

AGRADECIMENTOS

Desejo manifestar o meu agradecimento a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta tese, em particular:

- Ao orientador científico, Professor João Paulo Nobre responsável pela iniciativa e orientação deste trabalho, pelo seu incentivo e total disponibilidade na discussão crítica dos resultados.
- Ao Professor Wim Van Paepegem da Universidade de Gent, Bélgica, pela elaboração dos provetes e determinação das propriedades elásticas dos materiais compósitos.
- A todos os que, durante o estágio efectuado no Laboratório do Grupo de Tensões Residuais, do Centro de Estudos de Materiais por Difracção de Raios-X (CEMDRX) da Universidade de Coimbra, me deram o seu apoio, nomeadamente ao Professor Castanhola Batista e à Professora Maria José Marques. Também a todos os colegas com quem convivi no laboratório durante a realização deste trabalho, o Bastien, o Mannuele, a Mehwash e o Serafino.

Desejo manifestar também o meu agradecimento aos meus pais por tudo e à Mylla por se fazer sempre presente.

RESUMO

As tensões residuais que surgem durante o processo de fabrico de materiais compósitos (diferença nos coeficientes de expansão térmica, etc.) podem conduzir a deformações plásticas localizadas, delaminação e a iniciação e propagação de fissuras, podendo assim afectar largamente o comportamento mecânico em serviço dos elementos estruturais compósitos, hoje em dia cada vez mais utilizados em praticamente todas as áreas da engenharia, desde a civil até à aeroespacial. O conhecimento das tensões residuais instaladas é essencial, quer na optimização das técnicas de fabrico, quer no desenvolvimento de modelos de previsão de vida dos elementos estruturais compósitos. O desenvolvimento de técnicas experimentais que permitam determiná-las com rigor assume assim um papel muito importante.

Deste modo, apenas com métodos de medida fiáveis poderão ser validados experimentalmente os modelos numéricos que possam ser desenvolvidos no âmbito do comportamento mecânico dos sistemas compósitos. Foi com esse propósito que desenvolvemos este trabalho, que consistiu no estudo e desenvolvimento da técnica do furo incremental na determinação de tensões residuais em materiais compósitos de matriz polimérica.

Este trabalho foi dividido em três partes principais:

- Uma parte experimental, consistindo na aplicação da técnica do furo incremental a diferentes materiais, nomeadamente no apoio a trabalhos desenvolvidos no laboratório do Grupo de Tensões Residuais do Departamento de Física da Universidade de Coimbra e, especialmente, a materiais compósitos.
- Uma parte numérica que consistiu na modelação por elementos finitos dos provetes dos materiais usados no estudo, essencial para a determinação das constantes de calibração necessárias ao método de cálculo das tensões residuais em materiais elásticos ortotrópicos usados neste estudo. A modelação numérica foi levada a cabo com o software comercial ANSYS 11.0, tendo sido desenvolvidas diversas macros por forma a facilmente adaptar a modelação numérica às diferentes configurações dos sistemas

compósitos laminados (PMCs - compósitos de matriz polimérica, nomeadamente os reforçados com fibras, de carbono, por exemplo CFRP).

- Finalmente uma parte de desenvolvimento de software de cálculo de tensões residuais. Neste âmbito foram desenvolvidos vários módulos usando a linguagem de programação Visual Basic.Net, por forma a serem incluídos no software “GTR – Residual Stress Group Software” desenvolvido no centro de investigação, extendendo a sua aplicabilidade também aos materiais ortotrópicos.

Palavras-chave: técnica do furo incremental, tensões residuais, materiais compósitos ortotrópicos, simulação numérica, método de elementos finitos.

ABSTRACT

Residual stresses originated during the manufacture process of composite laminates, can lead to local plastic deformations, delaminations and crack initiation and propagation, largely affecting the mechanical behaviour in service of these structural composite elements, nowadays more and more used in the almost engineering applications, since the civil to the aerospace ones. It is well known that its knowledge is essential for the optimization of the processing parameters selection and lifetime prevision models development of the structural composite elements. Therefore, the development of experimental techniques for residual stress determination in composite systems should be considered a very important issue in this technological area.

As the presence of residual stresses generally goes unrecognized until after malfunction or failure occurs, methods of measuring accurately residual stresses in composite elements are needed. Looking to accomplish this, we developed this study having the aim of applying the hole-drilling method in the determination of residual stresses in orthotropic composite materials.

It's possible to distinguish three major parts on this study:

- One experimental part, consisting on measuring residual stresses in different materials, in support of previously works developed in the laboratory of the Residual Stress Group on Department of Physics of the University of Coimbra, and especially on composite materials.
- One numerical part, consisting on modeling by finite elements technology the materials of our study, essential to determine the calibration coefficients needed for the calculation method of residual stresses in orthotropic elastic materials. All the numeric modulation was done using the commercial software ANSYS 11.0. Scripts have been made as a way to easily adapt the numeric modulation to different lay-up configurations of the laminate composite systems (PMCs - polymeric matrix composites, as an example, carbon fibers reinforced plastic CFRP).

- Finally one part of software development to calculate residual stresses. It has been developed several modulus using the programation language Visual Basic.Net in order to include on the software created on the investigation center, “GTR – Residual Stress Group Software”, an option button to the orthotropic materials case.

Keywords: hole-drilling method, residual stresses, orthotropic composite materials, numerical simulation, finite element method.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iv
Índice de Figuras	viii
Capítulo 1	1
Estado da Arte	1
1.1- Sobre a importância dos materiais compósitos	1
1.2 - Tensões residuais: definição e importância.....	2
1.3 - Técnicas de medida	3
1.4 - Tensões residuais em compósitos	4
1.5 - Técnica do furo incremental.....	5
1.5.1 - Solução de Kirsch: Base da Técnica do Furo.....	6
1.5.2 - Solução para materiais ortotrópicos	9
1.5.3 - Constantes de calibração	12
Capítulo 2	15
Materiais e Procedimento Experimental	15
2.1 - Materiais usados.....	15
2.2 - Procedimentos experimentais.....	16
Capítulo 3	20
Método de Cálculo das Tensões Residuais	20
3.1 - Método de cálculo	20
3.2 - Determinação das constantes de calibração	21
Capítulo 4	23
Simulação numérica	23
4.1 - Definição do modelo, simetrias e condições fronteira	23
4.2 - Procedimento de cálculo	25
4.3 - Leitura de resultados	27
Capítulo 5	29
Desenvolvimento do Software GTR	29

5.1 - Apresentação do software	29
5.2 - Modificação do software	29
Capítulo 6	35
Resultados e Discussão	35
6.1 - Deformações obtidas nos ensaios.....	35
6.2 - Resultado de tensões residuais nos compósitos	36
Capítulo 7	39
Conclusões e Sugestões para trabalho futuro	39
7.1 - Conclusões	39
7.2 - Sugestões para trabalho futuro	40
Referências bibliográficas	42
Anexos	44
Macros - Método dos Elementos Finitos	44
Anexo I - pré-processamento.....	44
Anexo II - solução das constantes <i>Ain</i>	54
Anexo III - solução das constantes <i>Bin</i> e <i>Cin</i>	56
Anexo IV - pós-processamento das constantes <i>Ain</i>	59
Anexo V - pós-processamento das constantes <i>Bin</i>	62
Anexo VI - pós-processamento das constantes <i>Cin</i>	65

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1- ESQUEMA REPRESENTATIVO DA CONSTITUIÇÃO DE UM COMPÓSITO.	1
FIGURA 1.2- ESTADO DE TENSÃO NUM PONTO DE UMA PLACA FINA SUJEITA A UMA TENSÃO RESIDUAL UNIAXIAL.....	7
FIGURA 1.3- REPRESENTAÇÃO DO SIGNIFICADO FÍSICO DAS CONSTANTES A_{in}	13
FIGURA 1.4- ESQUEMA DA OBTENÇÃO DAS CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO.	13
TABELA 2.1- PROPRIEDADES ELÁSTICAS DO MATERIAL M1.	16
TABELA 2.2- PROPRIEDADES ELÁSTICAS DO MATERIAL M2.	16
FIGURA 2.1- ROSETA NORMALIZADA NA NORMA ASTM E 837-08[4].	17
FIGURA 2.2- EQUIPAMENTO DE FURO RS 200.	18
FIGURA 2.3- SISTEMA DE MEDIDA MULTICANAL DIGITAL UNIVERSAL SPIDER 8-30.....	18
FIGURA 3.1- REPRESENTAÇÃO DA ROSETA EA-XX-062RE-120 TIPO A.	20
FIGURA 3.2- ESQUEMA DA DIVISÃO DAS GRELHAS DOS EXTENSÓMETROS.	22
FIGURA 4.1- MALHAGEM E CONDIÇÕES FRONTEIRA.	25
FIGURA 4.2- MALHAGEM E CONDIÇÕES FRONTEIRA: VISTA ISOMÉTRICA.	25
FIGURA 4.3- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CARREGAMENTO NA CALIBRAÇÃO NUMÉRICA.	26
FIGURA 4.4- REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DO FURO: VISTA ISOMÉTRICA.	26
FIGURA 4.5- REPRESENTAÇÃO FINAL DO FURO: VISTA ISOMÉTRICA.	27
FIGURA 4.6- REPRESENTAÇÃO FINAL DO FURO: VISTA LATERAL.	27
FIGURA 4.7- CAMINHO PARA LEITURA DE VALORES PARA A CONSTANTE A_{in}	28
FIGURA 5.1- INTERFACE GRÁFICA DO SOFTWARE – ESCOLHA DA OPÇÃO PARA MATERIAIS ORTOTRÓPICOS.....	30
FIGURA 5.2 – CAIXA DE AVISO PARA O CASO DE ANÁLISE ORTOTRÓPICA.	30
FIGURA 5.3 – SELECÇÃO DA BASE DE DADOS.	31
FIGURA 5.4 INTERFACE GRÁFICA DO SOFTWARE. GRÁFICO E TABELA DEFORMAÇÃO - PROFUNDIDADE.	32
FIGURA 5.5 – CAIXA DE AVISO COM INSTRUÇÕES SOBRE O FORMATO DO FICHEIRO DAS CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO.	32
FIGURA 5.6 – SELECÇÃO DO FICHEIRO DAS CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO.....	33
FIGURA 5.7- APRESENTAÇÃO DA MATRIZ DAS CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO E ACTIVAÇÃO DO BOTÃO DE CÁLCULO DAS TENSÕES RESIDUAIS.	33
FIGURA 5.8- INTERFACE GRÁFICA DO SOFTWARE. GRÁFICO E TABELA TENSÃO RESIDUAL - PROFUNDIDADE.	34
TABELA 6.1- TABELA DEFORMAÇÃO PROFUNDIDADE.....	35
FIGURA 6.1- GRÁFICO DEFORMAÇÃO - PROFUNDIDADE COM UMA SUAUIZAÇÃO DE 8%. 36	
FIGURA 6.2- GRÁFICO DAS TENSÕES PRINCIPAIS, (σ_1 E σ_2) - PROFUNDIDADE.	37
FIGURA 6.3- GRÁFICO DAS TENSÕES σ_x , σ_y E τ_{xy} - PROFUNDIDADE.	37
FIGURA 6.4- GRÁFICO DA TENSÃO DE CORTE MÁXIMA, (τ_{max}) - PROFUNDIDADE.	38

CAPÍTULO 1

ESTADO DA ARTE

1.1- SOBRE A IMPORTÂNCIA DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

O desenvolvimento tecnológico obrigou à produção de peças e componentes de máquinas com cada vez maior exigência ao nível da qualidade de produção, precisão dimensional e integridade estrutural.

Em resposta a estas necessidades foram desenvolvidos os materiais compósitos, que são materiais compostos por dois ou mais materiais diferentes, distintos a nível macroscópico, com características diferentes, que em conjunto obtêm melhores propriedades do que quando estão isolados.

Há duas categorias dos constituintes dos compósitos, a matriz e as fibras de reforço. A matriz envolve e mantém a posição relativa das fibras, e estas fornecem as propriedades mecânicas que vão melhorar as propriedades da matriz, conseguindo-se muito boas propriedades, tais como, elevada resistência e rigidez específicas, longa vida de fadiga e baixa densidade.

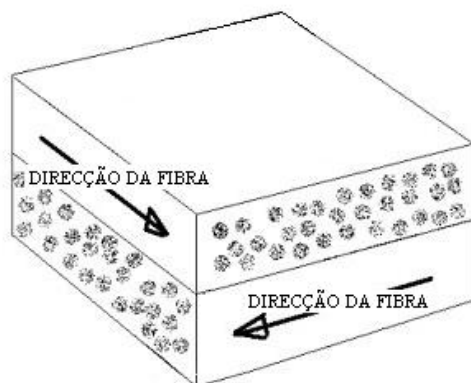


Figura 1.1- Esquema representativo da constituição de um compósito.

A homogeneidade do material depende da distribuição das fibras na matriz, o que torna a maioria dos materiais compósitos anisotrópicos. Este facto vai implicar que as propriedades do material sejam dependentes da direcção.

Um laminado compósito, normalmente é constituído por várias camadas unidireccionais, empilhadas sequencialmente com diferentes direcções, de forma a melhorar as propriedades globais do material. É então necessário indicar a orientação das camadas, através do ângulo entre o eixo principal do material (orientação das fibras) e o eixo de referência.

Exemplos de indústrias com crescente utilização destes materiais são as indústrias aeronáutica e aeroespacial, nas quais é requerida alta fiabilidade e confiabilidade.

No estudo sobre a aplicação do IM7-977-2, um compósito de grafite com matriz epóxida, nos depósitos de combustível do veículo espacial X-33 [1], determinou-se que com o uso deste compósito, o custo de transportar uma libra de carga para órbita, que é de \$10.000, diminui uma ordem de grandeza. Conseguindo-se para a mesma resistência uma poupança acima de 30% em peso.

O centro alemão aeroespacial DLR, usa materiais plásticos reforçados por fibras de carbono (CFRP) para eliminar vibrações e reduzir o ruído [2].

Com o desenvolvimento da nanotecnologia, actualmente tem-se investigado a criação de nano tubos de carbono como melhoramento das tradicionais fibras de carbono [3], melhorando significativamente as propriedades do material compósito.

A aplicação de materiais compósitos, por todas as vantagens inerentes às suas propriedades, é uma área da engenharia com muito potencial de crescimento.

1.2 - TENSÕES RESIDUAIS: DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA

Nos fenómenos de fadiga e falha estrutural dos materiais há dois factores principais envolvidos: as tensões criadas pela aplicação de cargas exteriores à peça ou cargas de serviço e as tensões pré-existentes no material, antes da aplicação de qualquer carga,

chamadas tensões residuais. Estas resultam dos processos de fabrico e possíveis tratamentos de melhoria de produto.

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. Invariavelmente, todos os processos de produção e acabamento envolvem fenómenos térmicos (têmpera, revenidos, etc.), mecânicos (granalhagem, laminagem profunda, etc.) ou termoquímicos (cementação, nitruração, etc.) ou uma combinação destes (maquinagem, soldadura, etc.) que, induzindo heterogeneidades de deformação, conduzem ao aparecimento de tensões residuais que podem ser favoráveis ou desfavoráveis, no que respeita ao comportamento mecânico dos componentes fabricados.

De facto, as tensões residuais podem ter efeitos positivos ou negativos, dependendo da magnitude, sinal e distribuição. Por exemplo, num componente sujeito a fadiga, tensões residuais de tracção à superfície, que se sobrepõem às tensões de serviço, aumentando a razão de tensão, podem conduzir a uma redução substancial da vida útil desse componente. Da mesma forma, se forem de compressão, poderão contribuir para uma clara melhoria da vida em serviço.

Muito há a fazer para incorporar, de forma fiável, o efeito das tensões residuais no dimensionamento e projecto de componentes mecânicos, mas grandes vantagens poderão advir dessa incorporação.

As tensões residuais podem ser classificadas de uniformes ou não uniformes, dependendo se variam com a profundidade ou não. Em materiais com tratamentos de superfície e em materiais compósitos, geralmente as tensões são não uniformes.

1.3 - TÉCNICAS DE MEDIDA

Essencial nesta área é a indubitável necessidade de ter métodos de medida fiáveis para a determinação de tensões residuais. Só dessa forma poderão ser validados

experimentalmente os modelos numéricos que possam ser desenvolvidos no âmbito do comportamento mecânico dos materiais e sua utilização no projecto mecânico de componentes. Existem várias técnicas de medida que têm sido usadas com bastante sucesso no caso dos materiais metálicos, baseadas em diferentes efeitos físicos, desde a difracção de raios-x e de neutrões, passando por técnicas baseadas em ultra-sons e magnetismo até às técnicas baseadas em princípios puramente mecânicos, como sejam as técnicas de remoção de camadas, do anel central e do furo incremental [4]. Cada técnica tem as suas vantagens e limitações, pelo que deve ser escolhida de acordo com o material em estudo.

