Vishay RS-200.

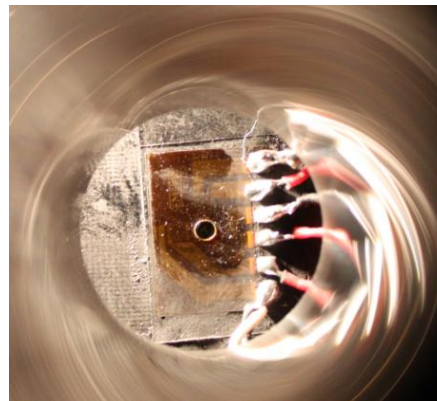


Figura 13. Broca apoiada no equipamento.

A figura 14 é um exemplo de como os extensómetros são posicionados e orientados. Para esta medição, a roseta TEA-13-062UL-120, com um fator de calibração de 2,05 a  $0^\circ$  e  $45^\circ$  e 2,07 a  $90^\circ$ , com uma resistência de  $120 \Omega \pm 0,3\%$ , é colada em cada provete do carbono/epóxico  $(0^\circ)_4$  e  $(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$ . O elemento **1** mede a tensão na direcção  $0^\circ$ , **2** a direcção a  $45^\circ$  e **3** a direcção a  $90^\circ$ . No centro da roseta é realizado o furo como indica a figura 15.



**Figura 14.** Exemplo da disposição do extensómetro no provete.



**Figura 15.** Furo no centro da roseta.

Para controlar a tensão no material durante o carregamento de tração três extensómetros do tipo TEA-06-062RK-120 da Vishay, MM foram preparados nos provetes carbono/epóxico  $(0^\circ)_4$  e  $(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$ . Eles têm um fator de calibração de 2,12, uma resistência de  $120 \Omega \pm 0,3\%$  e um comprimento de 6 mm, estes estão orientados segundo as três direcções demonstrado na figura 16, com os números **4**, **5** e **6**.



**Figura 16.** Provelte com extensómetros todos colados (Nobre 2010).

### 3.3. Princípio e Calibração Experimental

Um dos objetivos deste trabalho é aplicar um processo repetitivo para o cálculo de tensões residuais em materiais compósitos, com vista a desenvolvimento e otimização do mesmo.

Este processo é composto essencialmente por duas partes. Uma parte experimental, onde se aplica a técnica do furo incremental para duas velocidades de furação, retirando-se no final as curvas de relaxação da deformação ocorridas no material. Uma outra parte é realizar a simulação pelo Método dos Elementos Finitos, onde é simulado o mesmo procedimento aplicado na parte experimental, obtendo-se o caso ideal de furação, retirando-se as curvas de relaxação da deformação numéricas.

Numa fase final da metodologia proposta é realizada a comparação entre as curvas, experimentais e numérica, da relaxação da deformação ocorrida para este material compósito de carbono/epóxico, verificando o erro existente entre os valores, reais e ideal obtidos.

Para explicar em detalhe as alterações processuais, entre o carregamento e furação o fluxograma na figura 17 exemplifica os passos a seguir.

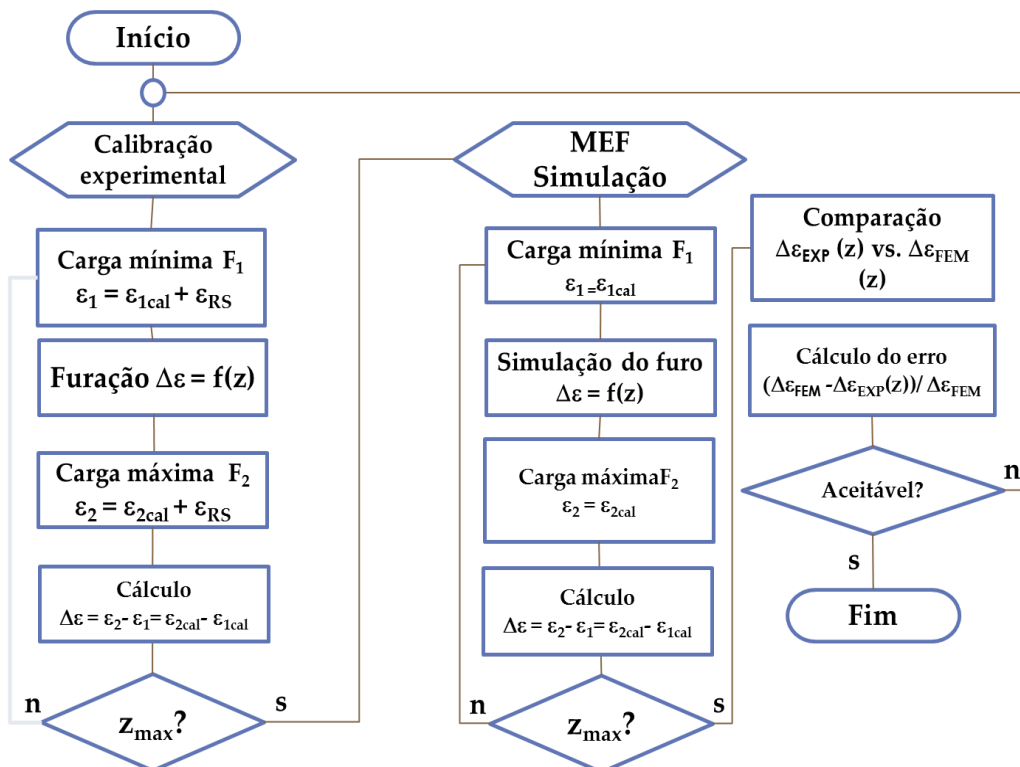


Figura 17. Fluxograma do método aplicado (Nobre 2010).

Antes de se proceder ao ensaio experimental é necessário eliminar o efeito das tensões residuais do estado inicial do provete, para poder determinar as tensões induzidas devido ao processo de furação. Para poder retirar esse efeito, o método propõem o uso de uma tensão de calibração diferencial. Este método só é válido se o material apresentar um comportamento linear e ortotrópico (Nobre,2010).

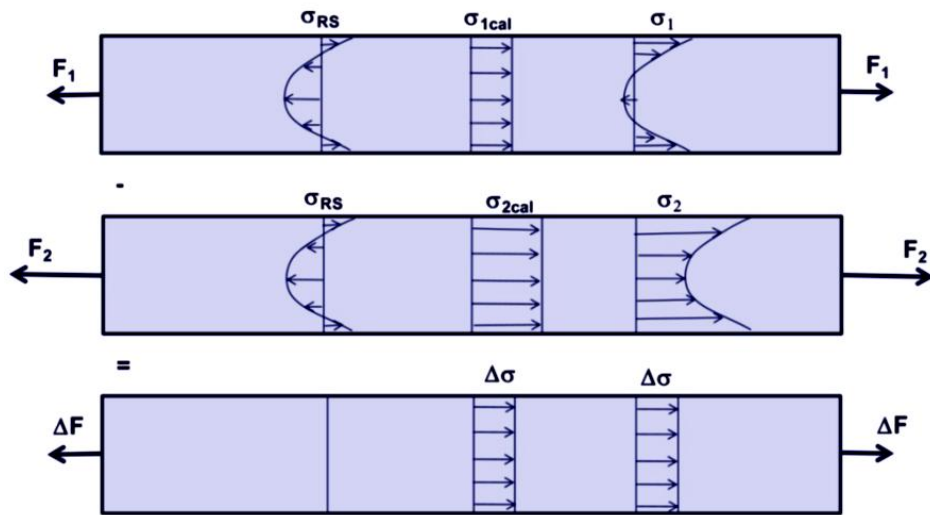


Figura 18. Princípio de calibração (Nobre 2010).

Na figura 18, está exemplificado o calculo da eliminação da tensão residual, onde  $\sigma_{RS}$  é a tensão residual inicial existente no provete e  $\sigma_{1cal}$  uma tensão de calibração conhecida, correspondente a uma carga axial  $F_1$ , imposta durante o ensaio de tração, a tensão final será  $\sigma_1$ , dada por:

$$\sigma_1 = \sigma_{RS} + \sigma_{1cal} \quad (23)$$

Se aplicada uma carga  $F_2$  maior, também é possível escrever:

$$\sigma_2 = \sigma_{RS} + \sigma_{2cal} \quad (24)$$

Sendo que as cargas aplicadas apenas impliquem deformação elástica, a tensão residual inicial,  $\sigma_{RS}$ , permanece inalterável. Tomando o valor diferencial entre os dois estados de tensão, o efeito da tensão residual inicial pode ser eliminado, ou seja:

$$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 = \sigma_{2cal} - \sigma_{1cal} = \Delta\sigma_{cal} \quad (25)$$

Desta forma, a tensão residual inicial pode ser eliminada e controlando apenas as deformações causadas para o estado de calibração de tensão. Com base neste simples princípio físico, o método implica em duas fases: experimental e numérica.

1. Na fase experimental, a amostra é submetida a tensão de tração uniaxial bem conhecida, seguindo o princípio demonstrado na figura 17. O procedimento experimental aplicado a cada provete nos ensaios, inicia-se com a colocação do provete a força  $F_1$  bem determinada, de seguida fixa-se o instrumento de corte, centrando a broca com o centro do extensómetro em roseta. Aplica-se o furo ao material e mede-se a sua relaxação, seguidamente inicia-se um processo controlado de incremento de tensão no provete, até uma  $F_2$ , os valores são retirados ao longo do incremento de força para obter um comportamento real do material. Seguidamente existe uma redução incremental da força até atingir novamente o valor de  $F_1$ , sendo realizado novamente um furo no material.

Este processo é repetido até a profundidade atingida através da técnica do furo incremental for igual à do raio da roseta. Assim, no final do ensaio é possível obter um conjunto de curvas de relaxamento da tensão  $\Delta\varepsilon_{EXP}(Z)$  *versus* profundidade ( $z$ ), correspondente à tensão de calibração imposta  $\Delta\sigma$ .

2. Na fase de simulação numérica, o ensaio experimental de calibração é simulado usando o método dos elementos finitos (FEM). A simulação do furo incremental durante o ensaio de tração é realizada assumindo um comportamento linear e ortotrópico do material. Todos os parâmetros experimentais e problemas geométricos são tomados em consideração, exceto os efeitos termomecânicos, devido ao processo de corte. O objetivo da simulação é obter uma curva de comparação para um caso ideal, onde não há tensões residuais induzidas pelo processo de furação. Os pormenores sobre o modelo e simulação são discutidos mais aprofundadamente no capítulo 5.

