



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo experimental e numérico do processo de furação em ligas de titânio com vista à melhoria do seu desempenho funcional e vida

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

Autor

Diana Isabel Lima da Cunha Pita

Orientadores

Professor Doutor João Paulo da Silva Gil Nobre

Professor Doutor José Carlos Martins do Outeiro

Júri

Presidente	Professor Doutor Marta Cristina Cardoso de Oliveira Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor João Paulo da Silva Gil Nobre Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor António Adriano Castanhola Batista Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Luís Manuel de Jesus Coelho Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria Professor Doutor José Carlos Martins do Outeiro Professor Associado Arts et Metiers Paris Tech



Universidade de
Coimbra

Coimbra, Julho, 2013

“If I have seen further it is by standing on the shoulders of giants.”

Isaac Newton

Aos meus pais.

Agradecimentos

A todos que me acompanharam nesta caminhada, um muito obrigado!

Aos meus professores por toda a sabedoria e valores que me inculcaram e na pessoa que me tornaram porque “*The mind that opens to a new idea never returns to its original size.*” (Albert Einstein). Um especial obrigado ao Professor Doutor João Nobre pela dedicação e orientação ao longo deste trabalho e ao Professor Doutor António Castanhola Batista pela sua colaboração.

À minha família, em particular aos meus pais pelo apoio incondicional ao longo destes anos e por me terem proporcionado esta oportunidade, nunca terei palavras suficientes para lhes agradecer.

Ao André por todo o carinho, amizade e dedicação.

A todos os meus amigos, em especial à Mariana e à minha “família” nascida em Coimbra.

“...levo comigo p’rá vida!”

Resumo

Este trabalho tem como objetivo o estudo experimental e numérico do processo de furação numa liga de titânio (Ti-6Al-4V) com vista à melhoria do seu desempenho funcional e vida. Serão estudadas as tensões residuais induzidas por este processo, que são muitas vezes responsáveis pela falha de componentes mecânicos ou então pela sua melhoria em serviço e conseqüente aumento de tempo de funcionamento, quando convenientemente geradas.

A técnica que utilizaremos para determinar tensões será baseada na técnica do furo incremental, que é uma técnica de medida largamente aceite para a determinação de tensões residuais. Os efeitos termo-mecânicos gerados durante o corte do material podem induzir tensões residuais indesejadas. Para quantificar estas tensões induzidas tem sido desenvolvido uma metodologia híbrida experimental e numérica, baseada na técnica do furo incremental.

Nesta metodologia, provetes do material em estudo são submetidos a estados de tensão bem conhecidos durante a furação, fazendo-se uso do princípio da sobreposição, por forma a eliminar o efeito das tensões residuais iniciais, ou seja, que possam existir antes da furação. A quantificação das deformações induzidas pelo processo de furação, e desse modo as tensões induzidas, é conseguida comparando-se as curvas de relaxação de deformação em função da profundidade obtidas durante a calibração experimental com as obtidas por simulação numérica de todo o processo experimental. Assume-se que as curvas numéricas são curvas ideais em que o material é removido sem contacto físico. Assim, a diferença entre as curvas de relaxação de deformação em função da profundidade obtidas experimentalmente e numericamente permitirá estimar as deformações induzidas pelo próprio processo de furação.

Neste trabalho em particular estudou-se o efeito do processo de furação que normalmente é usado com a aplicação normalizada da técnica do furo incremental para a determinação de tensões residuais na maioria dos materiais metálicos. Nesses processos de furação são usadas fresas sujeitas a velocidades de corte muito elevadas (acima das 100.000 rpm) devido ao acionamento por turbinas a ar comprimido. Modificando-se a

pressão do ar de acionamento da turbina, foi possível estudar o efeito da velocidade de corte. Por outro lado, selecionando uma dada velocidade de corte, foram comparados os resultados obtidos com diferentes ferramentas de corte. Embora os resultados não possam ser conclusivos relativamente às diferenças observadas ao nível da variação da velocidade de corte usada, constata-se que as deformações induzidas pelo processo de corte foram surpreendentemente reduzidas na gama das altas velocidades utilizadas. De facto, devido em grande parte à baixa condutividade térmica das ligas de titânio, é bem conhecida a dificuldade de furação destas ligas no que respeita à fraca precisão dimensional final dos furos. Neste sentido, a indústria aeronáutica, por exemplo, tem procurado melhorar este tipo de processo de fabricação. A metodologia usada neste trabalho pode ser uma ferramenta importante nesse contexto.

Palavras-chave: [Técnica do furo incremental], [Liga de titânio Ti-6Al-4V], [Tensões residuais], [Tensões induzidas por furação], [Método dos elementos finitos], [ANSYS].

Abstract

This work aims the experimental and numerical study related to the drilling process in a titanium alloy (Ti-6Al-4V), in order to the improvement in its functional performance and life. It will be studied residual stresses induced by this process, which are sometimes responsible for the lack of mechanical components, or by its improvement in service and consequent increase of lifetime, when generated in a convenient way.