1.4 - TENSÕES RESIDUAIS EM COMPÓSITOS

Embora um grande desenvolvimento nesta área tenha sido levado a cabo nas últimas décadas, no que se refere à determinação de tensões residuais em materiais metálicos [5], muito ainda há a fazer no caso dos materiais compósitos de matriz polimérica. Em primeiro lugar, dada a natureza amorfa destes materiais, as técnicas baseadas em difracção de raios-x e de neutrões não podem ser usadas. Em segundo lugar, no que às técnicas mecânicas diz respeito, pouco se sabe do efeito dos processos de remoção e de corte do material na distribuição de tensões residuais que se pretende determinar. É neste contexto que se insere o presente trabalho.

No que respeita aos materiais compósitos de matriz polimérica, as tensões residuais são introduzidas durante o processo de fabrico. Os principais factores são diferentes coeficientes de expansão térmica, da matriz e das fibras, e contracção durante a cura.

Na fase inicial do processo de cura do material compósito a resina está num estado viscoso, não havendo tensões residuais significantes. Com o diminuir da temperatura, ao atingir a temperatura de transição vítrea, T_g , dá-se o início da vitrificação da resina, ocorrendo contracção dos materiais. Essa contracção vai ser diferente para a fibra e para a matriz devido ao coeficiente de expansão térmica da fibra ser inferior ao da matriz, então, devido aos constrangimentos estruturais, no estado de equilíbrio atingido, a fibra está sujeita a um esforço de compressão, enquanto a matriz a um esforço de tracção.

As tensões residuais podem ser analisadas do ponto de vista micromecânico ou macromecânico. Numa escala micromecânica, as tensões residuais aparecem nas camadas unidireccionais, nas fibras individuais e em torno delas. Ao nível macromecânico as tensões residuais desenvolvem-se devido à anisotropia das diferentes camadas [6].

Nos materiais compósitos há variação do sinal e da magnitude das tensões residuais na passagem entre camadas com diferentes orientações, sendo os valores máximos para a interface entre camadas.

As principais fontes de erros na medida de tensões residuais em compósitos são a estrutura laminar, que apenas a nível macroscópico pode ser considerada contínua, a incerteza nas propriedades elásticas locais e o desalinhamento angular da roseta em relação às direcções elásticas principais do material [7].

O campo de deslocamentos em torno do furo num material ortotrópico não tem uma forma trigonométrica simples, pelo que se torna tão complicado medir as tensões residuais nestes materiais.

O conhecimento das tensões residuais pós-cura pode permitir melhorar o processo de cura utilizado no processamento deste tipo de materiais, bem como refazer o projecto de modo a optimizá-lo.

1.5 - TÉCNICA DO FURO INCREMENTAL

A técnica do furo incremental é uma técnica semi-destrutiva, que consiste em realizar um pequeno furo na superfície do material, em sucessivos incrementos de profundidade, e medir as deformações superficiais (usando, por exemplo, extensometria eléctrica – rosetas de extensómetros) causadas pela relaxação das tensões em torno do furo. A técnica baseia-se em relacionar as deformações superficiais medidas com as tensões residuais presentes no material, em cada um dos incrementos de profundidade, ao longo da profundidade total do furo. Este método permite avaliar as tensões não só nos intervalos das camadas, como dentro das próprias camadas dos laminados compósitos.

Existem vários procedimentos de cálculo que podem ser usados, todos eles necessitando de procedimentos de calibração válidos, geralmente obtidos por via numérica.

Na determinação de tensões residuais não uniformes em profundidade, existem actualmente quatro métodos de cálculo principais, sendo que para os casos em que se pretende medir em camadas mais profundas e com elevados gradientes de tensão, o método integral, sendo teoricamente o mais correcto, é também aquele que apresenta melhores resultados. No cálculo de tensões residuais não uniformes em profundidade, a deformação de relaxação medida na superfície do material é o resultado da acumulação das tensões residuais existentes em cada incremento até à profundidade total do furo, ou seja, somente uma parte dessa deformação medida é devida à relaxação de tensão no incremento de profundidade actual [8].

O método integral identifica a contribuição individual de tensão residual de cada camada para a deformação total medida na superfície. A tensão residual é considerada constante para cada incremento e igual ao valor médio do valor real nesse incremento.

As deformações medidas são influenciadas principalmente pelas tensões na superfície, pelo que se torna difícil identificar de maneira fiável as tensões residuais a partir de certas profundidades, pois os extensómetros deixam de ter sensibilidade para as medir.

A técnica do furo incremental é muito sensível aos erros de medida. Numa aprofundada análise a todos os tipos de erros [9], demonstra-se que a margem de erro aumenta com a profundidade. Para evitar que aumente consideravelmente, a profundidade do furo é limitada a cerca de 0,4 vezes o raio nominal da roseta, sendo a partir daqui desprezáveis os valores lidos.

1.5.1 - SOLUÇÃO DE KIRSCH: BASE DA TÉCNICA DO FURO

Suponha-se uma placa fina sujeita a uma tensão residual uniforme, como representado na figura 1.2. Em coordenadas polares as tensões num ponto P na superfície da placa são dadas por (estado plano de tensões):

$$\begin{cases} \sigma_r^1 = \frac{\sigma_x}{2}(1 + \cos 2\alpha) \\ \sigma_\theta^1 = \frac{\sigma_x}{2}(1 - \cos 2\alpha) \\ \tau_{r\theta}^1 = -\frac{\sigma_x}{2}\sin 2\alpha \end{cases} \quad (1)$$

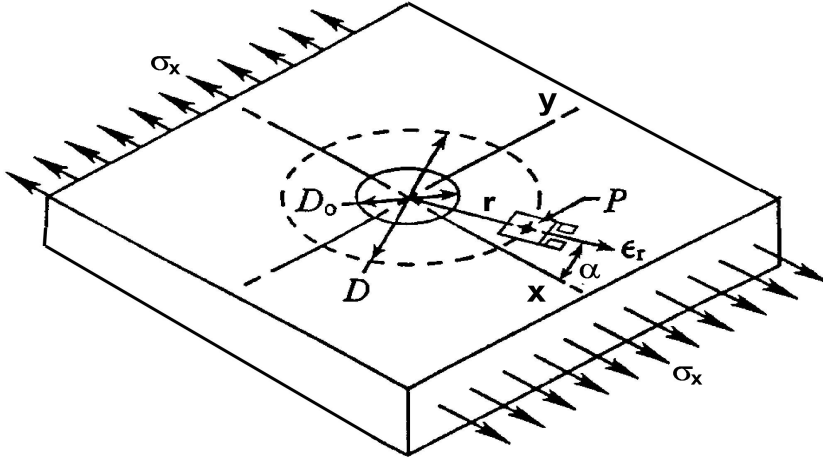


Figura 1.2- Estado de tensão num ponto de uma placa fina sujeita a uma tensão residual uniaxial.

Fazendo um pequeno furo no centro da placa, as tensões na vizinhança do furo deverão ser diferentes dado que na sua superfície se terá: $\tau_{r\theta} = \sigma_r = 0$. A solução encontrada por Kirsch [10] para este caso foi [11]:

$$\begin{aligned} \sigma_r^2 &= \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{1}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{r^4} - \frac{4}{r^2}\right) \cos 2\alpha \\ \sigma_\theta^2 &= \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{1}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{r^4}\right) \cos 2\alpha \quad \text{onde} \quad r = \frac{R}{R_0} \quad \text{com} \quad R \geq R_0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta}^2 = -\frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{3}{r^4} + \frac{2}{r^2}\right) \sin 2\alpha$$

A diferença entre os estados inicial e final resulta em:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_r &= \sigma_r^2 - \sigma_r^1 \\ \Delta\sigma_\theta &= \sigma_\theta^2 - \sigma_\theta^1 \\ \Delta\tau_{r\theta} &= \tau_{r\theta}^2 - \tau_{r\theta}^1 \end{aligned} \quad (3)$$

Se o material é considerado isotrópico homogéneo e não sofre deformação plástica na vizinhança do furo, a lei de Hooke permite escrever para a relaxação de deformação em torno do furo:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha + \frac{4}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \\ \varepsilon_\theta = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha - \frac{4}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \end{cases} \quad (4)$$

A equação anterior pode ser escrita na seguinte forma simples, traduzindo a equação fundamental do método do furo para estados uniaxiais de tensão (equações semelhantes podem ser defuzidas para o caso de estados biaxiais usando o princípio da sobreposição):

$$\varepsilon_r = \sigma_x [A + B \cos 2\alpha] \quad (5)$$

$$\varepsilon_\theta = \sigma_x [-A + C \cos 2\alpha]$$

onde:

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{1}{r^2} \right)$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \left[\left(\frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right] \quad (6)$$

$$C = -\frac{1+\nu}{2E} \left[-\left(\frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \right]$$

São designadas na técnica por constantes de calibração. Embora possam ser determinadas de forma analítica no caso de furos passantes, tal como a situação apresentada, o cálculo torna-se impossível se o furo for cego. A técnica do furo, neste caso, considera que a equação (5) continua válida, embora os valores de A , B e C variem. Para a sua determinação é necessário efectuar uma calibração experimental ou numérica.

Verifica-se que as deformações relaxadas ε_r e ε_θ diminuem à medida que a sua distância ao furo aumenta. Assim, é desejável medir as deformações o mais próximo possível do furo, de forma a maximizar o sinal de saída dos extensómetros. Contudo, os

efeitos parasitas também aumentam na vizinhança do mesmo. Estas considerações, na prática, implicam que se encontre um compromisso na selecção do raio óptimo R para a colocação dos extensómetros. Resultados experimentais indicam valores ideais para r [4] e [12]:

$$2.22 < r < 3.33 \quad (7)$$

A norma ASTM E 837-08 [4] recomenda que a razão entre o diâmetro do furo e o diâmetro do círculo da roseta de extensómetros esteja compreendido entre 0.3 e 0.5, normalizando as dimensões das rosetas e as gamas de diâmetros a utilizar.

De notar que quando $\alpha = 0^\circ$ (direcção da tensão principal), $\varepsilon_r \gg \varepsilon_\theta$ na região preferencial de medição. Assim, os extensómetros de roseta para medição de tensões residuais são projectados com grelhas orientadas na direcção radial de modo a medir a deformação relaxada ε_r , segundo três direcções diferentes. Também convém referir que a deformação ao longo do eixo da tensão principal máxima é oposta em sinal à tensão residual inicial. ($\varepsilon_r < 0$ quando $\sigma_1 > 0$), pois A e B são sempre negativos e para $\alpha = 0^\circ$ tem-se $\cos 2\alpha = 1$. A recente revisão da norma ASTM E837-08 [4] introduziu um novo tipo de roseta (tipo C) de forma a medir igualmente as deformações tangenciais e maximizar o sinal dos extensómetros, aumentando a sensibilidade do método.

1.5.2 - SOLUÇÃO PARA MATERIAIS ORTOTRÓPICOS

Para uma aplicação correcta desta técnica aos sistemas compósitos é necessária a optimização dos parâmetros experimentais. O número de incrementos por camada bem como o ordenamento das camadas, influenciam os resultados medidos [13]. Apenas um incremento por camada torna o valor medido muito significativo, e pode levar a sobre estimar o valor da tensão. Um dos efeitos que pode provocar a sobrestimação é o maior tempo de contacto da ferramenta de corte com o material, aumentando a possibilidade de aparecimento de fendas microscópicas, que levam a um relaxamento parasita, que é sobreposto ao alívio da tensão. Pelo contrário, se aumentarmos o número de incrementos por camada, aumentamos a sensibilidade do método ao longo da profundidade, podendo analisar melhor o perfil das tensões dentro de cada camada. O

aumento do número de incrementos não pode ser excessivo para não aumentar significativamente a propagação de erro durante o cálculo das tensões. No método integral o erro é proporcional ao número de incrementos [9].

Como vimos a posição relativa dos extensómetros, comparada com o diâmetro do furo, influencia a sensibilidade da técnica. Além disso, nos materiais ortotrópicos a orientação da roseta de extensómetros influencia as medidas, ao contrário do que se passa no caso isotrópico.

Neste trabalho estudamos a aplicabilidade da técnica do furo incremental na determinação de tensões residuais em materiais compósitos de matriz polimérica, nomeadamente nos compósitos laminados. O método de cálculo proposto para a aplicação da técnica do furo incremental a compósitos ortotrópicos, foi baseado nos trabalhos [14] e [15] na determinação de tensões residuais em laminados simétricos.

Partimos das seguintes assumções:

- O material é ortotrópico e elástico de comportamento linear.
- As componentes das tensões em planos perpendiculares à superfície são muito reduzidas.
- As deformações na superfície têm que ser medidas em pelo menos 3 direcções radiais.

O método leva em conta a redistribuição das tensões provocado por cada incremento de profundidade. O cálculo das tensões baseia-se directamente na equação fundamental da solução de Kirsch, anteriormente demonstrada (5), adaptada para ter em consideração a ortotropia do material, num estado biaxial de tensões. O cálculo é efectuado através de uma série de equações e de constantes de calibração, baseadas relacionando as deformações na superfície em torno do furo com a tensão residual em cada camada do compósito. Considerando que ε_{in} representa a contribuição da camada i na deformação total medida no incremento n ; σ_{1i} e σ_{2i} são as tensões residuais principais na camada i ; θ_i é o ângulo entre o extensómetro de referência e a primeira direcção principal das tensões residuais; A_{in} , B_{in} e C_{in} são as constantes de calibração para o incremento n ,

carregado na camada i , as deformações radiais na superfície, que correspondem as tensões principais, podem ser expressas por:

$$\varepsilon_{in}(\theta_i) = A_{in}(\sigma_{1i} + \sigma_{2i}) + (\sigma_{1i} - \sigma_{2i})(B_{in} \cos 2\theta_i + C_{in} \sin 2\theta_i) \quad (8)$$

Como neste método usamos uma roseta de três extensômetros, as deformações medidas nas três direções são usadas para determinar as três incógnitas σ_{1i} , σ_{2i} e θ_i para cada incremento.

A deformação obtida nas três direções correspondentes às direções dos três extensômetros vem:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{nn}^1(\theta_n) &= A_{nn}(\sigma_{1n} + \sigma_{2n}) + (\sigma_{1n} - \sigma_{2n})(B_{nn} \cos 2\theta_n + C_{nn} \sin 2\theta_n) \\ \varepsilon_{nn}^2(\theta_n) &= A_{nn}(\sigma_{1n} + \sigma_{2n}) + (\sigma_{1n} - \sigma_{2n})(B_{nn} \cos 2(\theta_n + \alpha) + C_{nn} \sin 2(\theta_n + \alpha)) \\ \varepsilon_{nn}^3(\theta_n) &= A_{nn}(\sigma_{1n} + \sigma_{2n}) + (\sigma_{1n} - \sigma_{2n})(B_{nn} \cos 2(\theta_n + \beta) + C_{nn} \sin 2(\theta_n + \beta)) \end{aligned} \quad (9)$$

Sendo α e β os ângulos da segunda e terceira medições.

Após o primeiro incremento, a variação na geometria do furo também deve ser tomada em conta. Cada camada removida vai influenciar a deformação total medida na superfície, então a deformação medida na superfície devido a apenas à última camada removida pode ser expressa por:

$$\varepsilon_{nn}^1 = \varepsilon_{mn}^1 - \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{in}^1 \quad (10)$$

$$\varepsilon_{nn}^2 = \varepsilon_{mn}^2 - \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{in}^2 \quad (11)$$

$$\varepsilon_{nn}^3 = \varepsilon_{mn}^3 - \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{in}^3 \quad (12)$$

Onde ε_{in}^j é a contribuição na camada i , na direção j ($j= 1,2,3$) no caso do incremento n e ε_{mn}^j é a deformação total medida na superfície pelo extensômetro na direção j .

Para simplificar a notação, considera-se $\varepsilon_{nn}^j = \varepsilon_n^j$.

Desenvolvendo para um caso, por exemplo, com três incrementos para o extensômetro 1 vem:

$$\varepsilon_3^1 = \varepsilon_{m3}^1 - \left[(A_{13}(\sigma_{11} + \sigma_{21}) + (\sigma_{11} - \sigma_{21})(B_{13} \cos 2\theta_1 + C_{13} \sin 2\theta_1)) + (A_{23}(\sigma_{12} + \sigma_{22}) + (\sigma_{12} - \sigma_{22})(B_{23} \cos 2\theta_2 + C_{23} \sin 2\theta_2)) \right] \quad (13)$$

Neste método considera-se que para cada incremento do furo a deformação total medida na superfície se pode dividir em duas componentes:

- Uma primeira devida às tensões residuais na camada removida.
- Uma segunda devida à contribuição da redistribuição das tensões residuais causada pela variação na geometria do furo.