A diferença observada entre os valores experimentais e numéricos do relaxamento da deformação, para cada furo incremental efetuado em profundidade ( $z$ ), é uma medida da tensão residual induzida pelos efeitos termomecânicos impostos pela furação real, ou seja:

$$\Delta\varepsilon_d(z) = \Delta\varepsilon_{EXP}(Z) - \Delta\varepsilon_{FEM}(Z) \quad (26)$$

Para fins de otimização é necessário determinar a percentagem de erro relacionada com as tensões induzidas pela operação de furação e o caso real simulado.



$$E(z) = \frac{\Delta \varepsilon_d}{\Delta \varepsilon_{FEM}} \times 100 [\%] \quad (27)$$

### 3.3.1. Aplicação ao caso em estudo

No caso em estudo foram testados dois provetes de carbono/epóxico que após o alinhamento foram tracionados até uma carga  $F_1 = 1064 \text{ N}$  e uma tensão correspondente  $\sigma_1 = \sigma_{\min} = 20 \text{ MPa}$ , a carga máxima  $F_2$  para o carbono/epóxico foi de  $7000 \text{ N}$  no provete unidirecional e  $6000 \text{ N}$  no provete multidirecional, a tensão máxima  $\sigma_2 = \sigma_{\max}$  durante o ensaio de tração foi de  $264,2 \text{ MPa}$  e  $125,2 \text{ MPa}$  respetivamente. A profundidade da furação foi até perto de  $1 \text{ mm}$ , mas por incrementos que variam dependendo da espessura da camada das fibras. Na figura 19 encontra-se esquematizado o procedimento experimental do carregamento e furação do provete.

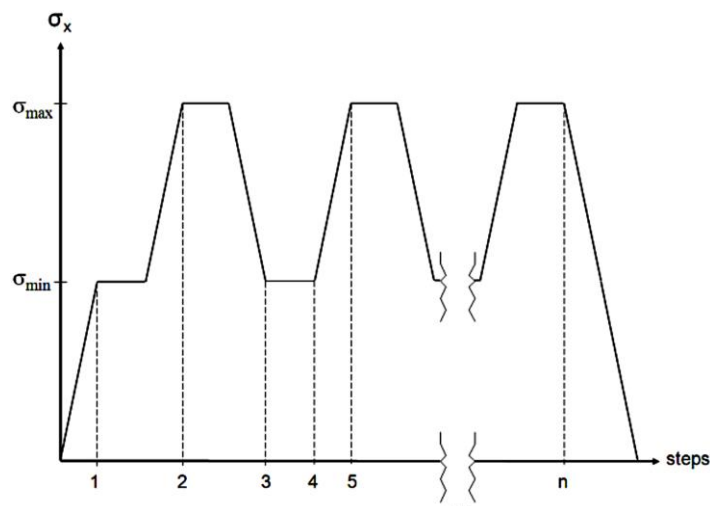


Figura 19. Carregamento cíclico do provete na furação (Stiffel,2010).

O valor de cada incremento realizado por camada é relacionado com o trabalho realizado por Sicot et al. (2003), sendo os incrementos selecionados para espessura constante de cada camada pertencente a cada provete de carbono/epóxico está indicado na tabela 3.

Tabela 3. Determinação da profundidade dos incrementos.

Carbono/Epóxi	Espessura das fibras	Incrementos por camada	Profundidade do incremento
$(0^\circ)_4$	$280 \mu\text{m}$	4	$76,2 \mu\text{m}$
$(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$	$100 \mu\text{m}$	2	$50 \mu\text{m}$

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1. Provete unidirecional (0°)<sub>4</sub>

#### 4.1.1. Comportamento Elástico

Na figura 20 encontra-se representado o ensaio de tração do provete unidirecional. Verifica-se que na direção a 0° o módulo de Young ( $E_{11}$ ) do provete tem o valor de 223,4 GPa para uma tensão máxima aplicada de 258 MPa, observa-se que a 45° o valor foi de 2,8 GPa para o módulo de elasticidade transversal, a 90° obteve-se um valor de 8,6 GPa para o módulo de Young ( $E_{22}$ ), obtendo-se um coeficiente de Poisson de 0,25.

Verifica-se através do ensaio que o provete apresenta um comportamento linear durante o carregamento, validando desde já a utilização da metodologia proposta. Os valores obtidos para as constantes elásticas dos materiais, poderão apresentar desvios, sendo que uma possível explicação para tal facto pode relacionar-se com o tipo de material, uma vez que este material é anisotrópico, e a sua deformação não é proporcional em todas as direções, como ocorre nos materiais isotrópicos. Um outro ponto importante é a orientação do extensómetro colado na superfície do provete, este pode não estar totalmente orientado segundo a direção prevista, existindo assim um desalinhamento face ao eixo correto, induzindo um erro sistemático nos resultados obtidos.

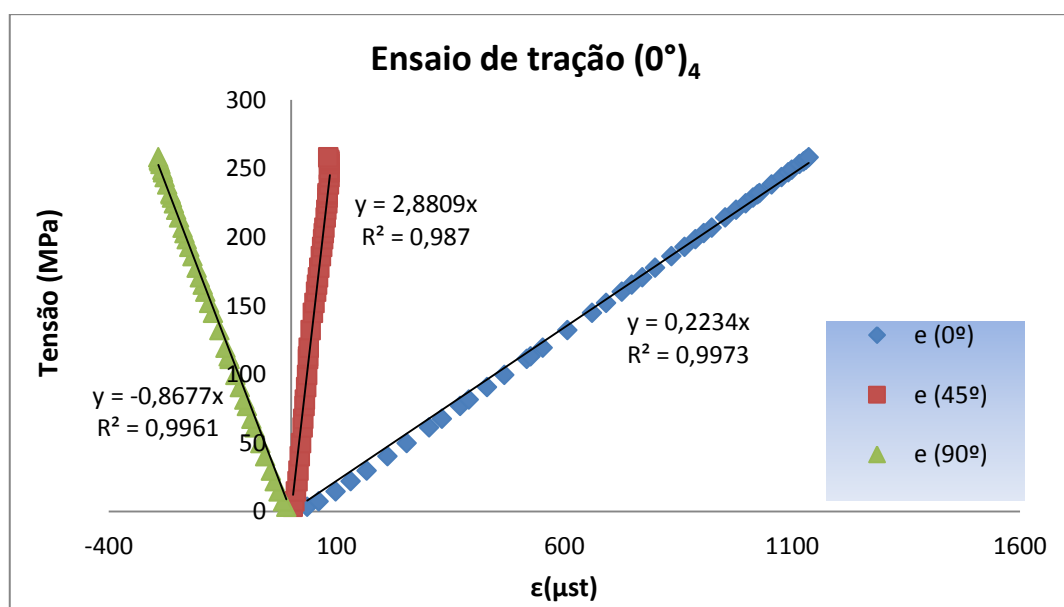


Figura 20. Ensaio de tração provete unidirecional.

#### 4.1.2. Relaxação da deformação

Aplicada a técnica do furo, baseada na metodologia referenciada anteriormente no capítulo 3, retira-se a relaxação de deformação  $\Delta\varepsilon_{EXP}$  em função da profundidade. Nas figuras 21 e 22 estão representados os valores da relaxação de deformação dos ensaios realizados a 2.7 bar e 4 bar.

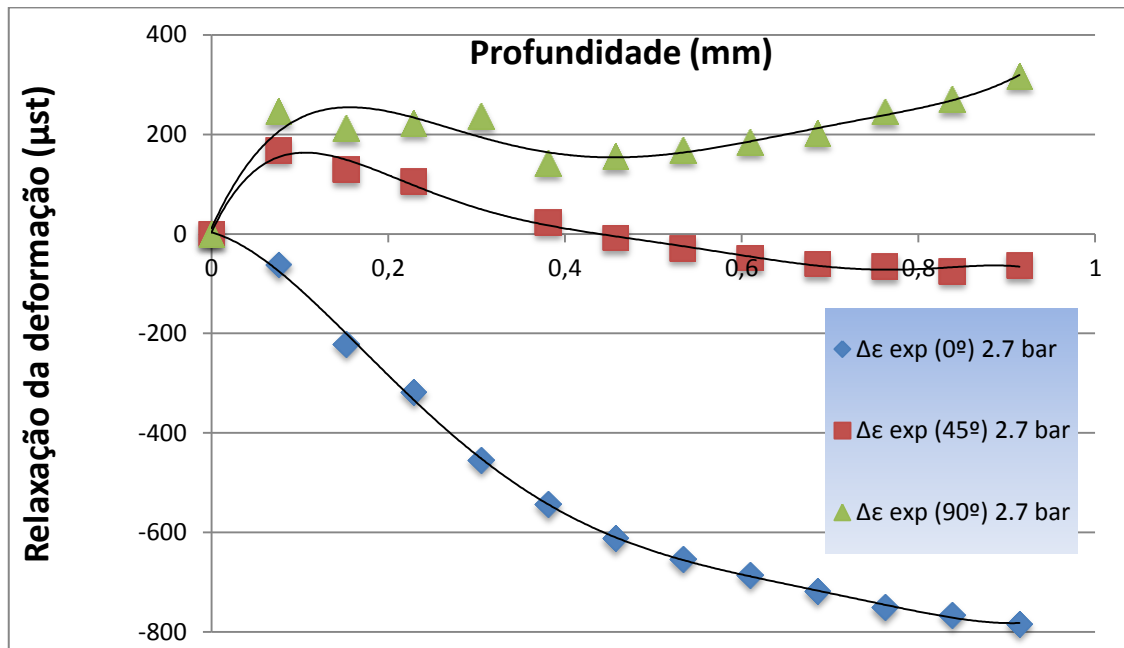


Figura 21. Relaxação da deformação a 2.7 bar.

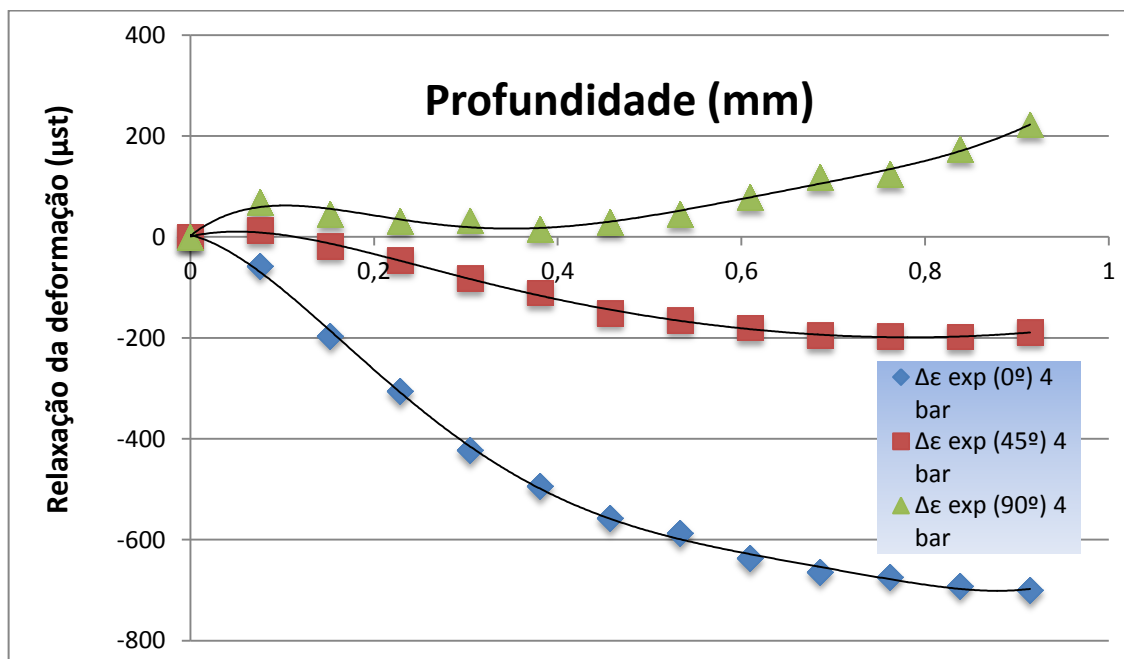


Figura 22. Relaxação da deformação a 4 bar.

Através dos resultados obtidos pode-se afirmar que tanto no ensaio a 2,7 bar como a 4 bar, os pontos de relaxação de deformação orientados a  $0^\circ$  têm um comportamento bastante semelhante a medida que a profundidade vai aumentando. Nas orientações a  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , verifica-se uma diferença substancial na relaxação de deformação entre os ensaios realizados, verificando-se um comportamento mais regular no ensaio a 4 bar comparativamente ao ensaio a 2,7 bar.

## 4.2. Provetes multidirecional $(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$

### 4.2.1. Comportamento Elástico

Na figura 23 encontra-se representado o ensaio de tração do provete multidirecional “cross-ply”  $(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$ . Verifica-se que o módulo de Young ( $E_{11}$ ) a  $0^\circ$  do provete tem o valor de 158,1 GPa para uma tensão máxima aplicada de 125 MPa, nas restantes direções, a  $45^\circ$  o provete apresenta um comportamento parabólico no início do ensaio, acabando depois por desaparecer e no final apresentar um comportamento linear, o valor obtido para o módulo de elasticidade transversal ( $G_{12}$ ) é 3,15 GPa, a  $90^\circ$ , o valor encontrado para o módulo de Young transversal ( $E_{22}$ ) do provete foi de 40 GPa.

Os erros existentes podem dever-se a alguns fatores importantes, como a escolha do extensómetro ou um desvio na fixação do mesmo ao provete, sendo recomendado neste tipo de provetes, o uso de extensómetros independentes, em parte, devido a orientação das fibras e o próprio comportamento do compósito.

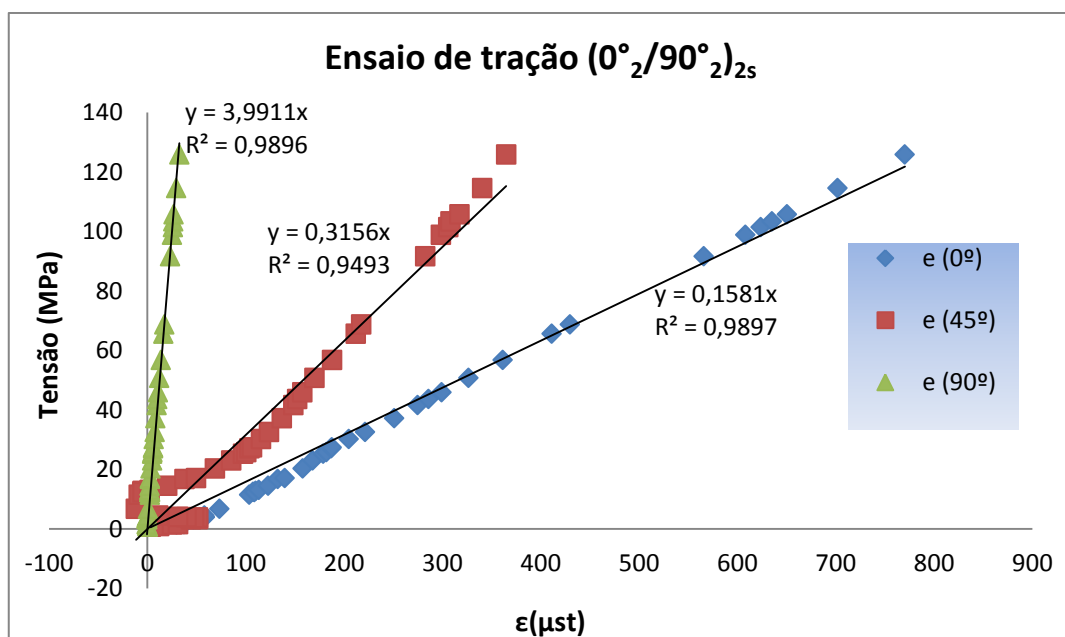


Figura 23. Ensaio de tração provete multidirecional “cross-ply”.

#### 4.2.2. Relaxação da deformação

O provete ensaiado foi submetido a uma única velocidade de furação, 4 bar, uma vez que já existem estudos realizados para este mesmo provete para a velocidade de 2,7 bar. De forma análoga ao calculado anteriormente para o provete unidireccional, a figura 24 indica a resultados obtidos para a relaxação de deformação ao longo da profundidade para o provete multidireccional cruzado.

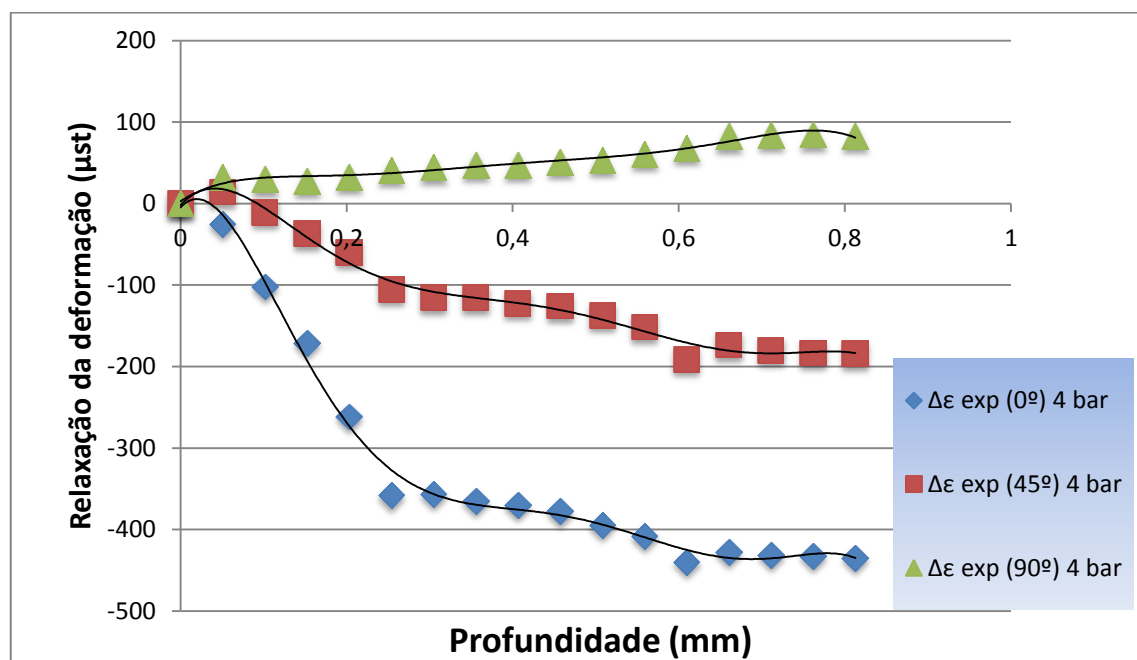


Figura 24. Relaxação da deformação no provete “*cross-ply*” a 4 bar.

Dos resultados obtidos observa-se uma grande variação da relaxação da deformação até uma profundidade de 0,2 mm. Esta relaxação deve-se ao facto da primeira camada de fibras estar orientada a  $0^\circ$ , obtendo uma excelente leitura dos pontos por parte do equipamento de medida. A relaxação da deformação medida a  $90^\circ$  varia ligeiramente ao longo do ensaio. Este acontecimento é estranho pois uma vez que a furação avança na camada de fibras orientadas a  $90^\circ$ , a relaxação da deformação deveria alterar-se mas esse comportamento não se verifica, os pontos mantêm um comportamento regular, sem grandes alterações de estado.

## 5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA E DISCUSSÃO

### 5.1. Modelo Numérico

A simulação numérica do furo e a calibração experimental foram repetidas usando o método dos Elementos Finitos (FEM), seguindo o procedimento descrito no fluxograma na figura 17 do capítulo 3.3

A simulação da técnica do furo incremental durante o ensaio em materiais compósitos simétricos, foi criado assumindo um comportamento ortotrópico e linear das fibras. O modelo numérico foi desenvolvido em linguagem APDL para ANSYS 11, este modelo utiliza elementos sólidos quadráticos por camadas 3D (SOLID 186) com 20 nós, exemplificado na figura 25 (ANSYS,2010).

A parametrização do modelo é efetuada usando uma interface de utilizador para ser aplicada a diversos materiais com diferentes sequências de orientação das camadas de fibras, sem existir a necessidade de mudar o script APDL. O modelo numérico tem uma capacidade ajustável, permitindo o uso de todas as rosetas de extensómetros de acordo com a norma da ASTM. O modelo numérico permite variar o diâmetro do furo, a espessura do material, o número de camadas, a espessura de cada camada, a orientação para cada camada, as propriedades do material das fibras, o número de incrementos em profundidade por camada, a profundidade do furo, a sequência das camadas, bem como o refinamento e ajuste da malha, são parâmetros que estão incluídos e que se podem alterar na interface sem modificação dos modelos.