Invertendo o sistema e tendo em conta as rosetas usadas, temos:

$$\begin{cases} \sigma_{1n} = \frac{\varepsilon_n^1(A_{in} + B_{in} \sin 2\theta_i - C_{in} \cos 2\theta_i) - \varepsilon_n^2(A_{in} - B_{in} \cos 2\theta_i - C_{in} \sin 2\theta_i)}{2A_{in}B_{in}(\sin 2\theta_i + \cos 2\theta_i) + 2A_{in}C_{in}(\sin 2\theta_i - \cos 2\theta_i)} \\ \sigma_{2n} = \frac{-\varepsilon_n^1(A_{in} - B_{in} \sin 2\theta_i + C_{in} \cos 2\theta_i) + \varepsilon_n^2(A_{in} + B_{in} \cos 2\theta_i + C_{in} \sin 2\theta_i)}{2A_{in}B_{in}(\sin 2\theta_i + \cos 2\theta_i) + 2A_{in}C_{in}(\sin 2\theta_i - \cos 2\theta_i)} \end{cases} \quad (14)$$

$$\theta_n = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2C_{in}(\varepsilon_n^3 - \varepsilon_n^2) - B_{in}(-2\varepsilon_n^1 + \varepsilon_n^2 + \varepsilon_n^3)}{C_{in}(-2\varepsilon_n^1 + \varepsilon_n^2 + \varepsilon_n^3) + B_{in}(\varepsilon_n^3 - \varepsilon_n^2)} \right] \quad (15)$$

1.5.3 - CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO

A determinação das constantes de calibração A_{in} , B_{in} e C_{in} é de importância crucial para o cálculo das tensões residuais a partir das deformações medidas. O seu significado físico é o seguinte: são as constantes de calibração para um furo de profundidade i , em que o incremento n possui uma determinada tensão residual, ilustrado na figura 1.3.

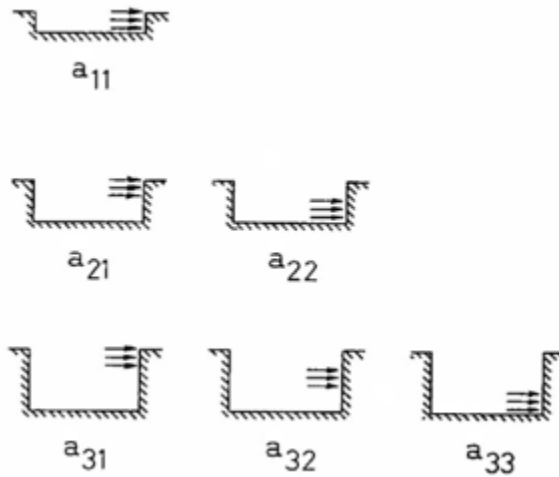


Figura 1.3- Representação do significado físico das constantes A_{in} .

Estas constantes só podem ser determinadas por via numérica, visto experimentalmente ser impossível aplicar uma tensão uniforme em apenas um incremento de profundidade do furo e, por outro lado, conhecendo as propriedades ortotrópicas do material, é possível desenvolver um modelo de elementos finitos que permita determiná-las. Neste trabalho, desenvolvemos esse modelo usando o código ANSYS 11.0.

As constantes de calibração são obtidas no modelo numérico da seguinte forma [16]:

$$\begin{cases} A_{in} = A_{in}^1 - A_{(i-1)n}^1 \\ B_{in} = B_{in}^1 - B_{(i-1)n}^1 \\ C_{in} = C_{in}^1 - C_{(i-1)n}^1 \end{cases} \quad (16)$$

Cujo significado está ilustrado na figura seguinte:

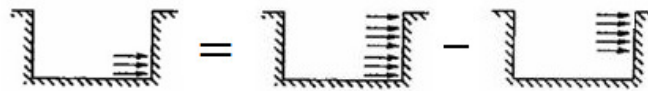


Figura 1.4- Esquema da obtenção das constantes de calibração.

O princípio básico da calibração numérica consiste em criar um modelo em elementos finitos, aplicar uma tensão bem definida e calcular as constantes de calibração relacionando as deformações de relaxação com a tensão imposta. Calculando-se as constantes de calibração pelas seguintes equações:

$$A_{in} = \frac{u_{in}(r_2, 0) - u_{in}(r_1, 0)}{2\sigma(r_2 - r_1)} \quad (17)$$

$$B_{in} = \frac{u_{in}\left(r_2, \frac{\pi}{2}\right) - u_{in}\left(r_1, \frac{\pi}{2}\right)}{2\sigma(r_2 - r_1)} \quad (18)$$

$$C_{in} = \frac{u_{in}\left(r_2, \frac{\pi}{4}\right) - u_{in}\left(r_1, \frac{\pi}{4}\right)}{2\sigma(r_2 - r_1)} \quad (19)$$

As constantes de calibração são dependentes da geometria do furo, do tipo de roseta de extensómetros e da posição relativa da camada i , pelo que, a simulação numérica foi criada para de forma automática se adaptar a cada tipo de provete em análise (3 tipos), bastando apenas que o utilizador introduza os dados iniciais.

CAPÍTULO 2

MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 - MATERIAIS USADOS

No presente trabalho, estudámos três materiais, com as propriedades mecânicas conhecidas.

O primeiro era um compósito termoplástico de carbono. A matriz era PPS, que designamos por M1, uma resina termoplástica, com temperatura de transição vítrea de 90°C e temperatura de fusão de 320°C. Era constituído pela repetição de uma unidade celular de fibras de carbono. Estes provetes eram feitos com oito camadas, todos com a mesma direcção.

O processo de produção é de moldagem por compressão, com o material a ser comprimido à pressão de 10 bar e à temperatura de 320°C. Seguidamente o molde é arrefecido num ciclo controlado de temperatura.

O segundo era um provete transparente, de matriz epóxida e fibra de vidro unidireccional, que designamos por M2. Era constituído por oito camadas com uma configuração de $[+45^\circ/-45^\circ]_{2s}$, o que significa que tinha duas camadas a $+45^\circ$ e outras duas a -45° alternadamente.

Fibra de vidro unidireccional é uma fibra em que a resistência na direcção ao longo do comprimento é muito maior do que na direcção transversal.

A fibra de vidro usada foi uma unidireccional Roviglas R17/475 e a matriz era Araldite LY 556. O reforço feito na direcção E_{11} foi de 475g/m^2 e na direcção E_{22} foi de 17g/m^2 .

Este provete foi produzido por moldagem de transferência de resina assistida a vácuo. A resina líquida é injectada sob vácuo à temperatura ambiente, depois o molde é colocado no forno a 120°C durante 4 horas, seguindo-se o arrefecimento à temperatura ambiente.

O terceiro era um provete preto pré-impregnado de carbono epóxico, que designamos por M3. Sendo constituído por vinte camadas com uma sequência $[0^\circ/90^\circ]_{5s}$.

O processo de fabrico deste compósito é uma cura na autoclave a 180°C . O pré-impregnado é M18/M55J da Hexcel.

As propriedades elásticas dos materiais M1 e M2 estão indicadas nas tabelas 2.1 e 2.2 respectivamente:

E_{11} [GPa]	E_{22} [GPa]	E_{33} [GPa]	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	G_{13} [MPa]	G_{23} [MPa]
57.24	57.24	9.7	0.04	0.38	0.38	4142	2904	2902

Tabela 2.1- Propriedades elásticas do material M1.

E_{11} [GPa]	E_{22} [GPa]	ν_{12}	G_{12} [GPa]
38.9	13.3	0.25	5.13

Tabela 2.2- Propriedades elásticas do material M2.

2.2 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para a realização de ensaios com o método do furo incremental, o primeiro passo é seleccionar correctamente as rosetas de extensómetros a usar. No nosso caso foram usadas rosetas de três elementos EA-XX-062RE-120, do tipo A de tamanho normal, com uma resistência no extensómetro de 120Ω .



Figura 2.1- Roseta normalizada na norma ASTM E 837-08[4].

Para a instalação das rosetas é necessária uma preparação cuidada da superfície, pois vai influenciar a qualidade da adesão, que por sua vez afecta a qualidade das medições. As deformações a serem medidas são muito pequenas, então qualquer pequeno erro introduzido na medição tem grande influência nos resultados, razão pela qual o operador deve seguir todas as regras de trabalho em laboratório.

A preparação da superfície é feita por várias etapas. Passa-se um desengordurante em spray no provete, e limpa-se com um algodão. Repete-se com um algodão novo até o algodão sair branco. Seguidamente ataca-se a superfície com um ácido seguido de uma base. A cada passagem do ácido e da base é necessário limpar com algodão. Cada passagem do algodão deve ser feita sempre no mesmo sentido e com um algodão novo.

Após limpar a superfície, cola-se a roseta com uma cola M-Bond 200 Adhesive Kit, Vishay, Inc. A partir deste momento, podem-se soldar os fios dos cabos para a ligação ao sistema de aquisição de dados.

O furo é realizado utilizando um equipamento elevada velocidade de rotação, RS 200, Vishay, Inc.[17], que consiste numa broca de alta precisão em conjunto com um suporte que serve de guia. A broca usada é em forma de cone invertido e tem um diâmetro de $1,6mm$ e uma velocidade de rotação aproximada de $300.000rpm$.

Adoptámos incrementos iguais à menor resolução do guia de suporte, de valor igual a $0.025mm$, até à totalidade da profundidade do furo, fazendo depois um tratamento dos dados, seleccionando para o ficheiro Excel apenas os valores correspondentes ao número de incrementos por camada pretendidos.



Figura 2.2- Equipamento de furo RS 200.

O suporte da broca permite o nivelamento em altura, bem como o alinhamento com o centro da roseta através de 4 parafusos X-Y. Este alinhamento é feito com ajuda de um microscópio que permite alinhamentos até 0.038 mm . O microscópio é usado também para medir o diâmetro do furo resultante. O diâmetro usual do furo resultante foi de

As deformações na superfície são medidas usando um sistema multicanal digital universal, Spider 8-30, HBM, onde os extensômetros estão ligados independentemente a uma ponte de Wheatstone, numa ligação de três fios em quarto de ponte.



Figura 2.3- Sistema de medida multicanal digital universal Spider 8-30.

O sistema de medidas é ligado ao computador por um cabo RS-232. O software usado para aquisição de dados foi o Catman Express, HBM. Programa que nos permite obter dados ponto a ponto, sendo o utilizador a definir o número de incrementos, ou para processos rápidos fazer uma captura de dados constante e gravar num ficheiro Excel.

De seguida é necessário tratar os dados obtidos, ou seja, converter as deformações medidas em tensões. Para o efeito usámos um software criado no Grupo de Tensões Residuais, o qual foi modificado no âmbito do nosso trabalho e será falado em mais pormenor durante este relatório.

CAPÍTULO 3

MÉTODO DE CÁLCULO DAS TENSÕES RESIDUAIS

3.1 - MÉTODO DE CÁLCULO

No nosso trabalho baseámo-nos nos trabalhos [13], [14] e na equação (8), que representa a distribuição das deformações radiais em torno de um furo para uma posição angular θ arbitrária.

As rosetas usadas neste trabalho estão ilustradas na figura seguinte. Considerámos, na dedução das equações, a direcção do extensómetro 1 como direcção de referência, tal como se mostra na figura 3.1. O eixo dos XX coincide então com a direcção deste extensómetro, considerando também que as direcções dos extensómetros 2 e 3 se encontram, respectivamente, a $\alpha = 45^\circ$ e $\beta = 90^\circ$, no sentido horário.

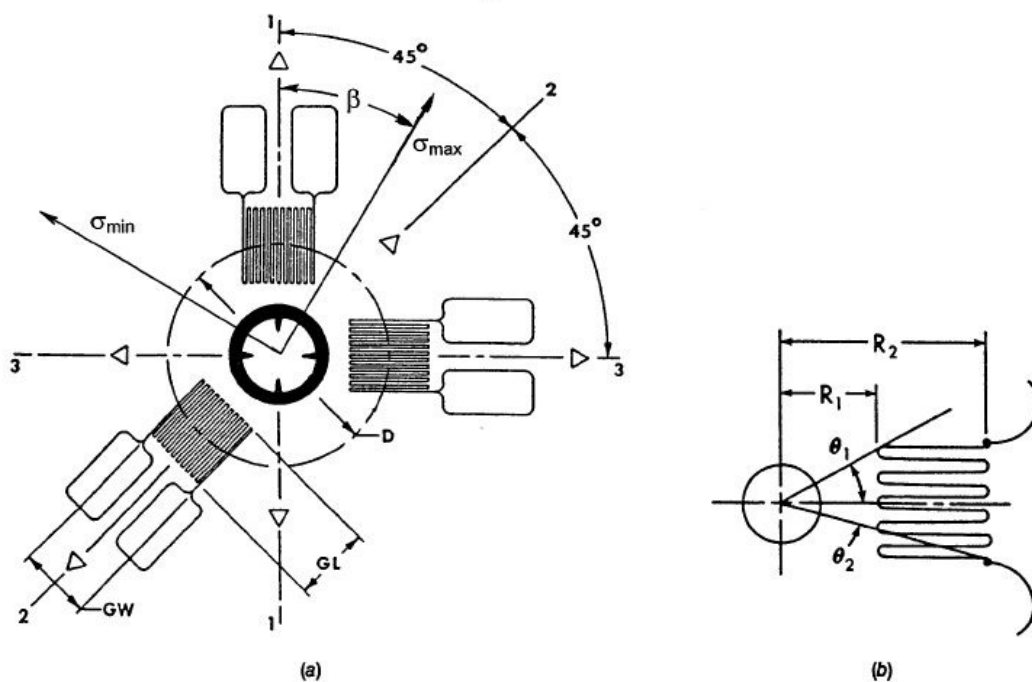


Figura 3.1- Representação da roseta EA-XX-062RE-120 tipo A.

Com base na equação (8), teremos:

$$\begin{cases} \varepsilon_{nn}^1(\theta_n) = A_{nn}(\sigma_{1n} + \sigma_{2n}) + (\sigma_{1n} - \sigma_{2n})(B_{nn} \cos 2\theta_n + C_{nn} \sin 2\theta_n) \\ \varepsilon_{nn}^2(\theta_n) = A_{nn}(\sigma_{1n} + \sigma_{2n}) + (\sigma_{1n} - \sigma_{2n})(B_{nn} \cos 2(\theta_n + 45^\circ) + C_{nn} \sin 2(\theta_n + 45^\circ)) \\ \varepsilon_{nn}^3(\theta_n) = A_{nn}(\sigma_{1n} + \sigma_{2n}) + (\sigma_{1n} - \sigma_{2n})(B_{nn} \cos 2(\theta_n + 90^\circ) + C_{nn} \sin 2(\theta_n + 90^\circ)) \end{cases} \quad (20)$$

Invertendo o sistema conseguimos determinar as tensões principais, σ_1 e σ_2 , e o ângulo entre o extensómetro de referência e a primeira direcção principal das tensões residuais θ , que são diferentes das recolhidas na bibliografia:

$$\begin{cases} \sigma_{1n} = \frac{\varepsilon_n^1 + \varepsilon_n^3}{4A_{in}} + \frac{\varepsilon_n^1 - \varepsilon_n^3}{4(B_{in} \cos 2\theta_i + C_{in} \sin 2\theta_i)} \\ \sigma_{2n} = \frac{\varepsilon_n^1 + \varepsilon_n^3}{4A_{in}} - \frac{\varepsilon_n^1 - \varepsilon_n^3}{4(B_{in} \cos 2\theta_i + C_{in} \sin 2\theta_i)} \end{cases} \quad (21)$$

$$\tan 2\theta_n = \frac{C_{in}(\varepsilon_n^1 - \varepsilon_n^3) - B_{in}(2\varepsilon_n^2 - \varepsilon_n^1 - \varepsilon_n^3)}{C_{in}(2\varepsilon_n^2 - \varepsilon_n^1 - \varepsilon_n^3) + B_{in}(\varepsilon_n^1 - \varepsilon_n^3)} \quad (22)$$

Onde o significado de ε_{in}^j é dado nas equações (10), (11) e (12).

3.2 - DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO

As constantes A_{in} podem ser determinadas partindo da equação (20), considerando aplicado um campo de tensão residual equi-biaxial, equivalente a uma pressão uniforme P , a actuar na superfície interior do furo, ou seja, $\sigma_{1i} = \sigma_{2i} = \sigma$ e $\sigma_{3i} = \sigma_{12i} = 0$.

Assim virá:

$$A_{in} = \frac{\varepsilon_{in}}{2\sigma} \quad (23)$$

No modelo de elementos finitos desenvolvido, considerando uma tensão equi-biaxial unitária, os valores de A_{in} são obtidos a partir da deformação, medida na grelha do extensómetro, na direcção X, $\theta_i = 0^\circ$.