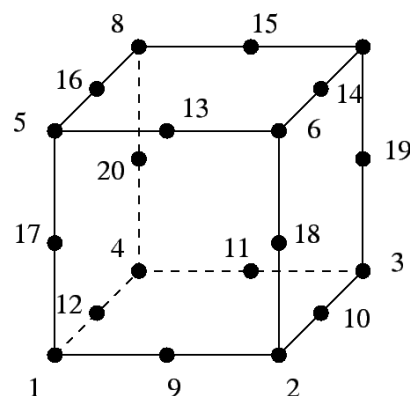


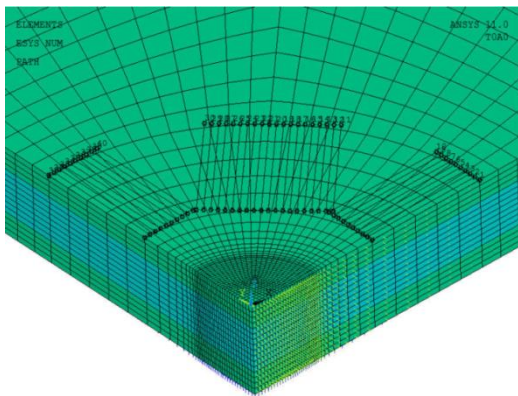
Figura 25. Elemento quadrático 3D com 20 nós

([http://web.mit.edu/calculix\\_v2.0/CalculiX/ccx\\_2.0/doc/ccx/node16.html](http://web.mit.edu/calculix_v2.0/CalculiX/ccx_2.0/doc/ccx/node16.html))

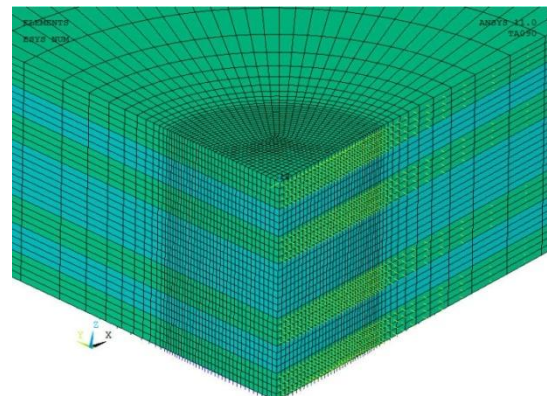
O recurso à simulação numérica serve para realizar, a partir da metodologia proposta, um ensaio ideal de furação onde a ferramenta de corte não introduz tensões residuais no material. Os resultados numéricos da relaxação de deformação foram obtidos através da integração dos valores da deformação nos nós, ao longo da área da grelha do extensómetro.

As curvas de relaxação de deformação resultantes da calibração experimental e da simulação numérica foram analisadas e comparadas, determinando-se assim o erro existente entre os dois casos. O erro resultante quantifica a deformação parasita induzida que ocorre no material devido ao processo de corte, durante a furação.

Na figura 26 e 27 encontra-se representada a malha de elementos finitos correspondente a  $\frac{1}{4}$  do modelo utilizado na simulação dos tipos de provete em estudo. Cada cor dos elementos representados corresponde a uma determinada orientação das fibras.



**Figura 26.** Malhagem do modelo numérico para o provete  $(0^\circ)_4$



**Figura 27.** Malhagem do modelo numérico para o provete  $(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$ .

## 5.2. Carbono/epóxico (0°)<sub>4</sub>

### 5.2.1. Comportamento Elástico

O cálculo das constantes elásticas do material foi realizado recorrendo às equações 3 a 6 do capítulo 2.2.1, para obter o comportamento teórico do material. O cálculo do erro associado à experiência efetua-se recorrendo as equações 26 e 27 no capítulo 3.3.

Na figura 28 encontra-se as curvas tensão vs. deformação correspondentes a cada método. Na realização do ensaio, a tensão aplicada variou entre  $\sigma_{min} = 0$  MPa até  $\sigma_{max} = 258$  MPa, retirando os valores das deformações, ocorridos nas diferentes direções.

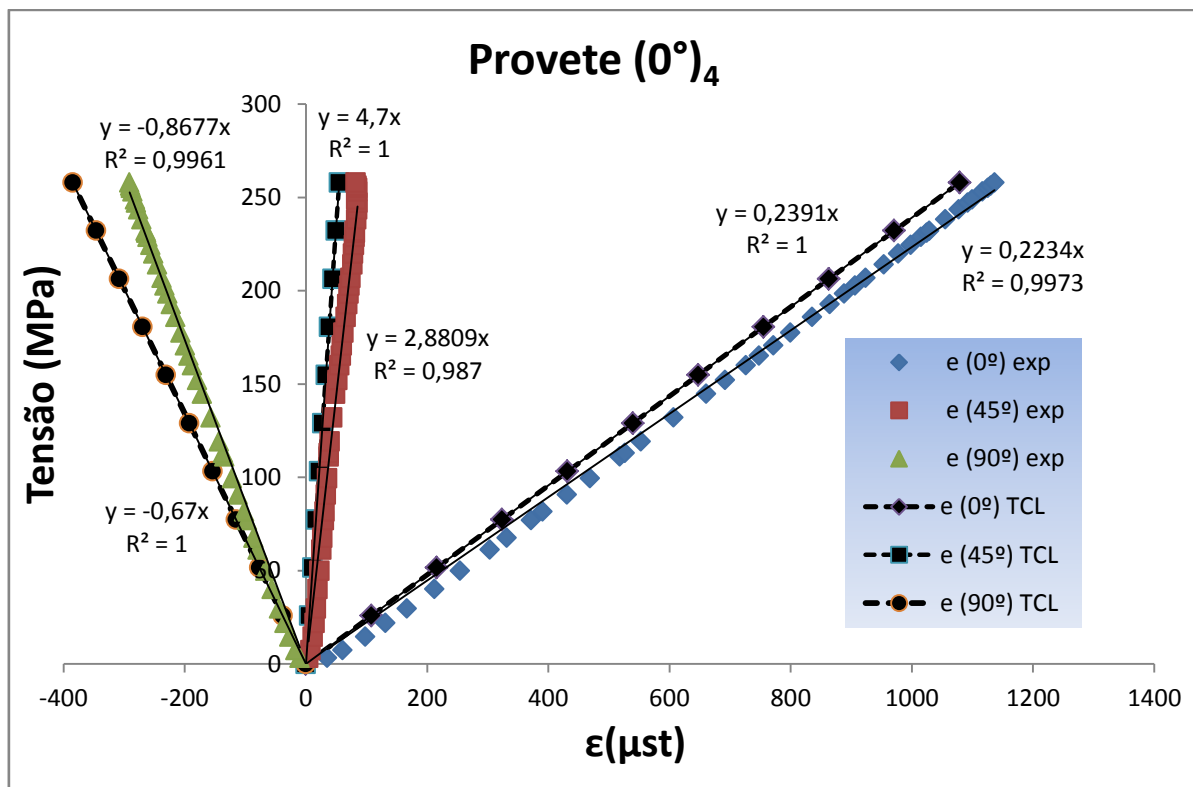


Figura 28. Comparação dos valores experimentais e numéricos do ensaio de tração.

As deformações medidas segundo as orientações (0°), (45°) e (90°), permitem obter os valores das constantes elásticas ( $E_{11}$ ), ( $E_{22}$ ), ( $G_{12}$ ) respetivamente. A comparação entre os valores obtidos via experimental e numérica encontra-se na tabela 4, para melhor compreensão dos valores obtidos.



**Tabela 4.** Valores experimentais e teóricos do ensaio de tração do provete (0°)<sub>4</sub>.

	<b>Experimental</b>	<b>Teórico</b>	<b>Erro</b>
Módulo de Young longitudinal ( $E_{11}$ )	223,4 GPa	239,1 GPa	7 %
Módulo de Young transversal ( $E_{22}$ )	8,6 GPa	6,74 GPa	28 %
Módulo de elasticidade transversal ( $G_{12}$ )	2,8 GPa	4,7 GPa	40 %
Coefficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ )	0,25	0,27	7 %

Os valores das constantes elásticas têm erros associados, sendo estes valores mais elevados nas direcções a 45° e 90°. Embora o valor do erro a 90° possa ser aceitável, a 45° é exagerado sendo necessário mais estudo nesta orientação para poder reduzir esse erro. Este facto pode ter sido originado por alguma falha no extensómetro, ou alguma incompatibilidade entre o material e à utilização de extensómetros eléctricos nestes materiais.

### 5.2.2. Relaxação da deformação

Neste subcapítulo, as figuras expostas indicam a relaxação da tensão de deformação em profundidade. Para uma visualização e comparação dos resultados obtidos, as curvas obtidas estão sobrepostas nos gráficos, indicando assim a diferença existente entre o caso real e o ideal calculado no presente trabalho.

Na figura 29 encontram-se representados os resultados da relaxação da deformação segundo o eixo de aplicação de carga (0°). Observa-se um comportamento idêntico das curvas nos dois ensaios, correspondentes às duas velocidades de corte, em relação ao caso ideal. O ensaio de furação a 4 bar apresenta uma relaxação mais próxima do caso ideal, indicando uma menor introdução de deformações parasitas, devido ao processo de corte, do que no ensaio a 2,7 bar. Verifica-se também uma boa concordância do modelo numérico em relação aos ensaios experimentais.