Para a determinação das constantes B_{in} e C_{in} , considera-se um campo de tensão residual de corte puro, $\sigma_{1i} = -\sigma_{2i} = \sigma$ e $\sigma_{3i} = \sigma_{12i} = 0$, de forma a eliminar a

constante A da equação (20). As constantes B_{in} e C_{in} são calculadas, respectivamente, na direcção vertical, segundo Y, $\theta_i = 90^\circ$ e na direcção $\theta_i = 45^\circ$. Segundo estas direcções obtém-se para B_{in} e C_{in} :

$$B_{in} = \frac{\varepsilon_{in}}{2\sigma} \quad (24)$$

$$C_{in} = \frac{\varepsilon_{in}}{2\sigma} \quad (25)$$

Como na prática a leitura das deformações pelo extensómetro ocorre numa área finita, e não num ponto, é necessário fazer uma integração das deformações que ocorrem na área da grelha do extensómetro.

A grelha do extensómetro foi dividida em finitas áreas, de acordo com a figura.

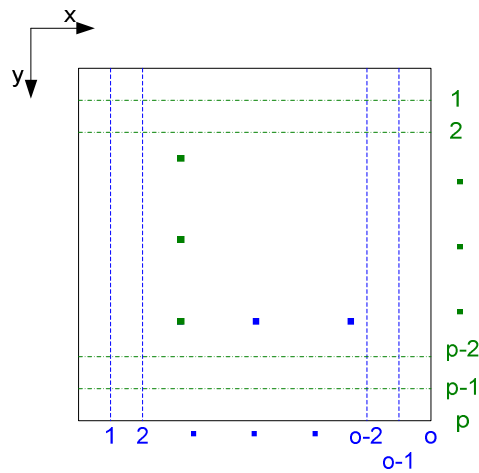


Figura 3.2- Esquema da divisão das grelhas dos extensómetros.

Calcularam-se as deformações no centro de cada área finita. Foi feita a integração das componentes das deformações que efectivamente contribuem para o sinal dos extensómetros através da seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{1}{A} \int_A \varepsilon_x dA \approx \frac{1}{A} \sum_{i=1}^o \sum_{j=1}^p \varepsilon_{x(i,j)} \Delta A = \frac{1}{o \cdot p} \sum_{i=1}^o \sum_{j=1}^p \varepsilon_{x(i,j)} \quad (26)$$

Onde A é a área da grelha e $\varepsilon_{x(i,j)}$ é a soma das componentes tangenciais e radiais da deformação segundo a direcção x, na área finita i, j.

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1 - DEFINIÇÃO DO MODELO, SIMETRIAS E CONDIÇÕES FRONTEIRA

A modelação numérica por elementos finitos para o cálculo das constantes de calibração foi realizada com o auxílio do código ANSYS 11.0.

De notar que as constantes de calibração usadas no método de cálculo das tensões residuais proposto, dependem sempre do tipo de sistema compósito em análise, nomeadamente das propriedades elásticas camadas e da sua orientação face à orientação do provete e da roseta de extensómetros usados, devido à ortotropia das suas propriedades mecânicas. Assim, cada sistema compósito e a orientação escolhida para as rosetas de extensómetros obriga a que a modelação numérica seja feita caso a caso. De modo a automatizar o mais possível a modelação numérica, foram criadas macros que, permitindo alguma interactividade com o utilizador, facilitam o cálculo para sistemas compósitos diversificados.

Foram criadas três macros para as três fases principais do método de elementos finitos, que se encontram em anexo:

- Uma para o pré-processamento, onde se define a geometria do modelo, as constantes elásticas do material, o tipo de elemento a usar, as opções de malhagem, as simetrias e as condições fronteira.
- Outra para a solução, onde se fazem de forma progressiva os incrementos do furo e se aplica o carregamento desejado.

- Por fim, uma última macro para o pós-processamento, onde é feita a leitura das deformações elásticas na zona dos extensómetros e são calculadas as constantes de calibração, sendo estas guardadas num ficheiro de texto externo, em formato de matriz triangular inferior. Este ficheiro será posteriormente lido durante a execução do software desenvolvido para o cálculo das tensões residuais.

No pré-processamento, é pedido ao utilizador para indicar o valor da espessura do provete, o número de camadas, o número de incrementos por camada e o raio do furo. As constantes A_{in} , B_{in} e C_{in} dependem das constantes elásticas do material. Assim são também pedidas para indicar as constantes elásticas do material nas diferentes direcções bem como os coeficientes de Poisson.

O modelo de elementos finitos foi construído partindo de um modelo sólido tridimensional usando o elemento SOLID185, sólido estrutural 3-D de 8 nós. Este elemento foi também seleccionado por permitir a funcionalidade do ANSYS “*death and birth*” de elementos do modelo [18]. Esta funcionalidade foi usada de forma a simular os incrementos de profundidade do furo.

Devido às simetrias foi somente considerado um quarto do furo, tendo o modelo sólido um raio máximo igual a 5 vezes o raio médio da roseta, distância considerada suficiente para evitar efeitos de bordo.

Era pedido ao utilizador que escolhesse o tipo de roseta usada, permitindo a localização automática da zona dos extensómetros.

A malhagem foi feita de modo a estar bastante refinada na zona limite do furo, ter uma malhagem refinada e constante na zona dos extensómetros, para facilitar leitura dos valores das deformações, e no resto do corpo uma zona com uma malhagem mais grosseira, aumentando o tamanho da malha de forma progressiva. Consideraram-se as simetrias em relação ao plano XZ e ao plano YZ, sendo o eixo dos ZZ o eixo de rotação.

Deve ressaltar-se que foi usada a versão universitária do software, pelo que a malhagem ficou limitada a 32000 elementos, limitando o grau de refinamento da mesma.

Os constrangimentos do modelo consistiram em limitar o grau de liberdade UZ na base do modelo, UX no plano YZ e UY no plano XZ. Estes dois últimos constrangimentos são automaticamente impostos devido às simetrias impostas.

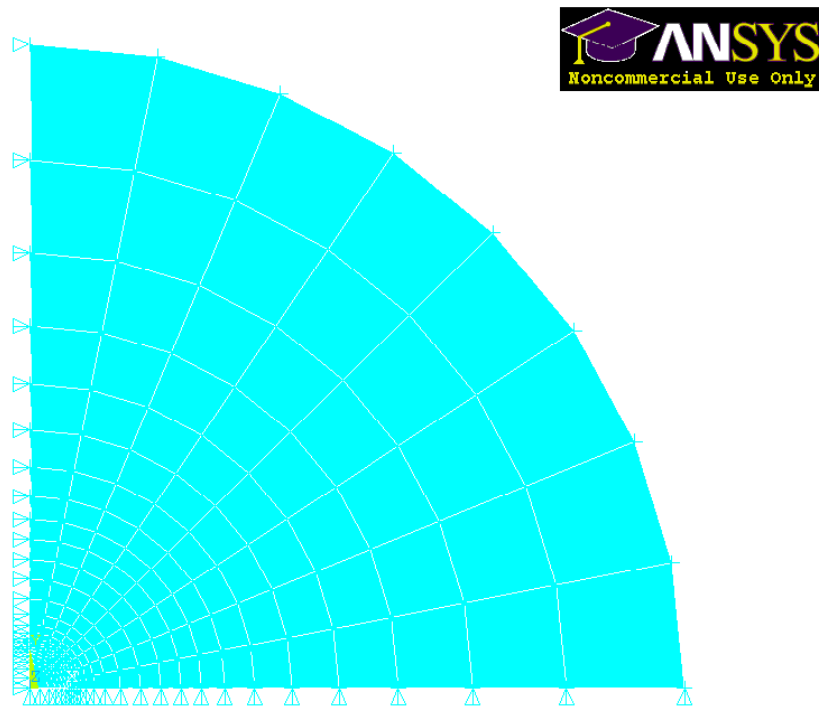


Figura 4.1- Malhagem e condições fronteira.

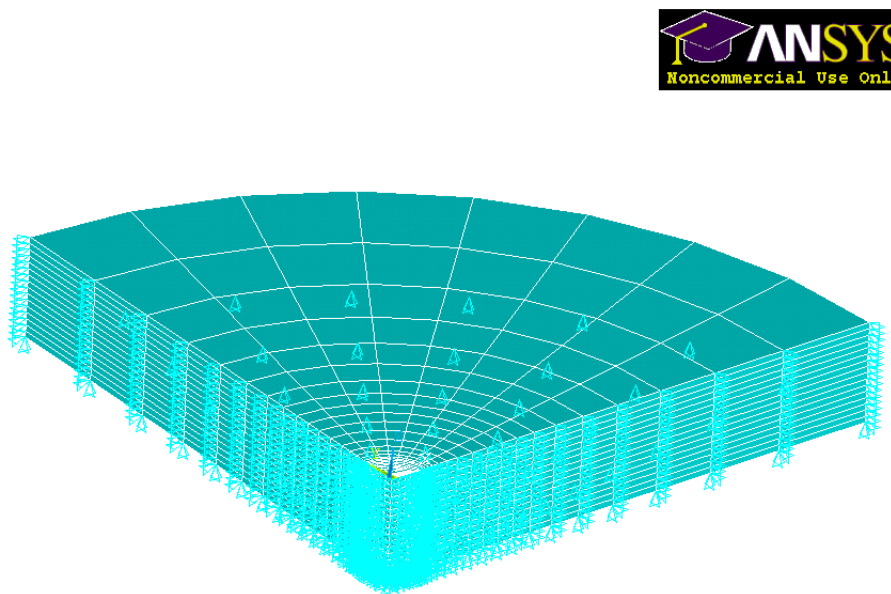


Figura 4.2- Malhagem e condições fronteira: vista isométrica.

4.2 - PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Na solução, usámos a opção “*death e birth*” do ANSYS para criar o furo e fazer o carregamento.

Para as constantes A_{in} o carregamento aplicado foi de uma pressão unitária (1MPa) normal à parede do furo e para as constantes B_{in} e C_{in} foi criado um campo de tensão de corte puro, variando a pressão segundo a equação, $P = P_0 \cos 2\theta$, sendo $P_0 = 1MPa$.

O furo foi feito incrementalmente, e a cada nova profundidade, fazia-se um carregamento progressivo, incremento a incremento, desde o primeiro incremento até ao que tinha sido furado. A cada carregamento, esquematizado na figura 4.3, era pedido a solução.

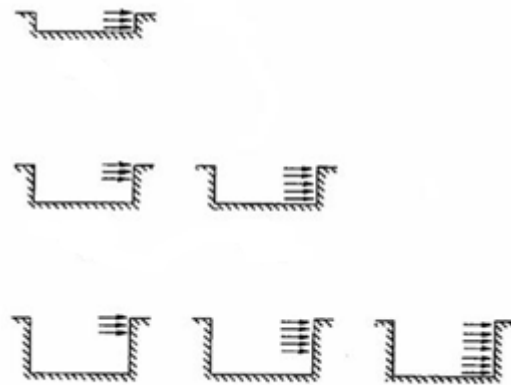


Figura 4.3- Representação esquemática do carregamento na calibração numérica.

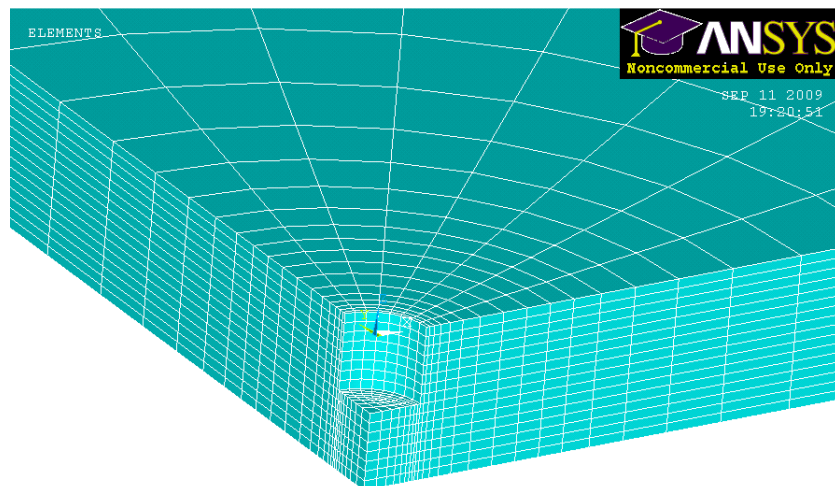


Figura 4.4- Representação do processo do furo: vista isométrica.

1

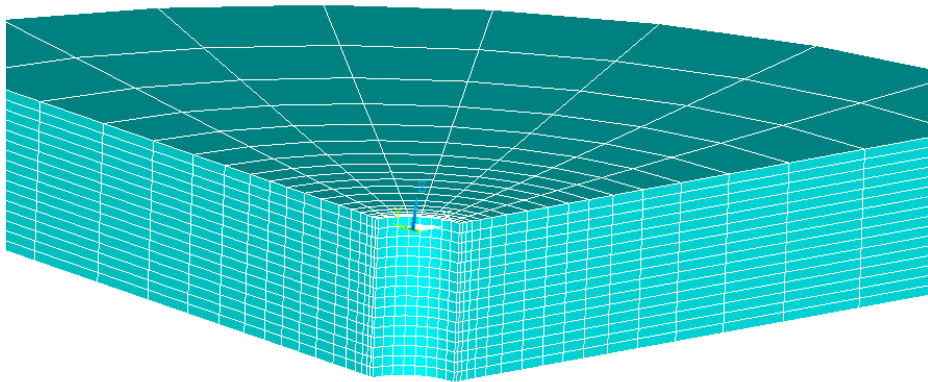
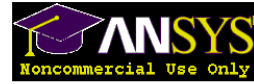


Figura 4.5- Representação final do furo: vista isométrica.

1

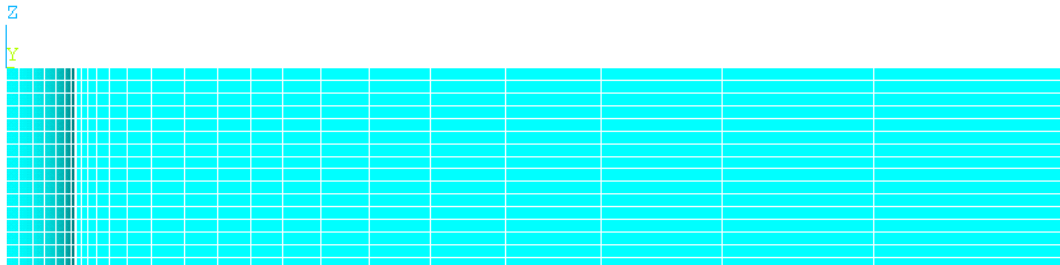


Figura 4.6- Representação final do furo: vista lateral.

4.3 - LEITURA DE RESULTADOS

Para cálculo das constantes de calibração foi necessário proceder à leitura das deformações na zona dos extensómetros.

Leram-se os valores das deformações na posição angular de $\theta = 45^\circ$ do nó interior até ao nó exterior na zona do extensómetro, respectivamente na direcção segundo X,

segundo Y e na direcção radial, para as constantes A_{in} , B_{in} e C_{in} . Seguidamente fez-se o cálculo das constantes através das equações (23), (24) e (25).

Com os valores medidos das deformações, para cada carregamento criou-se uma matriz triangular inferior.

Seguidamente foi necessário aplicar as subtracções indicadas na equação (16), para atingir o significado físico das constantes de calibração.

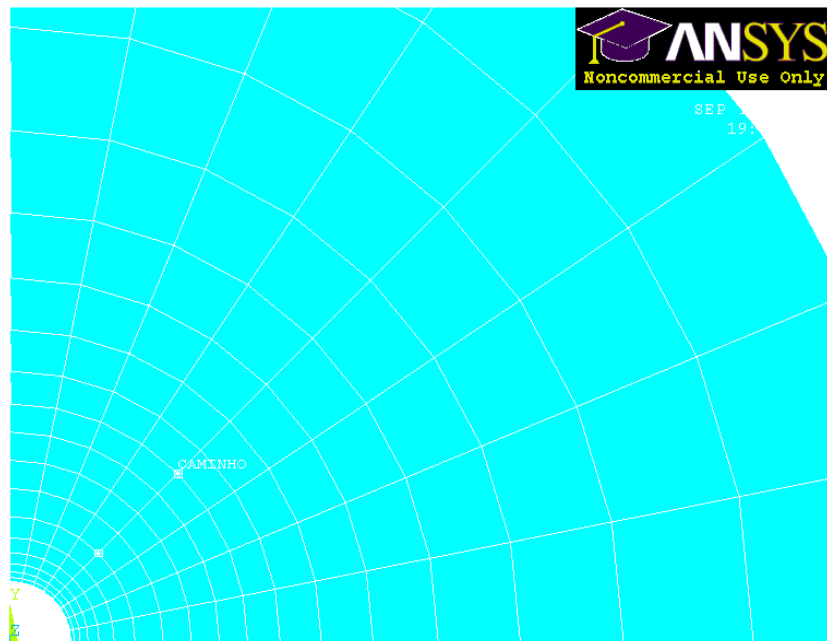


Figura 4.7- Caminho para leitura de valores para a constante A_{in} .

A matriz obtida no final é escrita num ficheiro externo, que é transformado num ficheiro Excel, para ser usado como matriz de calibração no software de cálculo de tensões residuais do GTR. Foi objectivo deste trabalho desenvolver este software para introduzir um método de cálculo de tensões residuais em materiais ortotrópicos.

CAPÍTULO 5

DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE GTR

5.1 - APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE

O software desenvolvido pelo Grupo de Tensões Residuais da Universidade de Coimbra, de nome “GTR – Residual Stress Group Software”, é uma boa ferramenta para ser usada em aplicações de estudo ou trabalho de investigação de medição de tensões residuais com a técnica do furo incremental. Tem uma interface intuitiva e fácil de usar e foi desenvolvido para trabalhar na plataforma Windows e ser uma ferramenta para o Microsoft Office. Usa duas ferramentas do Microsoft Office, MS Access base de dados e MS Excel folha de cálculo. A linguagem de programação usada é o Visual Basic.Net [19].

Foi criado inicialmente para fazer o cálculo de tensões residuais em materiais isotrópicos. Neste caso o software permite determinar as tensões residuais usando os quatro principais procedimentos de avaliação clássicos, avaliação de tensões uniformes em profundidade (ASTM), método da tensão média (ASM), método de séries de potências (PSM) e o método integral (IM) e avaliar o critério do efeito de deformação plástica. Em todos eles se pressupõe um comportamento linear elástico e isotrópico.

5.2 - MODIFICAÇÃO DO SOFTWARE

No nosso trabalho foi necessário fazer modificações para conseguir fazer o cálculo para materiais ortotrópicos. Acrescentámos para o efeito o módulo “Orthotropic Materials”.



Figura 5.1- Interface gráfica do software – escolha da opção para materiais ortotrópicos.

Ao seleccionar a opção para o cálculo de tensões residuais em materiais ortotrópicos, aparece esta caixa de aviso a indicar todos os passos necessários.

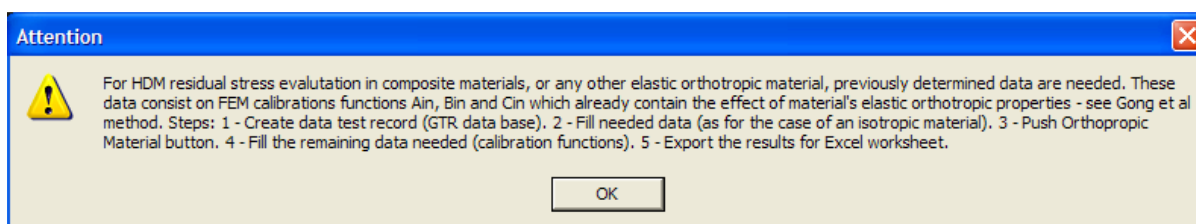


Figura 5.2 – Caixa de aviso para o caso de análise ortotrópica.

Tanto no caso de materiais isotrópicos como ortotrópicos é possível criar uma livraria de resultados experimentais, usando uma base de dados, onde estão gravados os dados de cada experiência realizada.

Na aquisição de dados, feita automaticamente a partir de um ficheiro Excel guardado na base de dados, é criada automaticamente uma tabela e um gráfico deformação – profundidade. No caso de haver grande dispersão de dados, é possível usar “splines”

para suavização das curvas de deformação - profundidade obtidas durante a aplicação da técnica do furo. A suavização permite diminuir a dispersão final nos resultados do cálculo das tensões residuais.

Escolhendo o método de cálculo para materiais ortotrópicos, é chamada uma nova janela onde é pedido para ser inserido o ficheiro Excel com os valores das constantes de calibração.

Ao seleccionar as constantes de calibração, fica visível o botão para o cálculo das tensões residuais.

Finalmente é aberta uma nova janela, que apresenta uma tabela e um gráfico tensão – profundidade. Os resultados podem ser impressos ou exportados para um ficheiro Excel.

As figuras das páginas seguintes ilustram a sequência que acabámos de descrever durante a execução do software GTR, após as modificações por nós introduzidas.

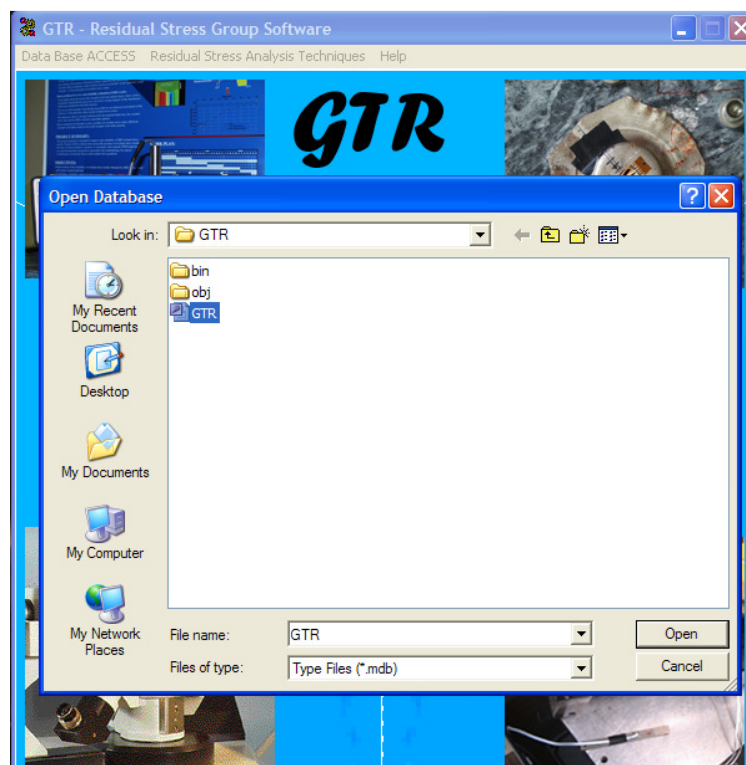


Figura 5.3 – Selecção da base de dados.

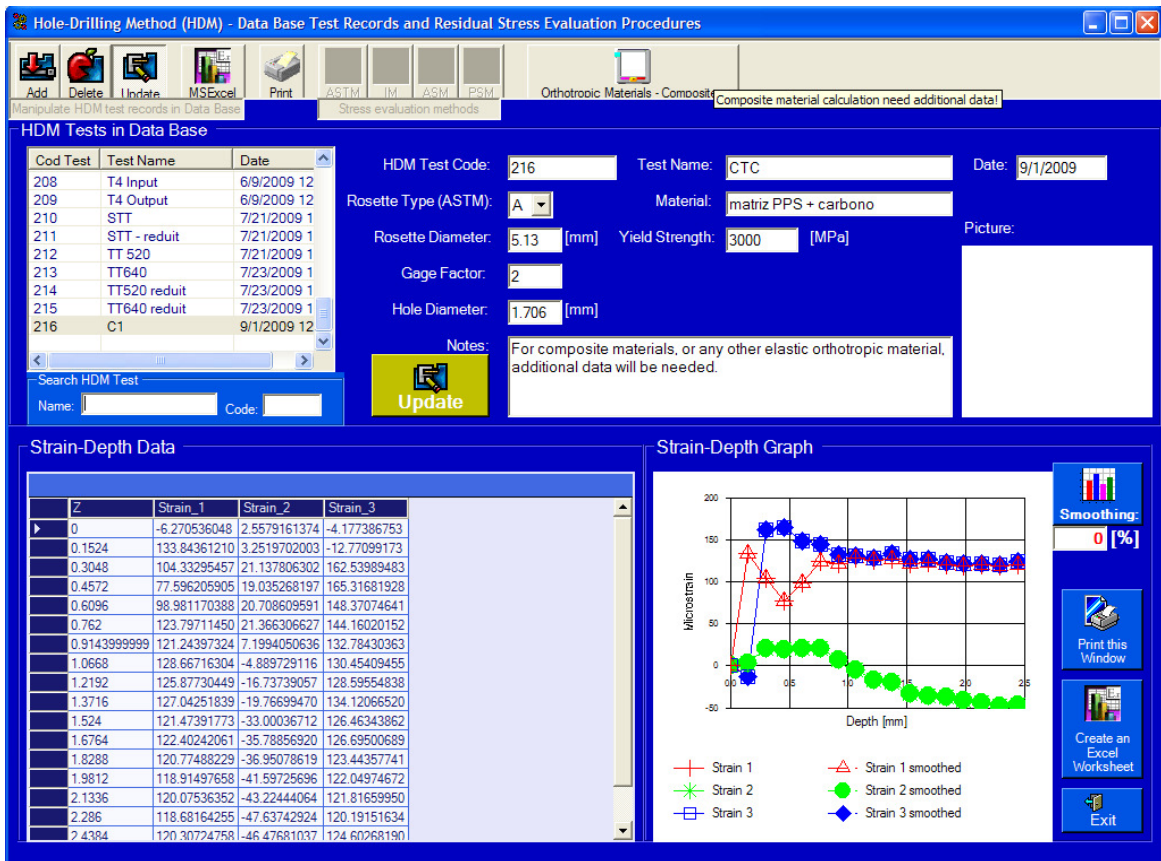


Figura 5.4 Interface gráfica do software. Gráfico e tabela deformação - profundidade.

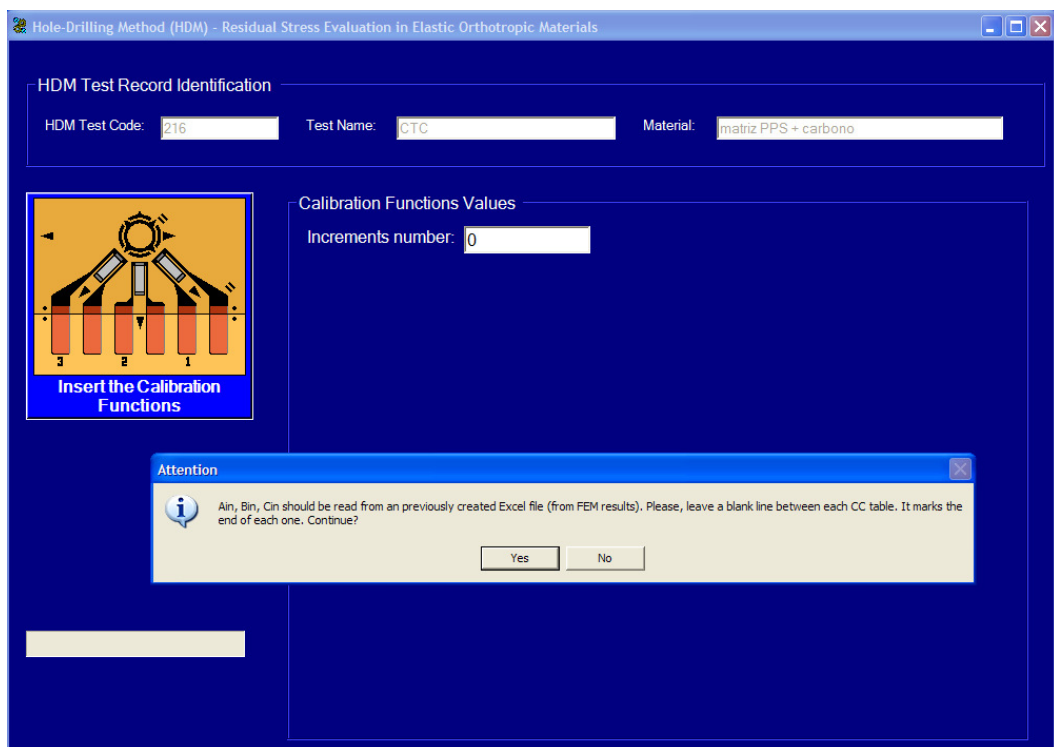


Figura 5.5 – Caixa de aviso com instruções sobre o formato do ficheiro das constantes de calibração.

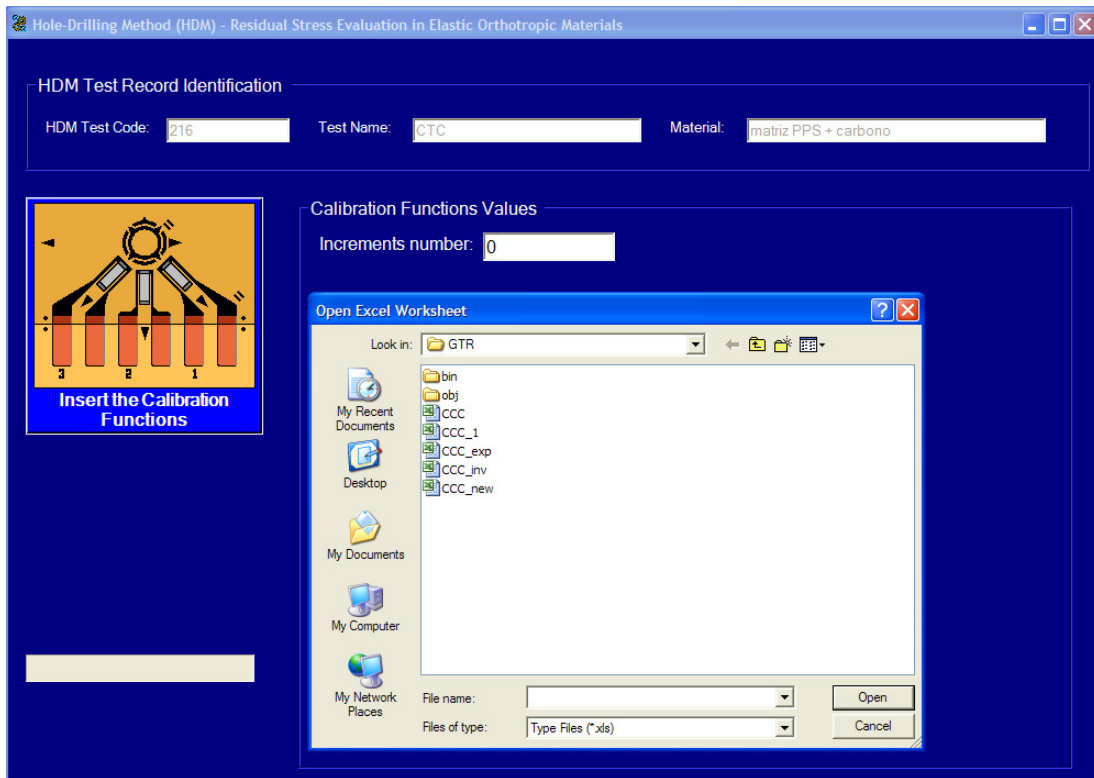


Figura 5.6 – Seleção do ficheiro das constantes de calibração

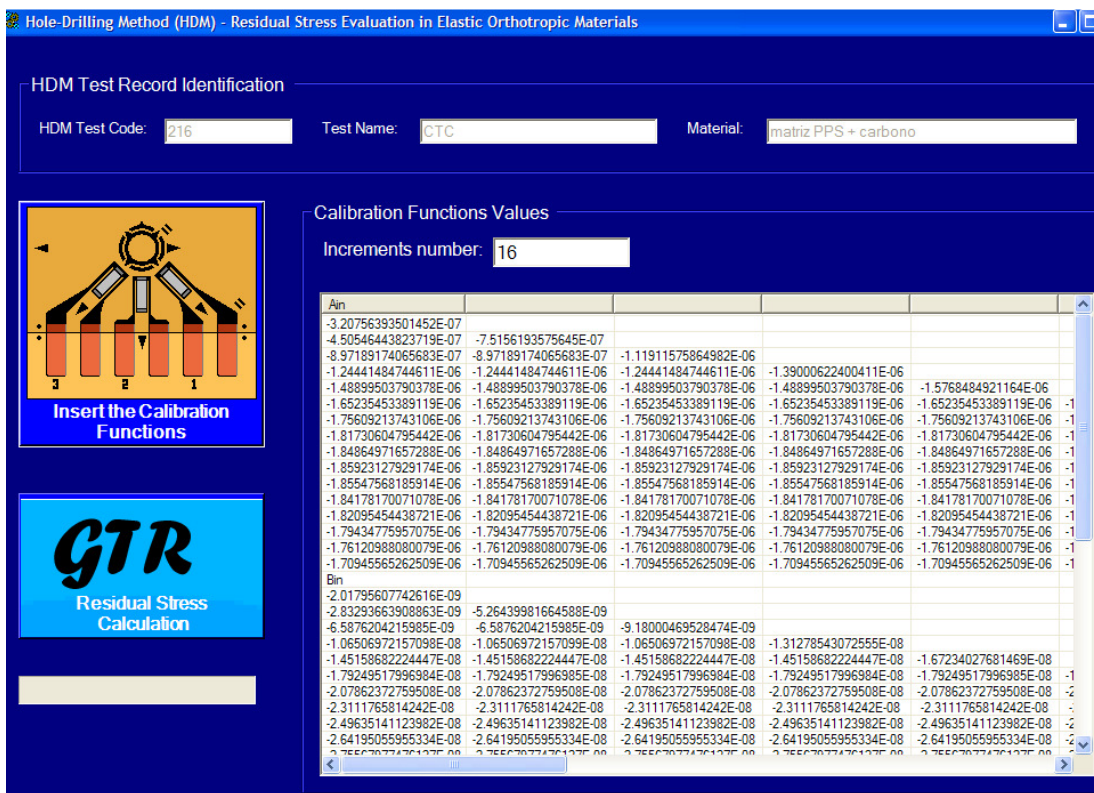


Figura 5.7- Apresentação da matriz das constantes de calibração e activação do botão de cálculo das tensões residuais.