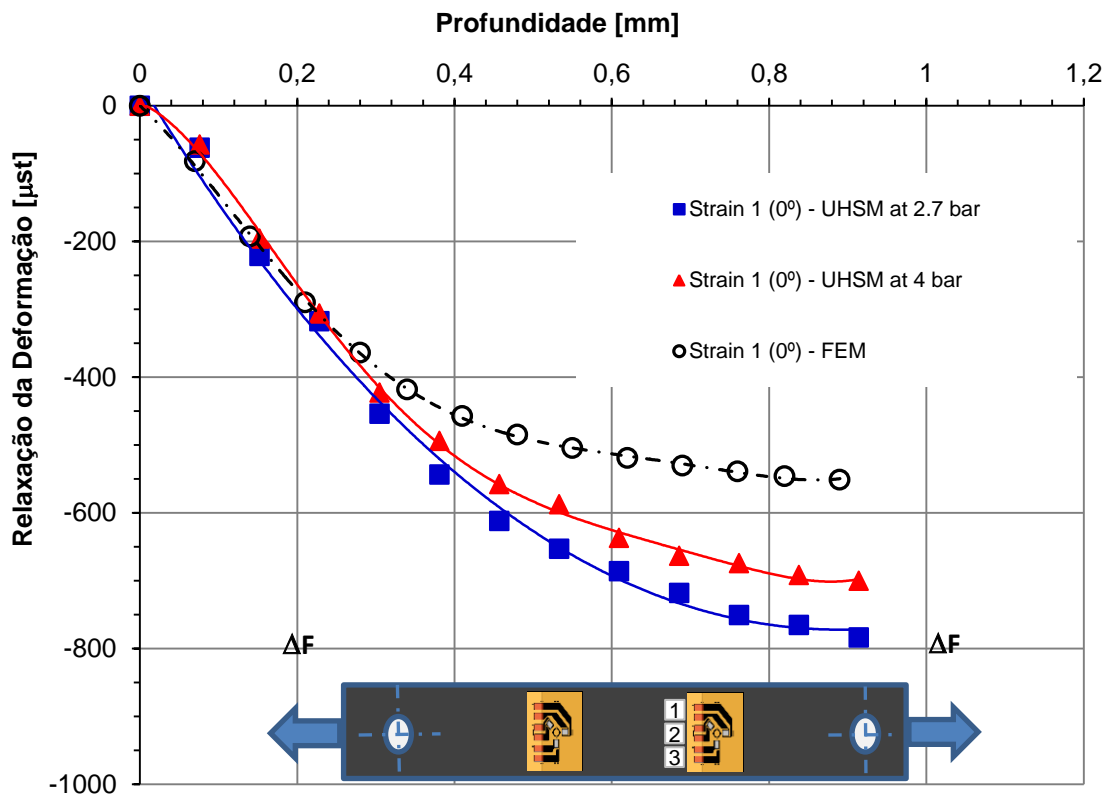


Figura 29. Relaxação da deformação a 0°.

Na figura 30 são mostradas as curvas de relaxamento da deformação em profundidade a 90°. Os resultados obtidos mostram uma diferença considerável para profundidades reduzidas até 0,4 mm, para os casos em estudo. Verifica-se também que a partir de uma profundidade superior a 0,4 mm as curvas começam a ter um comportamento semelhante ao caso ideal, embora com alguma diferença. Os resultados mostram uma relaxação da deformação mais próxima do caso ideal para o ensaio a 4 bar, do que obtido a 2,7 bar, indicando também nesta direção uma boa concordância do modelo numérico.

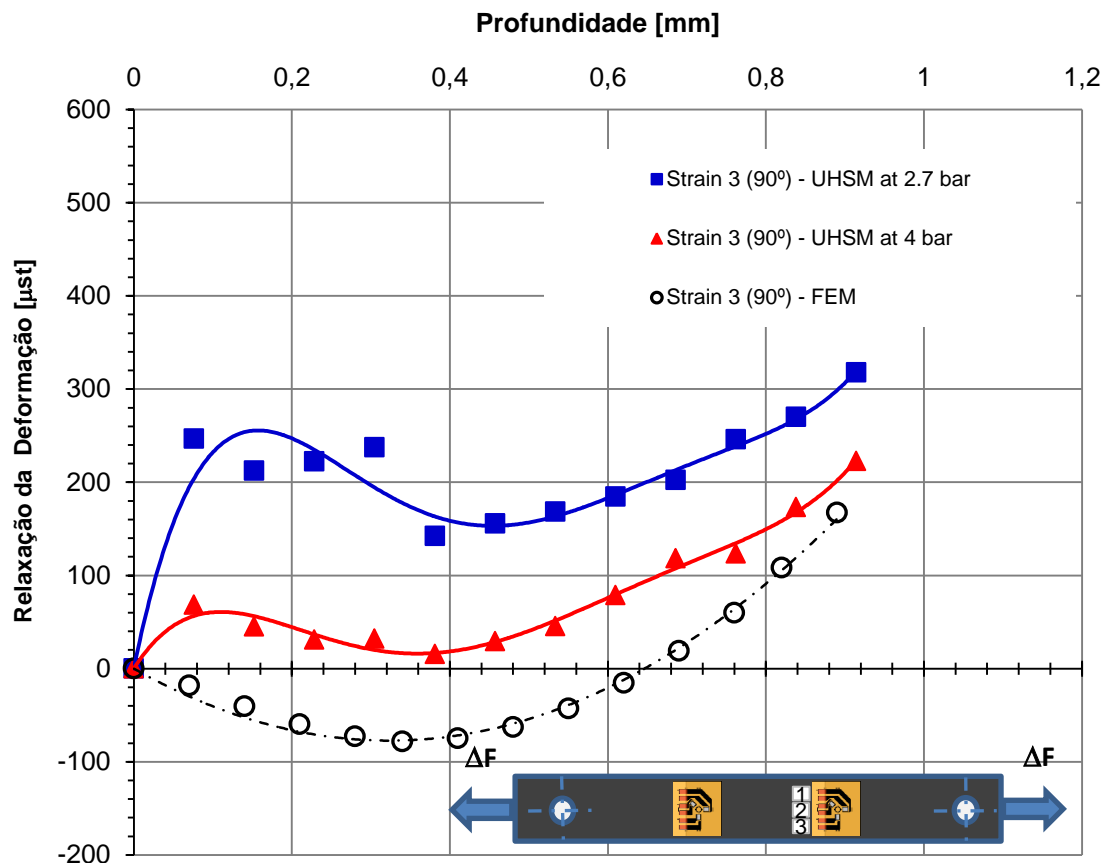


Figura 30. Relaxação da deformação a 90°.

No caso dos resultados obtidos para a orientação a 45°, mostrado na figura 31, os ensaios realizados indicam comportamentos completamente diferentes para profundidades reduzidas, obtendo-se uma melhor aproximação do caso ideal para o ensaio a 4 bar. Com o aumento da profundidade a curva de relaxação de deformação do ensaio a 2,7 bar vão aproximando-se bastante do caso ideal enquanto que, a curva do ensaio a 4 bar vai aumentando a sua diferença do caso ideal.

O comportamento das curvas de relaxação da deformação obtidas nos ensaios apresenta diferenças relativamente ao comportamento obtido numericamente, podem existir várias explicações para estes resultados, sendo necessário otimizar o modelo numérico, devido à não concordância com os declives das retas experimentais. Um outro aspeto pode dever-se ao tipo de extensómetro utilizado, sendo melhor utilizar um extensómetro individual para esta orientação, sendo assim necessário realizar mais estudos para identificar a solução, de modo a melhorar a aproximação das curvas reais e numérica.

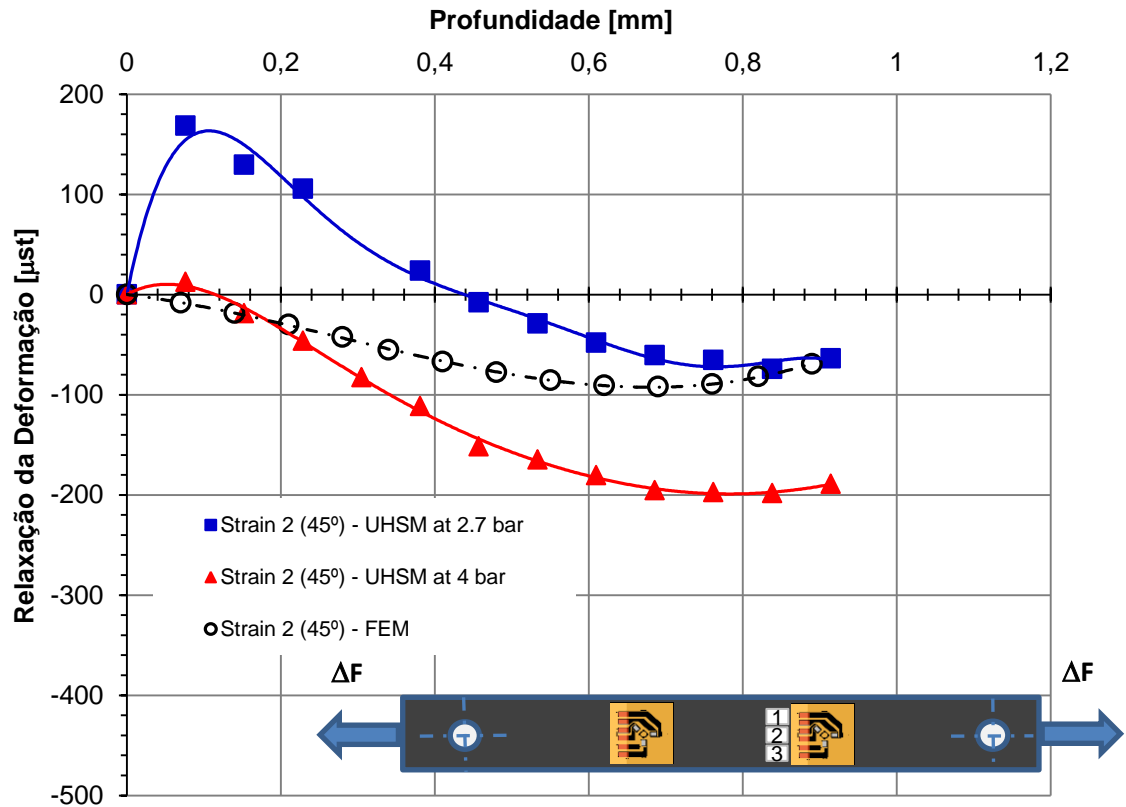
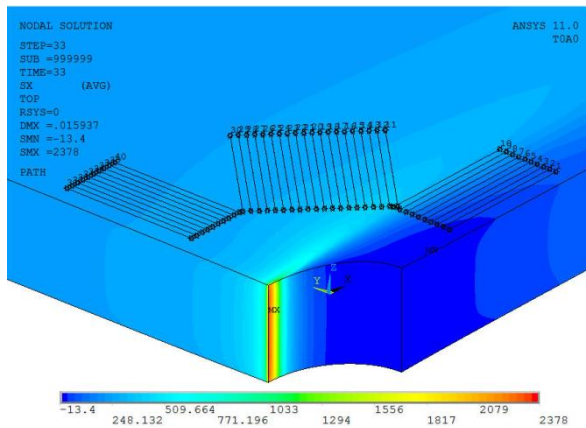


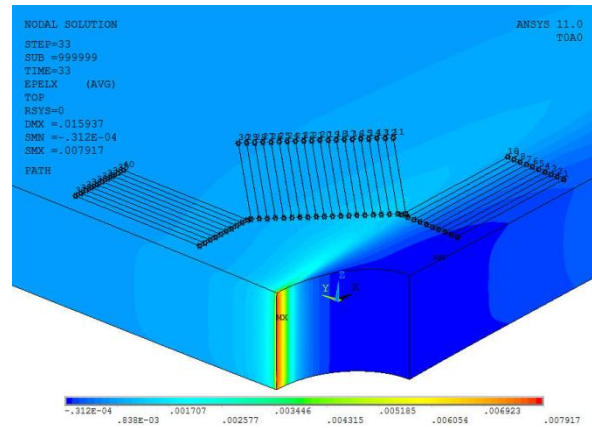
Figura 31. Relaxação da deformação a 45°.