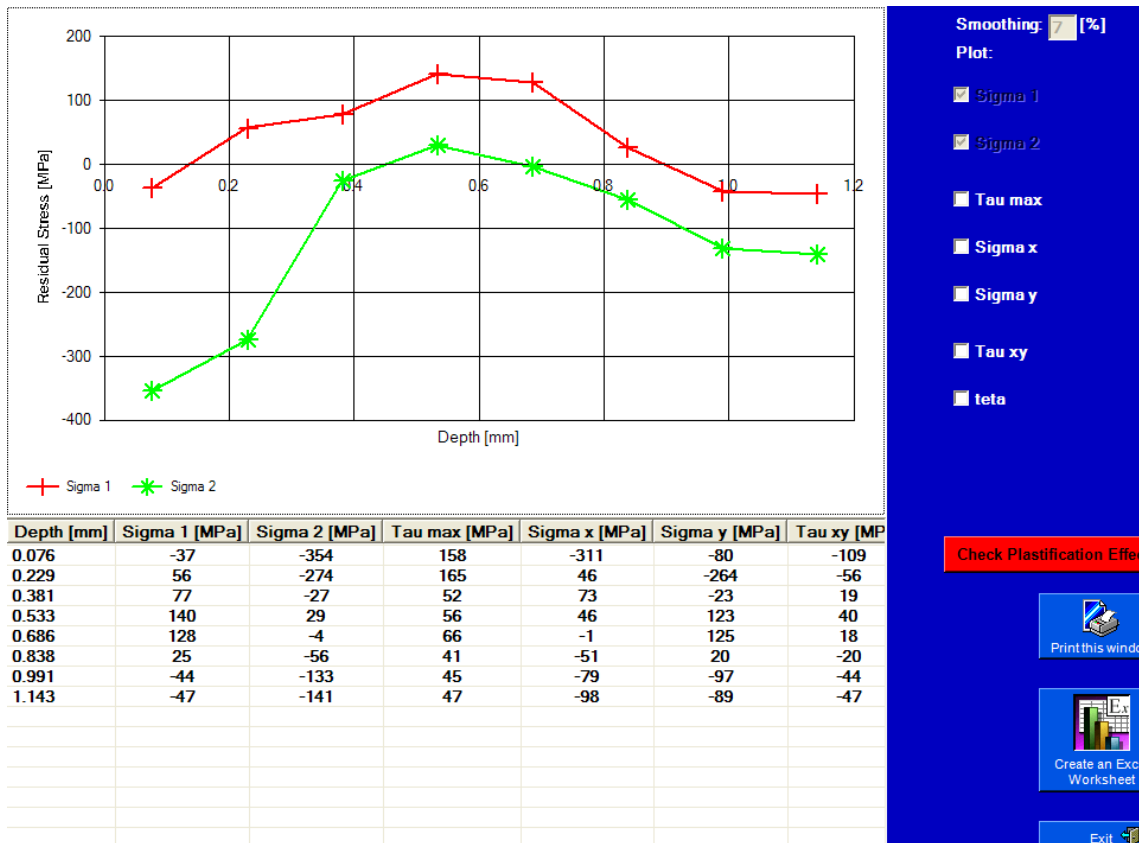


Figura 5.8- Interface gráfica do software. Gráfico e tabela tensão residual - profundidade.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 - DEFORMAÇÕES OBTIDAS NOS ENSAIOS

Para exemplificação dos resultados obtidos durante a aplicação da técnica do furo incremental, mostram-se os resultados obtidos num provete do material M1.

Na tabela 6.1 e no gráfico 6.1 estão apresentados os valores da relaxação de deformação medida em função da profundidade:

Profundidade [mm]	e1 [microdeformação]	e2 [microdeformação]	e3 [microdeformação]
0,076	133,84	3,25	-12,77
0,229	104,33	21,14	162,54
0,381	77,6	19,04	165,32
0,533	98,98	20,71	148,37
0,686	123,8	21,37	144,16
0,838	121,24	7,2	132,78
0,991	128,67	-4,89	130,45
1,143	125,88	-16,74	128,6
1,295	127,04	-19,77	134,12
1,448	121,47	-33	126,46
1,6	122,4	-35,79	126,7
1,753	120,77	-36,95	123,44
1,905	118,91	-41,6	122,05
2,057	120,08	-43,22	121,82
2,21	118,68	-47,64	120,19
2,362	120,31	-46,48	124,6

Tabela 6.1- Tabela deformação profundidade.

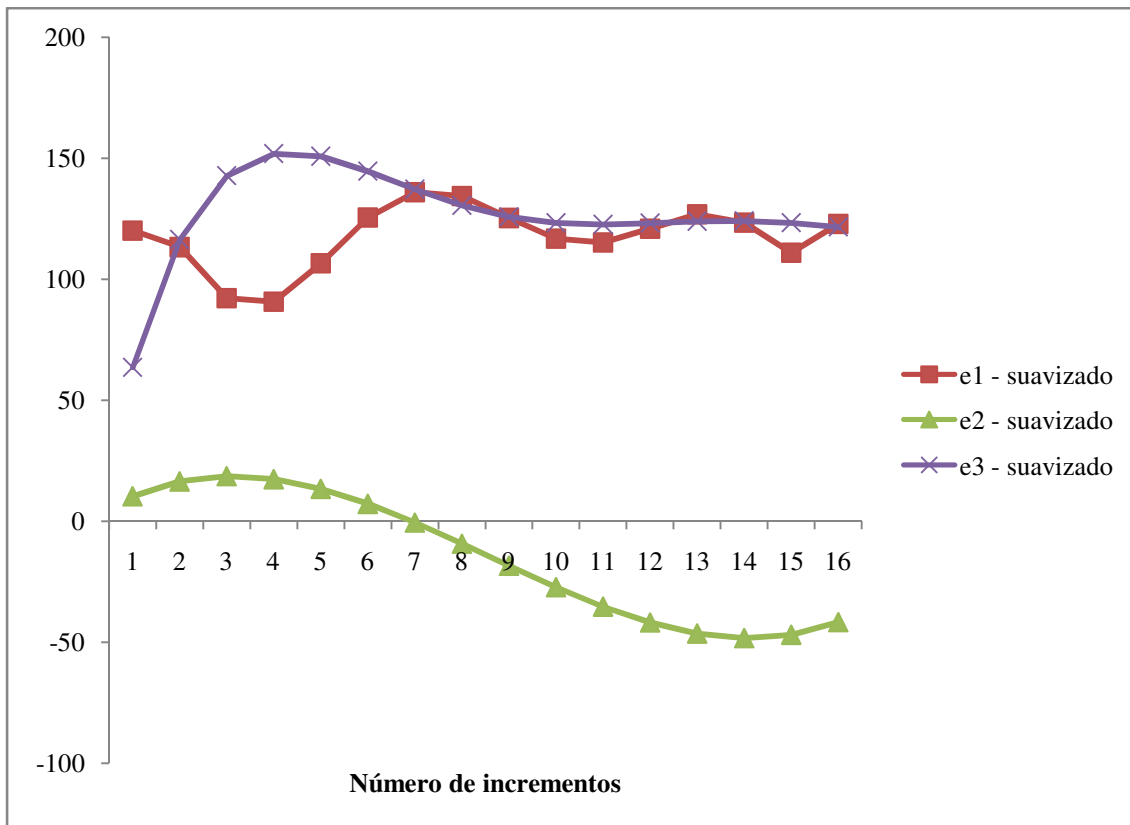


Figura 6.1- Gráfico deformação - profundidade com uma suavização de 8%.

A traço descontínuo estão representadas as linhas de deformação lidas e a traço contínuo estão representadas as linhas de deformação com uma suavização de 8%. Os valores das curvas de relaxação de deformação obtidos mostram que é exequível a aplicação da técnica do furo incremental ao caso dos materiais compósitos laminados.

6.2 - RESULTADO DE TENSÕES RESIDUAIS NOS COMPÓSITOS

Fazendo o cálculo das tensões residuais usando o software “GTR – Residual Stress Group Software”, mencionado no capítulo 5, obtivemos três gráficos, que estão apresentados na página seguinte. O gráfico 6.2 representa a distribuição das tensões principais (σ_1 e σ_2), o gráfico 6.3 representa a distribuição das tensões σ_x , σ_y e τ_{xy} , e finalmente o gráfico 6.4 representa a distribuição da tensão máxima de corte (τ_{max}). Todos os gráficos estão em função da profundidade, expressa em termos do número de incrementos.

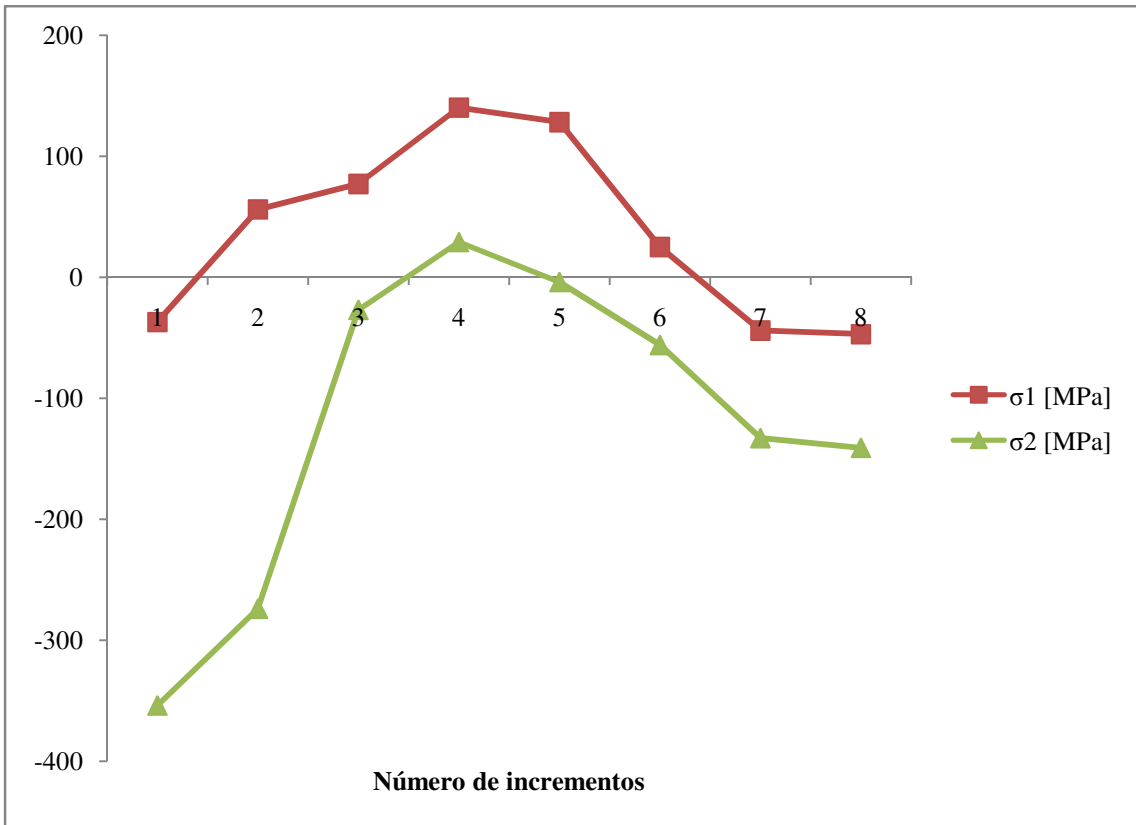


Figura 6.2- Gráfico das tensões principais, (σ_1 e σ_2) - profundidade.

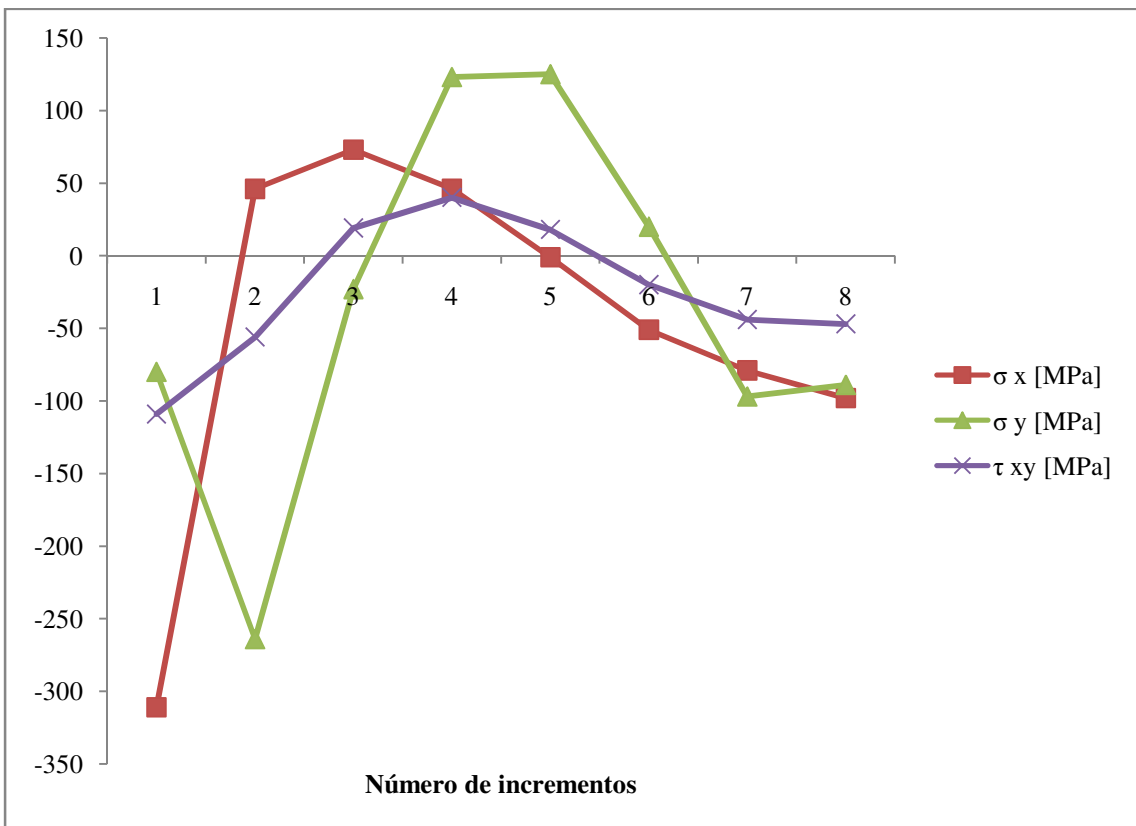


Figura 6.3- Gráfico das tensões σ_x , σ_y e τ_{xy} - profundidade.

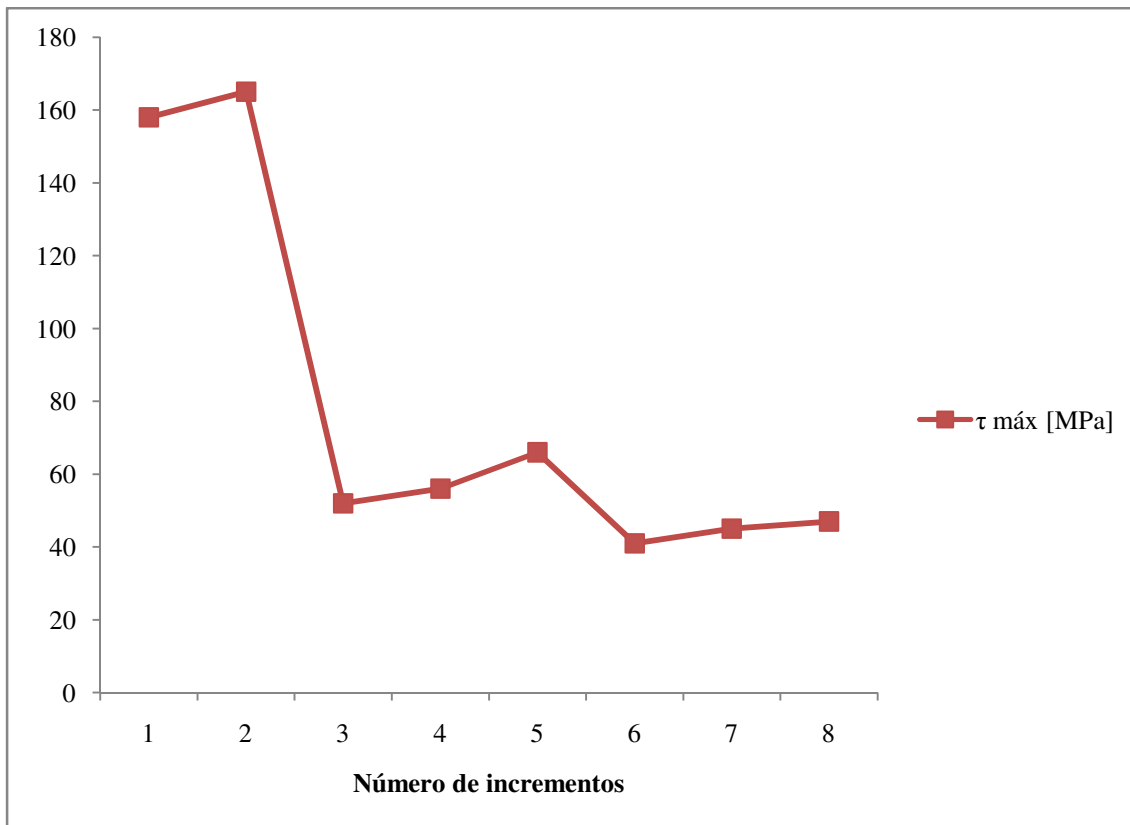


Figura 6.4- Gráfico da tensão de corte máxima, (τ_{max}) - profundidade.

Os resultados indicados são referentes até cerca de metade da espessura dos provetes que é cerca de metade do diâmetro do furo, que constitui limitação para o cálculo das tensões. Tratando-se de provetes simétricos, podemos prever que possa existir simetria no valor das tensões ao longo da espessura dos provetes.

De referir que as tensões residuais mostram um estado de tensão de compressão nas camadas superficiais do provete M1, facto que pode ser devido ao polimento superficial que estes provetes sofreram.

No método do furo incremental, o valor das tensões é proporcional não ao valor das deformações medidas, mas sim ao gradiente de variação das mesmas. Analisando o comportamento dos gráficos 6.1 e 6.2, essa dependência fica bem visível. Numa fase inicial, onde temos um gradiente elevado das deformações de relaxação, observam-se valores igualmente elevados de tensões residuais de compressão. Entre os gradientes 4 e 5, observa-se um ponto de inflexão nas curvas das deformações, correspondendo a valores perto de zero para as tensões residuais.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

7.1 - CONCLUSÕES

Os materiais compósitos de matriz polimérica (PMCs) estão sob a influência de tensões residuais internas devido aos gradientes de temperatura que ocorrem durante o processo de cura e às diferenças existentes nos coeficientes de expansão térmica entre a fibra e a matriz. Estas tensões afectam o comportamento mecânico em serviço destes materiais, exigindo o desenvolvimento de técnicas experimentais fiáveis que permitam determiná-las.

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para a determinação de tensões residuais em materiais elásticos ortotrópicos em geral, e nos compósitos de matriz polimérica reforçados (PMCs) em particular, usando a técnica do furo incremental.

As curvas de relaxação de deformação superficial em função da profundidade, obtidas durante a aplicação da técnica do furo, sugerem que esta é uma técnica promissora para a sua aplicação a este tipo de materiais, embora existam algumas questões em aberto.

O cálculo das tensões residuais com base nas curvas de relaxação de deformação-profundidade exige o conhecimento prévio de constantes de calibração específicas que só podem ser determinadas numericamente, usando o método dos elementos finitos. Devido à ortotropia dos sistemas compósitos e às diferentes orientações das camadas de fibras nestes materiais e das rosetas de extensómetros, estas constantes têm que ser calculadas caso a caso, tornando o cálculo das tensões residuais bastante complexo e moroso. De forma a otimizar o procedimento de cálculo foram desenvolvidas três

macros (scripts) para as três fases da modelação numérica (pré-processamento, processamento e pós-processamento) que permitem interactividade com o utilizador de modo a que a simulação numérica possa ser levada a cabo para diferentes sistemas compósitos, sem alteração significativa do modelo numérico de base desenvolvido. Neste trabalho a modelação numérica foi levada a cabo através do código ANSYS 11.0. As constantes de calibração foram assim determinadas para três materiais compósitos diferentes. O cálculo das tensões levou a resultados coerentes num dos três materiais utilizados, verificando-se resultados irrealistas (valores algo elevados) nos outros casos. Um dos factores que pode estar na origem do problema, situa-se ao nível da interface entre camadas com diferentes orientações, onde pode acontecer uma sobrestimação dos valores das constantes de calibração, mas apesar dos esforços para tentar perceber a raiz do problema, tal não foi conseguido em tempo útil.

As tensões foram calculadas com o auxílio do software GTR, previamente desenvolvido para ser utilizado somente no caso de materiais isotrópicos. O software foi alterado com sucesso de modo a incorporar o método de cálculo proposto neste trabalho, caso de materiais ortotrópicos.

7.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

Os resultados obtidos num dos materiais compósitos utilizados neste trabalho sugerem que a técnica do furo é promissora para ser utilizada na determinação de tensões residuais nestes materiais. No entanto, face aos resultados obtidos, que nalguns casos não foram satisfatórios, é necessário perceber o efeito do processo de furação no estado de tensão residual que se pretende determinar. Só assim será possível conhecer a precisão dos resultados da técnica e estudar formas de otimizar e aumentar a sua fiabilidade.

Com esse objectivo estão previstos serem realizados, no laboratório do Grupo de Tensões Residuais, uma série de ensaios experimentais, usando dispositivos de calibração, de tracção e de flexão 4-pontos, especialmente desenvolvidos para impor estados de tensão bem conhecidos a provetes do material em estudo. Estes ensaios permitirão averiguar o efeito do processo de furação, quantificando o erro que este poderá induzir nos resultados finais da técnica. Estes ensaios permitirão também estudar e otimizar diferentes procedimentos de furação, tais como, a fresagem a alta

velocidade, a fresagem universal a diferentes velocidades, a furação com jactos de ar abrasivos, etc. No caso da fresagem universal, por exemplo, será possível estudar o efeito da velocidade de corte, de forma a otimizar o seu valor, dependendo do material em estudo, minorando o seu efeito no campo de tensões residuais que se pretende determinar. Convém recordar que este tipo de estudo foi levado a cabo em materiais metálicos durante a década de 80. Foi com base neste tipo de estudo que foi proposto o sistema de fresagem a alta velocidade usando turbinas de ar comprimido e fresas de cone invertido [20], sistema esse que também foi usado no presente trabalho. Embora este sistema de fresagem não altere o estado de tensão nos materiais metálicos (no caso dos aços a influência não vai além de 3% a 4%), o seu efeito nos materiais compósitos é ainda completamente desconhecido.

Paralelamente, está também previsto o contínuo desenvolvimento do método de elementos finitos, de forma a aproveitar ao máximo as capacidades oferecidas pelo software ANSYS. Pretende-se estudar comparativamente diferentes abordagens para a realização da malhagem, na definição e na atribuição das propriedades elásticas a camadas de orientação diferente, na forma de aplicação do carregamento e na leitura dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. **Kessler, S. S., Matuszeski, T. e McManus, H.,** *Cryocycling and Mechanical Testing of CFRP for the X -33 Liquid H2 Fuel Tank Structure*. Virginia Tech, Blacksburg : s.n., 2001. Proceedings of the American Society for Composites (ASC).
- [2]. **Mook, G., Pohl, J. e Michel, F.,** *Non-destructive characterization of smart CFRP structures*. Germany : Institute for Materials Engineering and Testing, 2003. Otto-von-Gueriche University Magdeburg.
- [3]. **Andrews, R., et al.,** *Nanotube composite carbon fibres*. Lexington : University of Kentucky, 2002. Center for Applied Energy Research.
- [4]. **ASTM, Standard E 837-08,** *Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*.
- [5]. **Lu, J.** *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. Society for Experimental Mechanics. Lilburn, GA : Fairmont Press, 1996.
- [6]. **Almeida, J. B.,** *Analytical and experimental study on the evolution of residual stresses in composite materials*. s.l. : Faculty of Engineering of the University of Porto, 2005.
- [7]. **Schajer, G. S. and Yang, L.,** *Residual stress measurement in orthotropic materials using the hole-drilling method*. 1994, Exp. Mech., Vol. 12. pp 324-333.
- [8]. **Bijak-Zochowski, M.,** *A Semi-Destructive Method of Measuring Residual Stresses*. VDI-Berichte. 1978, Vol. 313. pp 469-476.
- [9]. **Schajer, G.S.** *Stress Calculation Error Analysis for Incremental Hole-Drilling Residual Stress Measurements*. 1996, Vol. 118. pp. 120-126.
- [10]. **Kirsch.,** *Die Theorie der Elastizitat und die Bedurfnisse der Festigkeitslehre*. s.l. : Zeitschrift de Vereines Deutscher Ingenieure, 1898, Vol. 42. pp 797 - 807.
- [11]. **Branco, C. A. G. M.,** *Mecânica das Materiais*. 1ª. Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.
- [12]. **Vishay,** *Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method*. s.l. : Tech Note TN-503-4, 1993.
- [13]. **Sicot, O., Gong, X. L., Cherouat, A. and Lu, J.** *Influence of experimental parameters on determination of residual stress using the incremental hole-drilling method*. Composites Science and Technology. 2004, Vol. 64. pp 171-180.

- [14]. **Sicot, O.**, *Determination of residual stress in composite laminates using the incremental hole-drilling method*. Journal of Composite Materials. 2004, Vol. 37. pp 831-841.
- [15]. **Cherouat, A., et al.**, *Influence of the Residual Stresses on the Mechanical Behavior of Advanced Composite Parts*. 2001, Journal of Neutron Research, Vol. 9. pp 319-330.
- [16]. **Schajer, G. S.**, *Aplication of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements*. Journal of Eng. Mat and Tech (ASME). 1981. pp 103.
- [17]. [Online] <http://www.vishay.com/>, Acedido a 6/2009.
- [18]. **ANSYS,I.**, *ANSYS Theory Reference*. s.l. : SAS IP, Inc., Houston, 2006.
- [19]. **Nobre, J. P. et al.**, *A Windows-based Software Package to Evaluate Residual Stresses by the Incremental Hole-Drilling Technique*. Computer Applications in Engineering Education.
- [20]. **Flaman, M. T.**, *Investigation of Ultra-High Speed Drilling for Residual Stress Measurements by the Center Hole Method*, Experimental Mechanics, 22 (1), 26-30 1982.

ANEXOS

MACROS - MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

ANEXO I - PRÉ-PROCESSAMENTO

```
!* Constantes de calibração - modelo 3D ortotrópico
!* definição da geometria e malhagem + condições fronteira
/TITLE, Model for HDM calibration constants determination for composite materials
/units, user
!*           Definição de parametros para o modelo geométrico
*ask, Ra, Set the hole radius to use, 0.8535
*ask, esp, Set specimen thickness, 2.4384
*ask, nply, Set the number of plies, 8
*ask, nincr, Set the number of incremental drilling steps by ply, 2
*ask, ros, ASTM rosette type (A=1,B=2 or C=3),1
*if, ros,NE,2,AND,ros,NE,3, then
    *set,ros,1
*endif
*if, ros,EQ,1,OR,ros,EQ,2,then
    *set,Rmin,1.77
    *set,Rmax,3.36
*endif
*if, ros,EQ,3, then
    *set,Rmin,1.78
    *set,Rmax,2.54
*endif
!*           Definição constantes elásticas do material
```

```

*ask,EX, Elastic constant Ex (MPa), 57.24E3
*ask,Ey, Elastic constant Ey (MPa), 57.24E3
*ask,Ez, Elastic constant Ez (MPa), 9.7E3
*ask,GXY, Elastic constant Gxy (MPa), 4.142E3
*ask,GYZ, Elastic constant Gyz (MPa), 2.902E3
*ask,GXZ, Elastic constant Gxz (MPa), 2.904E3
*ask,NUXY, Elastic constant PRxy, 0.04
*ask,NUYZ, Elastic constant PRyz, 0.38
*ask,NUXZ, Elastic constant PRxz, 0.38
!*
*set,width, 5*((Rmax+Rmin)/2)  !* largura do modelo 3D
*set,nrvol, (nincr*nply)      !* número de volumes em profundidade
*set,incr,(esp/nrvol)        !* espessura de cada volume a criar
*set, pi, 3.14159265359      !* nr pi
!*Ra                          !* raio do furo
!*Rm                          !* raio da zona dos extensómetros
!*width                       !* raio máximo do provete
!*esp                         !* espessura do provete
!*nPly                        !* numero de camadas (fibras)
!*nincr                       !* incremento de profundidade
/PREP7
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
/COM,
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:

```

/COM, Structural

!*
ET,1,SOLID185

KEYOPT,1,2,2

KEYOPT,1,3,0

KEYOPT,1,6,0

KEYOPT,1,10,0

KEYOPT,1,10,0

!*
MP,,,,,,,,

Definição das constantes de ortotropia

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,1,,EX

MPDATA,EY,1,,EY

MPDATA,EZ,1,,EZ

MPDATA,PRXY,1,,PRXY

MPDATA,PRYZ,1,,PRYZ

MPDATA,PRXZ,1,,PRXZ

MPDATA,GXY,1,,GXY

MPDATA,GYZ,1,,GYZ

MPDATA,GXZ,1,,GXZ

MPDATA,GXZ,1,,GXZ

!*
/PSF,DEFA, ,1,0,1

Símbolos dos constrangimentos na GUI

/PSF,DEFA, ,1,0,1

/PBF,DEFA, ,1

/PIC,DEFA, ,1

/PSYMB,CS,0

/PSYMB,NDIR,0

/PSYMB,ESYS,0

/PSYMB,LDIR,0

/PSYMB,LDIR,0

/PSYMB,ADIR,0

/PSYMB,ECON,1

/PSYMB,XNODE,0

/PSYMB,DOT,1

/PSYMB,PCONV,

/PSYMB,LAYR,0

/PSYMB,FBCS,0

!*
Graus de liberdade e definição de sistema cartesiano global

```

CSYS,0
DOF,UX,UY,UZ
!*                               !Criação dos volumes - modelo 3D
*Do,i,1,%nrvol%
    CYLIND,Ra,0,-(i-1)*incr,-i*incr,0,90,
*Enddo
*Do,i,1,(%nrvol%/2)
    CYLIND,Rmin,Ra,-(i-1)*(incr*2),-i*(incr*2),0,90,
*ENDDO
*Do,i,1,(%nrvol%/4)
    CYLIND,Rmax,Rmin,-(i-1)*(incr*4),-i*(incr*4),0,90,
*ENDDO
*Do,i,1,(%nrvol%/8)
    CYLIND,width,Rmax,-(i-1)*(incr*8),-i*(incr*8),0,90,
*ENDDO
vglue, all                       !* Liga todos os volumes
!*   ! Selecciona volume a volume, as áreas a "concatenate" (pelo centro de gravidade)
!*                               ! Cilindro da zona anterior aos extensómetros
zcent = -incr
*Do,i,1,(%nrvol%/2)
    vsel, s, loc, z, zcent
    aslv, s
    asel, r, loc, z, (zcent+incr/2),(zcent-incr/2)
    asel, u, loc, z, zcent
    ACCAT, ALL
    zcent = zcent - (2*incr)
*ENDDO
!*                               ! Cilindro da zona dos extensómetros
zcent = -(2*incr)
*Do,i,1,(%nrvol%/4)
    vsel, s, loc, z, zcent
    aslv, s
    asel, r, loc, z, (zcent+incr),(zcent-incr)
    asel, u, loc, z, zcent
    ACCAT, ALL
    zcent = zcent - (4*incr)

```

```

*ENDDDO
!*                               ! Zona do corpo do provete
zcent = -(4*incr)
*Do,i,1,(%nrvol%/8)
    vsel, s, loc, z, zcent
    aslv, s
    asel, r, loc, z, (zcent+2*incr),(zcent-2*incr)
    asel, u, loc, z, zcent
    ACCAT, ALL
    zcent = zcent - (8*incr)
*ENDDDO
vsel,all
asel,all
!*                               !* Numera área e volumes
!/PNUM,KP,0
!/PNUM,LINE,0
!/PNUM,AREA,1
!/PNUM,VOLU,1
!/PNUM,NODE,0
!/PNUM,TABN,0
!/PNUM,SVAL,0
!/PNUM,EXCL,0
!/NUMBER,0
/NUM,ELEM,0
VPLOT
!*                               !* dimensionamento de linhas
!*                               !* Linhas horizontais
zcent = -incr/2
*Do,i,1,(%nrvol%)
    vsel, s, loc, z, zcent
    aslv, s
    lsla, s
    lsel, r, loc, z, (zcent+incr/2)
    lsel,r,loc, x, 0
    LESIZE,All, , ,8,5,1
    lsla, s