A simulação do provete unidirecional  $(0^\circ)_4$ , através do método de elementos finitos, permite obter o estado de tensão e a deformação durante a aplicação da técnica do furo incremental. São retirados os valores correspondentes a cada estado de tensão do material para uma tensão de calibração  $\sigma_{m\acute{a}x} = 258$  MPa.

Na figura 32 encontra-se determinada, para uma profundidade de 1 mm, a tensão máxima, segundo X, de 2378 MPa orientada a  $0^\circ$  e a tensão mínima, segundo Y, de -13,4 MPa segundo a orientação a  $90^\circ$ . Na figura 33 encontram-se os resultados da deformação a uma profundidade de 1 mm. A deformação máxima ocorre segundo a orientação a  $0^\circ$  e verifica-se uma deformação de compressão na direção a  $90^\circ$ .



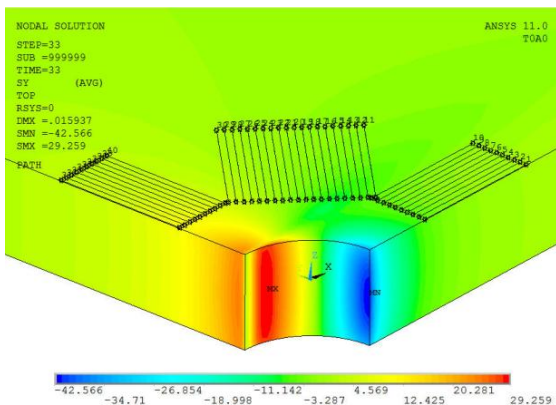
**Figura 32.** Distribuição da tensão Sigma X, tensão normal segundo X, em torno do furo.



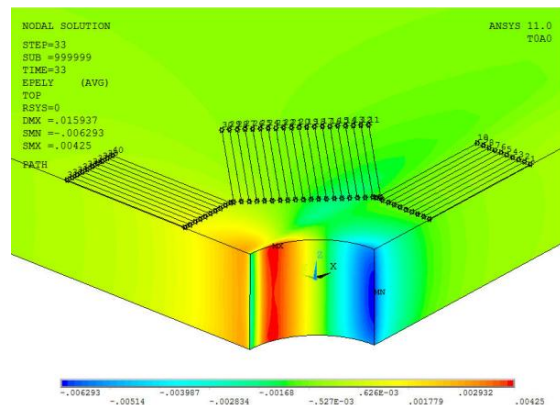
**Figura 33.** Distribuição da deformação segundo X em torno do furo.

Na figura 34 encontra-se determinada, para uma profundidade de furo de 1 mm. A tensão máxima segundo Y, de 29,2 MPa orientada a 0° e a tensão mínima, segundo X, de - 42,6 MPa segundo a orientação a 90°.

Na figura 35 encontra-se os resultados da deformação a uma profundidade de 1 mm. A deformação máxima ocorre segundo a orientação a 90° e verifica-se uma deformação de compressão na direção a 0°.



**Figura 34.** Distribuição da tensão Sigma Y, tensão normal segundo Y, em torno do furo.



**Figura 35.** Distribuição da deformação segundo Y em torno do furo.

### 5.3. Carbono /epóxico ( $0^{\circ}_2/90^{\circ}_2$ )<sub>2s</sub>

#### 5.3.1. Comportamento Elástico

Os cálculos das constantes elásticas foram efetuados de forma idêntica ao calculado para o provete unidirecional ( $0^{\circ}$ )<sub>4</sub>, mas neste caso no caso em estudo foi necessário utilizar as equações 2.7 a 2.10, uma vez que as fibras no provete ( $0^{\circ}_2/90^{\circ}_2$ )<sub>2s</sub> estão dispostas em duas direções a  $0^{\circ}$  e  $90^{\circ}$ , em sequencias de camadas duas a duas, sendo necessário fazer o cálculo das propriedades elásticas resultantes da mistura das fibras.

Na figura 36 encontra-se as curvas tensão-deformação correspondentes a cada método. Na realização do ensaio, a tensão aplicada variou entre  $\sigma_{min} = 0$  MPa até  $\sigma_{max} = 125$  MPa, retirando os valores das deformações, ocorridos nas diferentes direções.

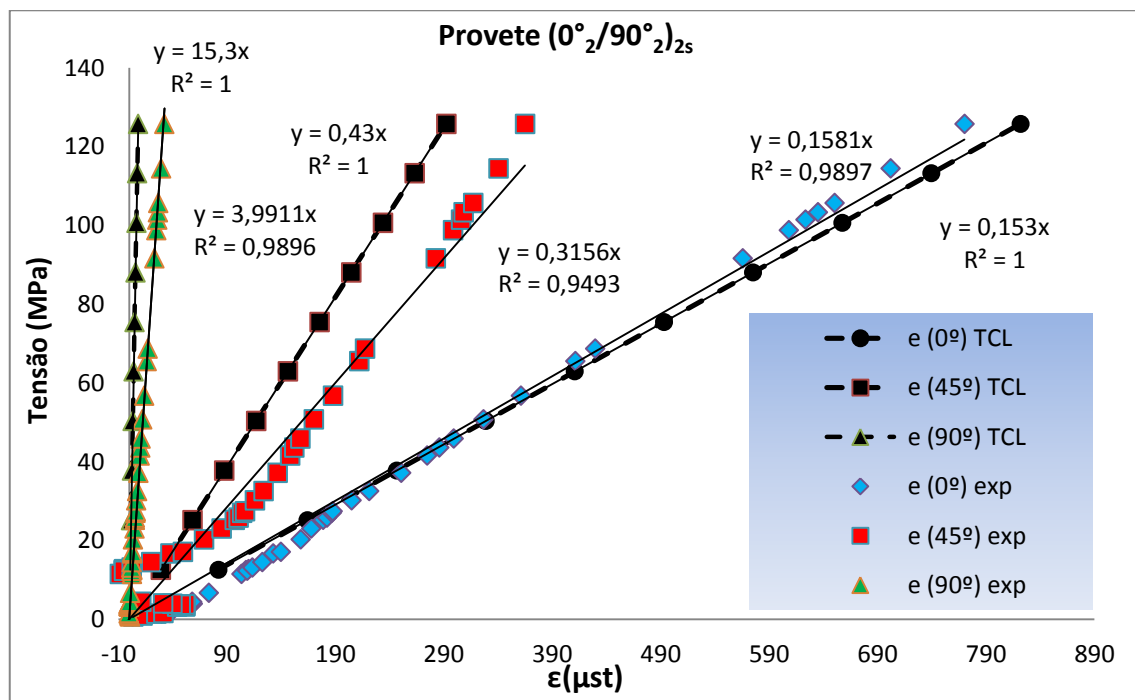


Figura 36. Ensaio de tração provete ( $0^{\circ}_2/90^{\circ}_2$ )<sub>2s</sub>.

As deformações medidas segundo as orientações ( $0^{\circ}$ ), ( $45^{\circ}$ ) e ( $90^{\circ}$ ), permitem obter os valores das constantes elásticas  $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ,  $G_{12}$  respetivamente para a tensão de calibração imposta.

**Tabela 5.** Valores experimentais e teóricos do ensaio de tração do provete  $(0^\circ/90^\circ)_2s$ 

	<b>Experimental</b>	<b>Teórico</b>	<b>Erro</b>
Módulo de Young longitudinal ( $E_{11}$ )	158,1 GPa	153 GPa	3,2 %
Módulo de Young transversal ( $E_{22}$ )	40 GPa	153 GPa	74 %
Módulo de elasticidade transversal ( $G_{12}$ )	3,15 GPa	4,3 GPa	33 %
Coefficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ )	0,26	0,29	10 %

O valores das constantes elástica obtidas  $45^\circ$  e  $90^\circ$  têm erros associados muito elevados, este facto pode ter sido originado por alguma falha no extensómetro, ou um desfasamento da centragem do extensómetro na altura da colagem ao provete. Um outro fator que poderá estar relacionado com este desfasamento elevado, pode ser uma desordenação da orientação das fibras a quando o seu fabrico. Sendo necessário fazer um estudo ao microscópio para verificar essa possibilidade e com o objectivo de encontrar uma resposta para o erro encontrado. O valor do módulo de Young ( $E_{11}$ ) e do coeficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ ) obtido tem um erro relativamente pequeno podendo considerar-se que existe uma boa aproximação entre os valores numéricos e experimentais.

### 5.3.2. Relaxação de deformação

Na figura 37 encontra-se representado os resultados da relaxação de deformação segundo o eixo de aplicação da tensão ( $0^\circ$ ). Observa-se um comportamento idêntico da curva no ensaio de furação a 4 bar, em relação ao caso ideal, até uma profundidade de 0,4 mm, existindo uma boa aproximação entre os resultados obtidos experimentalmente e os numéricos.