```



```

        lsel, r, loc, z, (zcent+incr/2)
        lsel, r, loc, y, 0
        LESIZE,All, , ,8,0.2,1
        zcent = zcent - (incr)
*ENDDO
!*
!* Linhas da base
lsla, s
lsel, r, loc, z, (zcent+incr/2)
lsel,r,loc, x, 0
LESIZE,All, , ,8,5,1
lsla, s
lsel, r, loc, z, (zcent+incr/2)
lsel, r, loc, y, 0
LESIZE,All, , ,8,0.2,1
zcent = -incr
*Do,i,1,(%nrvol%/2)
        vsel, s, loc, z, zcent
        aslv, s
        lsla, s
        lsel, r, loc, z, (zcent+incr)
        lsel,r,loc, x, 0
        LESIZE,All, , ,6,5,1
        lsla, s
        lsel, r, loc, z, (zcent+incr)
        lsel, r, loc, y, 0
        LESIZE,All, , ,6,5,1
        zcent = zcent - (2*incr)
*ENDDO
lsla, s
lsel, r, loc, z, (zcent+incr)
lsel,r,loc, x, 0
LESIZE,All, , ,6,5,1
lsla, s
lsel, r, loc, z, (zcent+incr)
lsel, r, loc, y, 0
LESIZE,All, , ,6,5,1
zcent = zcent - (2*incr)

```

```

zcent = -(2*incr)
*Do,i,1,(%nrvol%/4)
    vsl, s, loc, z, zcent
    aslv, s
    lsla, s
    lsel, r, loc, z, (zcent+2*incr)
    lsel,r,loc, x, 0
    LESIZE,All, , ,4,1,1
    lsla, s
    lsel, r, loc, z, (zcent+2*incr)
    lsel, r, loc, y, 0
    LESIZE,All, , ,4,1,1
    zcent = zcent - (4*incr)
*ENDDO
lsla, s
lsel, r, loc, z, (zcent+2*incr)
lsel,r,loc, x, 0
LESIZE,All, , ,4,1,1
lsla, s
lsel, r, loc, z, (zcent+2*incr)
lsel, r, loc, y, 0
LESIZE,All, , ,4,1,1
zcent = zcent - (4*incr)
zcent = -(4*incr)
*Do,i,1,(%nrvol%/8)
    vsl, s, loc, z, zcent
    aslv, s
    lsla, s
    lsel, r, loc, z, (zcent+4*incr)
    lsel,r,loc, x, 0
    LESIZE,All, , ,8,5,1
    lsla, s
    lsel, r, loc, z, (zcent+4*incr)
    lsel, r, loc, y, 0
    LESIZE,All, , ,8,5,1
    zcent = zcent - (8*incr)
*ENDDO

```

```

lsla, s
lsel, r, loc, z, (zcent+4*incr)
lsel,r,loc, x, 0
LESIZE,All, , ,8,5,1
lsla, s
lsel, r, loc, z, (zcent+4*incr)
lsel, r, loc, y, 0
LESIZE,All, , ,8,5,1
zcent = zcent - (8*incr)
vsel,all
asel,all
lsel,all
!*                               !* Linhas verticais
!* z = 0
lsel,s,loc,x,0
lsel,r,loc,y,0
lesize,all, , , %nincr%,1,1
lsel,s,loc,y,0
lsel,r,loc, x, Ra
lesize,all, , , %nincr%,1,1
lsel,s,loc,x,0
lsel,r,loc, y, Ra
lesize,all, , , %nincr%,1,1
lsel,s,loc,y,0
lsel,r,loc, x, Rmin
lesize,all, , , %nincr%*2,1,1
lsel,s,loc,x,0
lsel,r,loc, y, Rmin
lesize,all, , , %nincr%*2,1,1
lsel,s,loc, y, 0
lsel,r,loc, x, Rmax
lesize,all, , , %nincr%*4,1,1
lsel,s,loc, x,0
lsel,r,loc, y, Rmax
lesize,all, , , %nincr%*4,1,1
lsel,s,loc, y, 0
lsel,r,loc, x, width

```

```

lesize,all, , , %nincr%*8,1,1
lsel,s,loc, x, 0
lsel,r,loc, y, width
lesize,all, , , %nincr%*8,1,1
LSEL, ALL
!*                               !* opções para a malhagem
MOPT,AMESH,DEFA
MOPT,QMESH,MAIN
MOPT,VMESH,DEFA
MOPT,TIMP,1
MOPT,PYRA,ON
MOPT,AORD,1
MOPT,SPLIT,1
MSHKEY,1
MSHMID,0
MSHPATTERN,0
KEYW,ACCEPT,0
MSHAPE,0,2D
MSHAPE,0,3D
VSEL,ALL                               !* Cria malha (Mapped meshing)
MSHKEY,1
VMESH,ALL
MSHKEY,0
EPLOT
!*                               !* Simetria em relação aos planos xz e yz
NSEL,S,LOC,X,0
DSYM,SYMM,X
NSEL, ALL
NSEL,S,LOC,Y,0
DSYM,SYMM,Y
NSEL,ALL
!*                               !* Condições fronteira iniciais
!*   restrição do deslocamento do plano yz na direcção ux
!*   restrição do deslocamento do plano xz na direcção uy
!*   restrição do deslocamento do plano xy (base) na direcção uz
NSEL,S,LOC,Z,-esp

```

```
D,all,uz,0  
NSEL, ALL  
SAVE  
finish  
/eof  
!*** FIM PREPROCESSADOR
```

ANEXO II - SOLUÇÃO DAS CONSTANTES A_{in}

!* Modulo para o modelo 3D do método do furo

!* Determinação das constantes de calibração em materiais Compósitos

!*****

!***** Definição das condições de carga *****

!*****

/SOLU

ANTYPE,0

NROPT,FULL, ,ON ! opção obrigatória para nascimento e morte de elementos

ESTIF,1.0E-8

NLGEOM,ON

LUMPM,0

EQSLV, , ,0,

PRECISION,0

MSAVE,0

PIVCHECK,1

TOFFST,0,

OUTPR,BASIC,ALL

TIME,1

AUTOTS,-1

DELTIM, ,0.1,1,1

KBC,0

TSRES,ERASE

!*

zcent = -incr/2

Do,i,1,%nrvol% ! ciclo para fazer o furo / incrementos

ALLSEL,ALL

vsel, s, loc, z, zcent, (zcent - (i-1)*incr)

vsel, u, loc, x, (0.7*Ra), width

eslv, s

ekill, all

Do,j,1,i ! ciclo para carregamentos

aslv, s

```
asel, r, loc, z, zcent, (zcent - ((j-1)*incr))
asel, u, loc, x, 0
asel, u, loc, y, 0
asel, u, loc, z, -(j-1)*incr
sfa, all, 1, PRES, 1
allsel, all
solve
*enddo
ESEL, S, LIVE
SFADELE, all, PRES
*Enddo
EPlot
/eof
!* FIM MÓDULO DE PROCESSAMENTO
```



```

!*
! Begin of equation: cos(2*{Y})
*SET,%_FNCNAME%(0,0,1), 0.0, -999
*SET,%_FNCNAME%(2,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(3,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(4,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(5,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(6,0,1), 0.0
*SET,%_FNCNAME%(0,1,1), 1.0, -1, 0, 2, 0, 0, 3
*SET,%_FNCNAME%(0,2,1), 0.0, -2, 0, 1, -1, 3, 3
*SET,%_FNCNAME%(0,3,1), 0, -1, 10, 1, -2, 0, 0
*SET,%_FNCNAME%(0,4,1), 0.0, 99, 0, 1, -1, 0, 0
! End of equation: cos(2*{Y})
!-->
!*
!*
zcent = -incr/2
*Do,i,1,%nrvol%          !* ciclo para fazer o furo / incrementos
ALLSEL,ALL
vsel, s, loc, z, zcent, (zcent - ((i-1)*incr))
vsel, u, loc, x, 0.7*Ra, width
eslv, s
ekill, all
    *Do,j,1,i              !* ciclo para carregamentos
    aslv, s
    asel, r, loc, z, zcent, (zcent - ((j-1)*incr))
    asel, u, loc, x, 0
    asel, u, loc, y, 0
    asel, u, loc, z, -(j-1)*incr
    SFA,ALL,1,PRES, %CONST_B%
    allsel, all
    solve
    *enddo
ESEL, S, LIVE

```

SFADELE, all, PRES

*Enddo

!

EPLLOT

/eof

!* FIM MODULO DE PROCESSAMENTO

ANEXO IV - PÓS-PROCESSAMENTO DAS CONSTANTES A_{in}

/POST1

!* cria caminho

!* Para a constante A ler os valores na zona do extensómetro correspondente a $teta=(PI/4)$ na direcção horizontal

!* Seja NRINCR o número de load steps usados = a cada incremento de profundidade do furo.

!* Para cada load step cria ficheiro 1,2,3... com os resultados da relaxação da

!* deformação neste extensómetro.

!*

!* Rosetas A e B normais.

!*

*AFUN, DEG

PATH,caminho,2,30,100,

PPATH,1,,(Rmin*cos(45)),(Rmin*sin(45)),0,0

PPATH,2,,(Rmax*cos(45)),(Rmax*sin(45)),0,0

/PBC,PATH,,1

/REPLOT

/PBC,PATH,,0

!*

AVPRIN,0,0,

set,last

*get,NPOINTS,active,,set,lstp

*DIM, AVECTOR, Array, NPOINTS

!* Dimensiona a array para gravar os valores das constantes

*do,I,1,%NPOINTS%

set, I

!*

!* busca resultados das deformações obtidas pelo modelo em cada load step I

!*

PDEF, ,EPEL,X,AVG !* deformação segundo X

/PBC,PATH, ,0

PAGET,RDATA,TABLE !* Vai buscar os parâmetros e guarda-os numa tabela

```

    AVECTOR(I)=((RDATA(100,5)-RDATA(1,5))/2)
    *del,RDATA
*enddo
!*
!*
!*          !* Gera matriz Ain
!*
!*
!*
*DIM, A, Array, nrvol, nrvol      !* Dimensiona a array para gravar os valores de Aij
*Do,i,1,%nrvol%                  !* Fazer array Aij com todos os valores =0
    A(i) = 0
*enddo
!*
!*
!*
t = 0
*Do,i,1,%nrvol%                  !* Fazer o preenchimento da matriz triangular inferior.
    *Do,j,1,i
        t=t+1
        A(i,j)=AVECTOR(t)
    *enddo
*enddo
!*
!*
*DIM, Ain, Array, nrvol, nrvol    !* Dimensiona matriz final Ain
!*
!*
*Do,i,1,%nrvol%
    Ain(i,1)=A(i,1)
*enddo
!*
!*
*Do,i,2,%nrvol%
    *Do,j,2,i
        Ain(i,j)=A(i,j)-A(i,j-1)

```

```

        *enddo
*enddo
!*
!* Escrita da matriz - NOTA BEM - Alterar caso seja alterado o número de colunas da
matriz Ain
!*
*CFOPEN,Matriz_A,,
*VWRITE, Ain(1,1), Ain(1,2), Ain(1,3), Ain(1,4), Ain(1,5), Ain(1,6), Ain(1,7),
Ain(1,8), Ain(1,9), Ain(1,10), Ain(1,11), Ain(1,12), Ain(1,13), Ain(1,14), Ain(1,15),
Ain(1,16)
(F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ',
F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28)
*CFCLOS
/eof

```

ANEXO V - PÓS-PROCESSAMENTO DAS CONSTANTES B_{in}

/POST1

!* Para a constante B ler os valores na zona do extensómetro correspondente a $teta=(PI/4)$ na direcção horizontal

!* - Seja NRINCR o número de load steps usados = a cada incremento de profundidade do furo.

!* Para cada load step cria ficheiro 1,2,3... com os resultados da relaxação da

!* deformação neste extensómetro.

!* Rosetas A e B normais.

*AFUN, DEG

PATH,caminho,2,30,100,

PPATH,1,,(Rmin*cos(45)),(Rmin*sin(45)),0,0

PPATH,2,,(Rmax*cos(45)),(Rmax*sin(45)),0,0

/PBC,PATH,,1

/REPLOT

/PBC,PATH,,0

!*

AVPRIN,0,0,

set,last

*get,NPOINTS,active,,set,lstp

DIM, BVECTOR, Array, NPOINTS ! Dimensiona a array para gravar os valores das constantes

*do,I,1,%NPOINTS%

set, I

!*

!* busca resultados das deformações obtidas pelo modelo em cada load step I

!*

PDEF, ,EPEL,X,AVG !* deformação segundo X

/PBC,PATH, ,0

PAGET,RDATA,TABLE !* Vai buscar os parâmetros e guarda-os numa tabela

BVECTOR(I)=((RDATA(100,5)-RDATA(1,5))/2)

```

*del,RDATA
*enddo
!*
!*
!*          !* Gera matriz Bin
!*
!*
*DIM, B, Array, nrvol, nrvol      !* Dimensiona a array para gravar os valores de Bij
*Do,i,1,%nrvol%                  !* Fazer array Bij com todos os valores =0
    B(i) = 0
*enddo
!*
!*
!*
t = 0
*Do,i,1,%nrvol%                  !* Fazer o preenchimento da matriz triangular inferior.
    *Do,j,1,i
        t=t+1
        B(i,j)=BVECTOR(t)
    *enddo
*enddo
!*
!*
*DIM, Bin, Array, nrvol, nrvol    !* Dimensiona matriz final Bin
!*
!*
*Do,i,1,%nrvol%
    Bin(i,1)=B(i,1)
*enddo
!*
!*
*Do,i,2,%nrvol%
    *Do,j,2,i
        Bin(i,j)=B(i,j)-B(i,j-1)
    *enddo

```

```
*enddo
!*
!* Escrita da matriz - NOTA BEM - Alterar caso seja alterado o número de colunas da
matriz Bin
!*
*CFOPEN,Matriz_B,,
*VWRITE, Bin(1,1), Bin(1,2), Bin(1,3), Bin(1,4), Bin(1,5), Bin(1,6), Bin(1,7),
Bin(1,8), Bin(1,9), Bin(1,10), Bin(1,11), Bin(1,12), Bin(1,13), Bin(1,14), Bin(1,15),
Bin(1,16)
(F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ',
F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28)
*CFCLOS
/eof
```


ANEXO VI - PÓS-PROCESSAMENTO DAS CONSTANTES C_{in}

/POST1

!* cria caminho

!* Para a constante C ler os valores na zona dos extensómetros com teta=(PI/4) na direcção a 45° (radial)

!*

*AFUN, DEG

PATH,caminho,2,30,100,

PPATH,1,,(Rmin*cos(45)),(Rmin*sin(45)),0,0

PPATH,2,,(Rmax*cos(45)),(Rmax*sin(45)),0,0

/PBC,PATH,,1

/REPLOT

/PBC,PATH,,0

!*

AVPRIN,0,0,

set,last

*get,NPOINTS,active,,set,lstp

DIM, CVECTOR, Array, NPOINTS ! Dimensiona a array para gravar os valores das constantes

*do,I,1,%NPOINTS%

 set, I

 !*

 !* busca resultados das deformações obtidas pelo modelo em cada load step I

 !*

 Rsys, 1

 PDEF, ,EPEL,X,AVG !* deformação na direcção radial

 /PBC,PATH, ,0

 PAGET,RDATA,TABLE !* Vai buscar os parâmetros e guarda-os numa tabela

 CVECTOR(I)=((RDATA(100,5)-RDATA(1,5))/2)

 *del,RDATA

*enddo

!*

```

!*                                     !* Gera matriz Cin
!*
!*
!*DIM, C, Array, nrvol, nrvol        !* Dimensiona a array para gravar os valores de Cij
!*Do,i,1,%nrvol%                     !* Fazer array Cij com todos os valores =0
    C(i) = 0
*enddo
!*
!*
!*
t = 0
!*Do,i,1,%nrvol%                     !* Fazer o preenchimento da matriz triangular inferior
    *Do,j,1,i
        t=t+1
        C(i,j)=CVECTOR(t)
    *enddo
*enddo
!*
!*
!*DIM, Cin, Array, nrvol, nrvol      !* Dimensiona matriz final Cin
!*
!*Do,i,1,%nrvol%
    Cin(i,1)=C(i,1)
*enddo
!*
!*
!*Do,i,2,%nrvol%
    *Do,j,2,i
        Cin(i,j)=C(i,j)-C(i,j-1)
    *enddo
*enddo
!*

```

Escrita da matriz - NOTA BEM - Alterar caso seja alterado o número de colunas da matriz Cin

!*
*CFOPEN,Matriz_C,,
*VWRITE, Cin(1,1), Cin(1,2), Cin(1,3), Cin(1,4), Cin(1,5), Cin(1,6), Cin(1,7),
Cin(1,8), Cin(1,9), Cin(1,10), Cin(1,11), Cin(1,12), Cin(1,13), Cin(1,14), Cin(1,15),
Cin(1,16)
(F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ',
F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28,' ', F30.28)
*CFCLOS
/eof