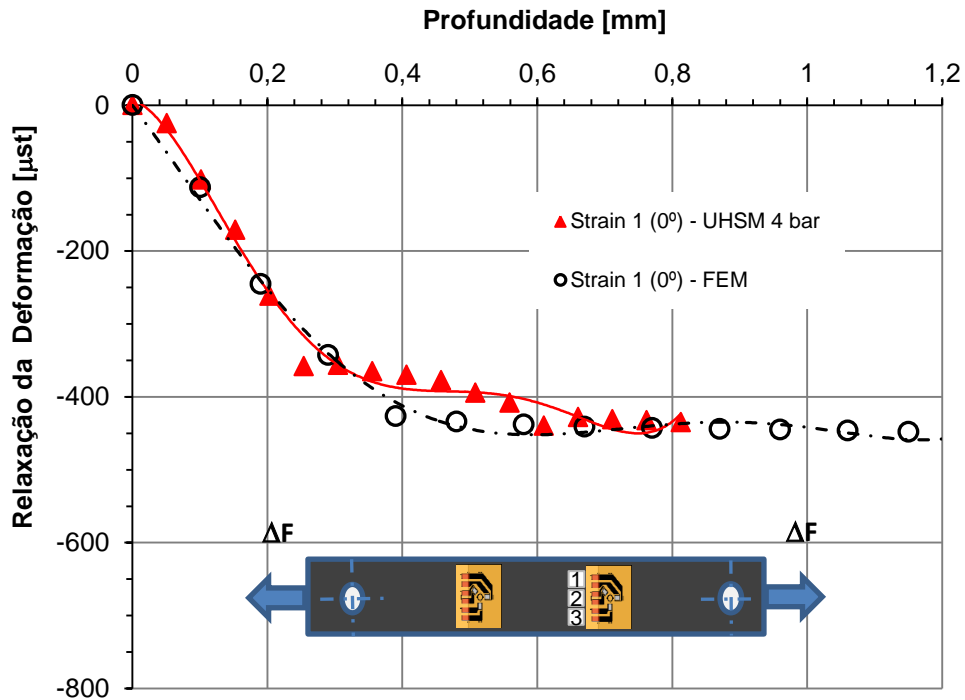


Figura 37. Relaxação da deformação a 0°.

Na figura 38 encontra-se as curvas de relaxação da deformação a 90° em profundidade, os resultados obtidos mostram uma diferença significativa para profundidades reduzidas até 0,4 mm. A partir dessa profundidade a curva tem uma aproximação progressiva ao comportamento do caso ideal, embora com ligeira diferença.

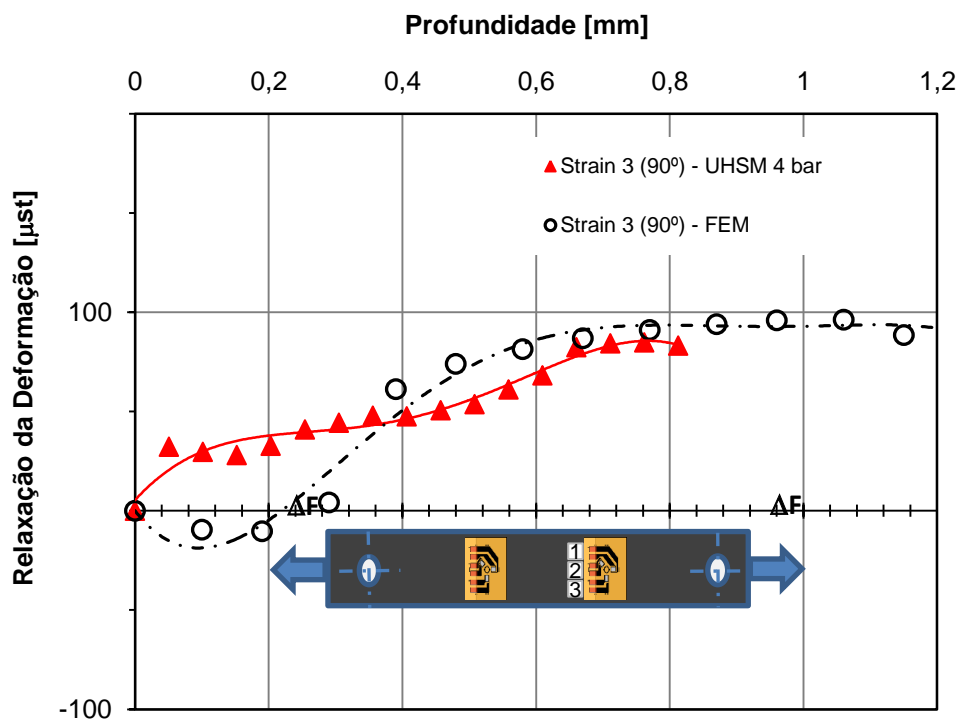


Figura 38. Relaxação da deformação a 90°.



A curva obtida na relaxação da deformação para a orientação a  $45^\circ$ , exposto na figura 39, apresenta um comportamento semelhante para uma fase inicial do ensaio, aumentando a diferença com a profundidade.

Esta diferença pode dever-se à introdução de deformações parasitas pelo processo de furação e a fatores já referenciados em capítulos anteriores, como o tipo de extensómetro utilizado. É necessário realizar mais estudos para identificar uma solução, de modo a melhorar a aproximação das curvas reais com a numérica.

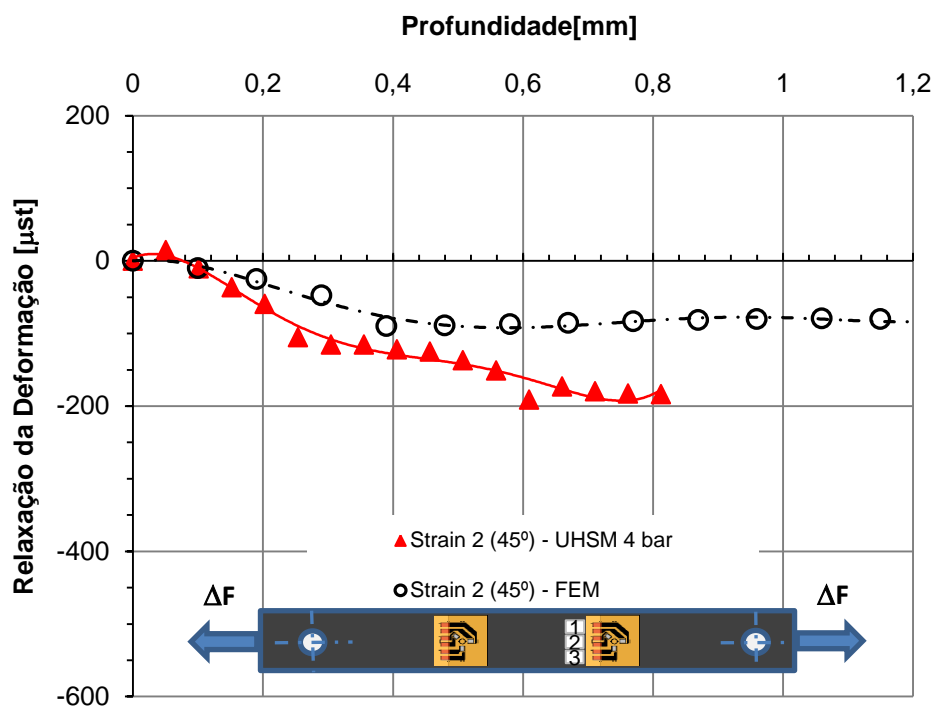


Figura 39. Relaxação da deformação a  $45^\circ$ .

A simulação numérica para o provete “*cross-ply*”  $(0_2/90_2)_2s$  encontra-se representado nas figuras 40 e 41.

Na figura 40 encontra-se determinada, para uma profundidade de 1 mm, a distribuição da tensão, a tensão máxima, segundo X, é 2000 MPa orientada a  $0^\circ$  e a tensão mínima (SMN) de -124 MPa segundo a orientação a  $90^\circ$ . Na figura 41 encontra-se os resultados da distribuição da deformação a uma profundidade de 1 mm. A deformação máxima ocorre segundo a orientação a  $0^\circ$  e observa-se uma deformação de compressão na direção a  $90^\circ$

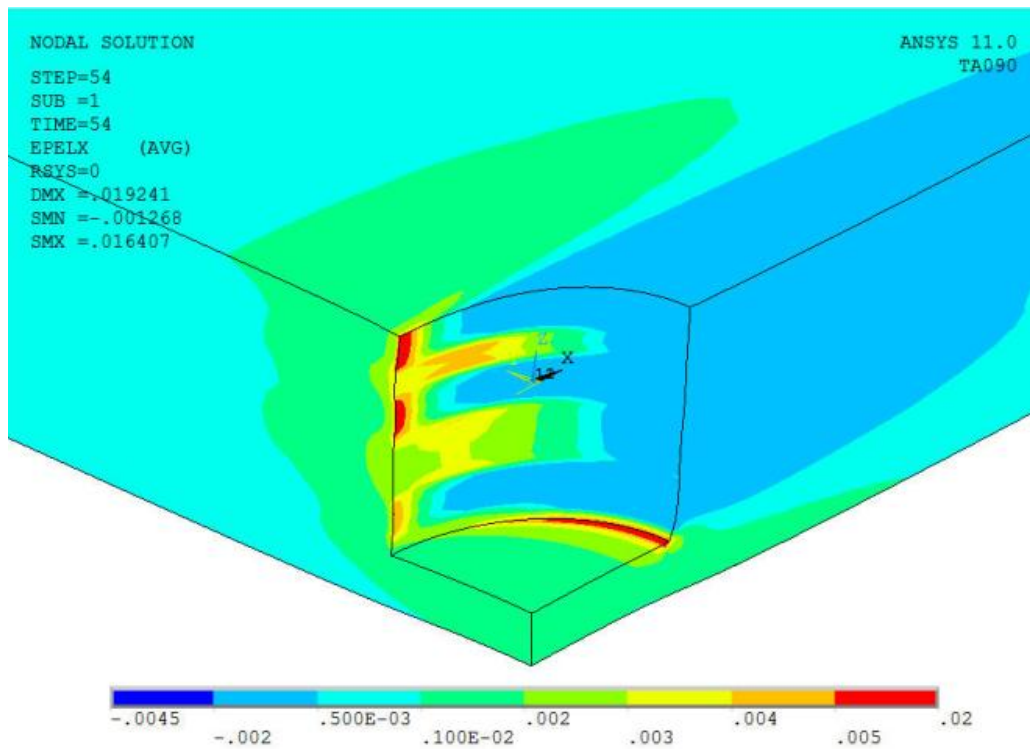


Figura 40. Distribuição da tensão Sigma X, tensão normal segundo X, em torno do furo.

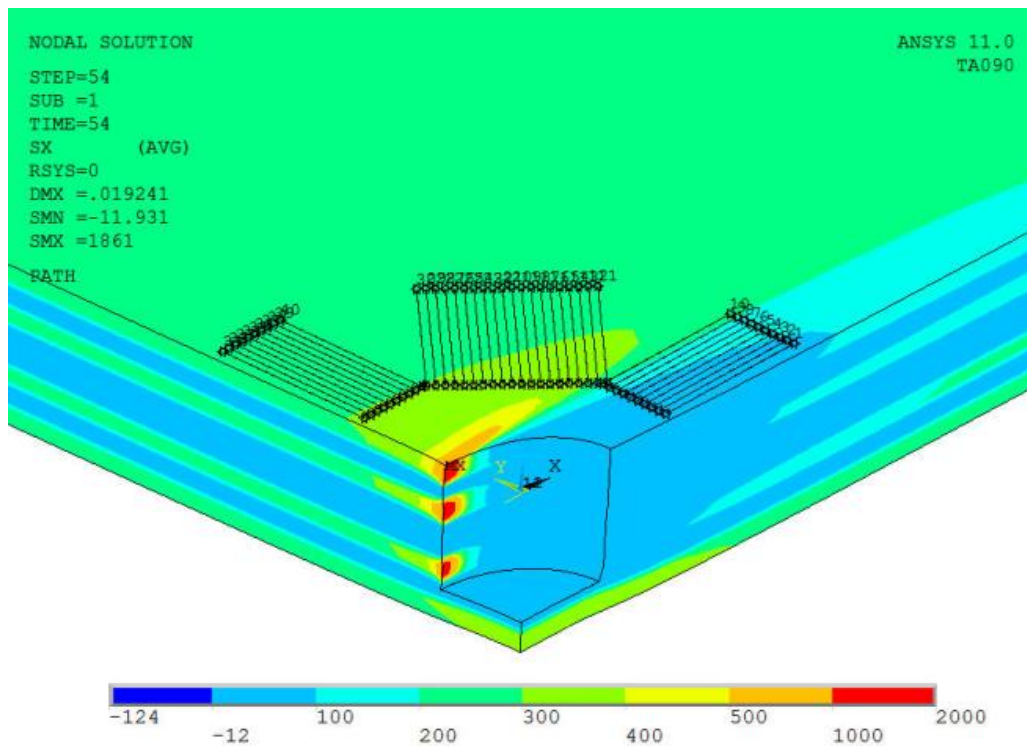


Figura 41. Distribuição da deformação segundo X, em torno do furo.

## 6. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo o desenvolvimento e aplicação de uma metodologia, de base experimental e numérica, para quantificar o efeito da furação durante a aplicação da técnica do furo incremental (IHD) na determinação de tensões residuais em compósitos laminados, em particular, nos compósitos de matriz polimérica (PMC) reforçada com fibras de carbono (CFRP).

- De forma resumida, foram utilizados dois tipos de provete CFRP, com a sequência de empilhamento  $(0^\circ)_4$  e  $(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$ , respectivamente. Os provetes foram submetidos a ensaios de tração para determinar as propriedades do material compósito. Além disso pretendeu-se verificar a influência da velocidade de corte durante a furação. Para tal, procedeu-se a uma calibração experimental que consistiu em determinar as curvas de relaxação de deformação em função da profundidade do furo correspondentes a uma dada tensão de calibração. Nestes ensaios os furos foram realizados a alta velocidade para duas velocidades de rotação diferentes de aproximadamente 210 000 rpm e 280 000 rpm.

Após a realização da calibração experimental foi efetuada uma simulação numérica de todo o processo experimental, através do método dos elementos finitos, usando o código ANSYS 11. As principais conclusões foram as seguintes.

Os seguintes paços foram efetuados.

- Nos ensaios de tração efetuados sem furação, a comparação direta dos valores experimentais e teóricos na determinação das propriedades elásticas do material, foi razoavelmente boa. Os resultados obtidos segundo as três orientações próximos, para o provete  $(0^\circ)_4$ , embora com algum erro associado mas compreensível, o resultado menos coerente ocorreu no provete  $(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$  segundo a orientação a  $90^\circ$  onde se obtiveram valores com um erro bastante elevado. Nas restantes orientações os valores obtidos tiveram alguma diferença face aos esperados, mas com uma aproximação razoavelmente boa.
- Comparação das curvas teóricas e experimentais obtidas da relaxação da deformação vs. profundidade, para as duas velocidades utilizadas indicam que os resultados obtidos para essas velocidades de furação apresentam uma tendência semelhante ao caso ideal a  $0^\circ$  e  $90^\circ$ ,

verificando-se uma maior aproximação da curva ideal para o ensaio a 280 000 rpm. Os resultados obtidos a 45° apresentam comportamentos distintos entre as curvas de relaxação da deformação reais e ideal no ensaio do provete  $(0^\circ)_4$ , sendo necessário fazer uma otimização do modelo numérico. A curva obtida da relaxação da deformação no provete  $(0^\circ_2/90^\circ_2)_{2s}$  apresenta um melhor concordância do modelo numérico e o ensaio experimental.

- A simulação numérica da furação permitiu obter curvas de relaxação de deformação em função da profundidade que se podem considerar ideais para a furação, quando aplicada a técnica do furo incremental.
- A comparação das curvas experimentais e numéricas, embora se constatem diferenças esperadas, permite concluir que o procedimento de furação poderá ser otimizado, para que no futuro se possa aplicar esta técnica de medida de tensões residuais, de forma fiável, ao caso dos laminados compósitos CFRP.
- A principal vantagem da metodologia estudada é permitir a quantificação do efeito de furação, sendo totalmente independente do material e operação de furação, nomeadamente o facto de se poder eliminar o efeito das tensões residuais iniciais.

## Trabalho futuro

- Num trabalho futuro seria interessante colocar extensómetros individuais em cada direção de medida ou utilizar sistemas de medida de deformação diferentes, tais como, interferometria, DIC (correlação de imagem digital), etc.
- Com vista à otimização do método do furo, a metodologia estudada poderá ser usada para estudar o efeito de outros parâmetros de furação tais como, a geometria da ferramenta, diferentes velocidades de corte, utilização de refrigeração durante a operação de furação, etc.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS,(2010), Release 11.0 Documentation for ANSYS, SAS IP Inc., Houston
- ASTM-E-837-94a, 8, (1994) “Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole- Drilling Strain-Gage Method”, Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards, 1-7.
- Berthelot, J, M., (1999), "Composite Materials: mechanical behavior and structural analysis", Springer-Verlag, New York, Inc., 16-39
- Datoo, M, H., (1991), “Mechanics of Fibrous Composites”, Elsevier Science Publishers Ltd, England UK.
- Durão L, M, P., Tavares J, M, R, S., Marques A, T., Freitas M., e Magalhães A, G., (2003), “Caraterização de danos de Maquinagem em Placas Compósitas” APMTAC, Portugal, acedido em 20 março de 2011 ([http://www.dem.isep.ipp.pt/docentes/lmd/CIBEM6\\_2003.pdf](http://www.dem.isep.ipp.pt/docentes/lmd/CIBEM6_2003.pdf)).
- Fernlund, G., (2003), “Residual Stress, Spring-in and Warpage in Autoclaved Composite Parts”, Canada, 1.
- Flaman, M, T., (1982), “Investigation of Ultra-High Speed Drilling for Residual Stress Measurement by the Center Hold Method”, Experimental Mechanics, 22, 26 – 30.
- Hollaway, L., (1990), “Polymers and Polymer Composites in Construction”, Thomas Telford Ltd., London UK, 31
- Ko, W, L., (1985), “Stress Concentration Around a small circular Hole in the HiMAT Composite Plate”, Arnes research Center, National Aeronautics and Space Administration(NASA), Dryden Flight Research Facility, Edwards, (CA) USA.
- Lekhnitskii, S.G.; Tsai, S.W. and Cheron, T., (1968), “Anisotropic Plates”, Gordon and BreachScience Publishers, New York.
- Lu, J., (1996), “Handbook of Measurement of Residual Stresses Society for Experimental Mechanics, Inc.”, published by the Fairmont Press, Inc.
- Naik, N, K.; Sahani, R, D., (1984) “Measurement of Residual Stress in composite by Hole-Drilling Method”, Proc. of the V Inter. Congress on Experimental Mechanics, SESA, Montreal Canada, 159 - 163.
- Nobre, J, P.,(2010) "Quantifying the drilling effect during the application of incremental hole drilling technique in laminate composites", Proc. 8<sup>th</sup> European Conference on Residual Stresses, Paolo Scardi Edt, Riva del Garda, Italy, 28-30 June
- Pagliario, P., Zuccarello, B., (2007), “Residual Stress Analysis of Orthotropic Materials by the Through-Hole Drilling Method”, Experimental Mechanics 47, 217 – 236.
- Piloto, A, L., Michino, J, M., (1994) “Advanced Composite Material”, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 9-30
- Sicot, O., Cherouat, A., Gong, X, L., Lu, J., (2000), “Determination of Residual Stresses in the case of Composite Laminate Carbon-Epoxy, ICRS-6”, Oxford, UK, 368 –

374.

- Sicot, O., Gong, X, L., Cherouat, A., Lu, J., (2003) “Determination of Residual Stress in Composite Laminates Using the Incremental Hole-drilling Method”, *Journal of Composite Materials*, 37, 831 – 844.
- Sicot, O., Gong, X, L., Cherouat, A., Lu, J., (2004), “Influence of Experimental Parameter on Determination of Residual Stress using the Incremental Hole-Drilling Method”, *Composites Science and Technology* 64, 171 – 180.
- Smith, W, F., (1998), “Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais”, McGraw-Hill Portugal, Lda., 3º, 385-395.
- Soung, V, Hoa., (2009), “Principles of the manufacturing of composites material”, DEStech Publications, Inc., 34-41.
- Staab, G, H., (1999), ”Laminar Composites, Butterworth-Heinemann” (MA), USA, 205 - 206
- Stiffel, J,H., (2010), “Application of the Hole-Drilling Technique to determine Residual Stresses in Polymer Matrix Composites”, Diploma Thesis II, Institute of Materials Engineering, University of Kassel, Germany..
- Strong, A, B., (2008), “Fundamentals of Composite Manufacturing: Materials, Methods and Applications”, Society of Manufacturing Engineers, 339 - 340.
- Xiaosong, H., (2009), “Fabrication and Properties of Carbon Fibbers”, *Journal Materials*, 2370-2382.