The technique we shall use in order to access to stresses will be based on the hole-drilling method, a measure process widely accepted for the residual stresses determination. The effects thermo-mechanical generated during the cutting of the material can create undesired residual stresses. In order to quantify these drilling-induced stresses it has been settled an experimental and numerical hybrid methodology, based on the hole-drilling method.

Through the use of this methodology, samples of the material in study are submitted to stresses stages, well -known during the drilling, using the overlap principle, aiming to abolish the initial effect of residual stresses which can exist before the drilling process. The quantification of deformations induced by the drilling process, and this way the induced stresses, is achieved comparing the relaxation curves of deformation, according the depth reached during the experimental calibration, with those obtained by numerical simulation of the whole experimental process. It is assumed that numerical curves are ideal, being the material removed without any physical contact. Therefore, the difference between relaxation curves of distortion according to the depth experimentally and numerically reached, will allow to evaluate the deformations induced by the drilling process.

Particularly, in this work, it was studied the effect caused by the drilling process, which, usually, is used with the normalized application of the drilling-induced method looking for the residual stresses determination in the majority of metal materials. In those drilling processes, milling cutters are used, subjugated to very high speeds (more than 100.000 rpm), due to the activation by turbines of compressed air. Changing air

pressure for feeding the actuation turbine for drilling, the study of the consequence of the cutting speed was allowed. On the other hand, selecting a given cutting speed, the results obtained were compared with different cutting tools. Although the results cannot be conclusive concerning the differences observed related to the variation of cutting speed used, it was found that the deformations induced by the cutting process were amazingly reduced in the range of the high speeds used.

In fact, mainly due to the low thermal conductivity of titanium alloys, is recognized the difficulty of drilling these alloys, in respect to the final weak dimensional accuracy of the holes. In this regard, the aeronautic industry, for example, has been looking for the improvement of this sort of manufacturing process.

The methodology used through this work can be an important contribution in this context.

Keywords [Hole-drilling method], [Titanium alloy Ti-6Al-4V], [Residual Stresses], [Drilling-induced stresses], [Finite element method], [ANSYS].

Índice

Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	x
Simbologia e Siglas	xi
Simbologia.....	xi
Siglas	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos.....	2
2. TENSÕES RESIDUAIS.....	3
2.1. Definição.....	3
2.2. Origem	5
2.3. Consequências	7
2.4. Medição	8
2.4.1. Métodos Destrutivos.....	8
2.4.2. Métodos Semi-destrutivos	9
2.4.3. Métodos Não Destrutivos	9
3. TÉCNICA DO FURO INCREMENTAL.....	11
3.1. Nota Histórica	11
3.2. Descrição	12
3.3. Tensões residuais não uniformes	14
3.3.1. Método integral	15
4. MATERIAL	19
4.1. Provetes.....	20
5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	22
5.1. Método Proposto.....	22
5.2. Equipamento	26
5.2.1. Máquina de tração e sistema de furação.....	26
5.2.2. Extensometria elétrica	28
5.2.3. Sistema de medida e aquisição de dados	29
5.2.4. Software GTR e cálculo das tensões residuais	30
6. PROCEDIMENTO NUMÉRICO	32
6.1. Introdução	32
6.2. Modelo numérico.....	33
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
7.1. Resultados.....	35
7.1.1. Ensaaios de tração	35
7.1.2. Calibração experimental.....	36

7.2. Resultados Numéricos (MEF) vs Resultados Experimentais	39
7.3. Discussão	44
8. CONCLUSÃO	51
8.1. Trabalho Futuro	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXO A	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tensões residuais e grãos.	5
Figura 2.2. Origem das tensões residuais.(3).....	6
Figura 3.1. Ilustração do furo incremental (3).....	14
Figura 3.2. Ilustração das constantes <i>aij</i> (4).....	17
Figura 4.1. Geometria e medidas do provete de Ti-6Al-4V.....	21
Figura 4.2. Provete de Ti-6Al-4V utilizado nos ensaios experimentais.....	21
Figura 5.1. Ilustração princípio da sobreposição. (41)	24
Figura 5.2. Fluxo exemplificativo do método baseado no princípio da sobreposição. (39) 25	
Figura 5.3. Célula de carga HBM U9B. (42)	26
Figura 5.4. Uma das amarradas utilizadas para fixar o provete ao tensómetro. (14)	26
Figura 5.5. Máquina de tração montada com a localização da célula de carga, amarras e o provete. (14)	27
Figura 5.6. Roseta de extensómetro Vishay CEA 13-062UM-120, Tipo B. (43)	28
Figura 5.7. Sistema completo e montado.	30
Figura 5.8. Software GTR utilizado no cálculo das tensões residuais.	30
Figura 7.1. [Curvas tensão-deformação de um ensaio de tração].....	36
Figura 7.2. [Transformada rápida de Fourier do som da turbina a diferentes pressões de ar 3 bar (acima) e 4 bar (abaixo) (esquerda). A variação da frequência rotacional das fresas como uma função de pressão de ar]. (41)	38
Figura 7.3. [Deformação elástica segundo <i>Ox</i>].....	40
Figura 7.4. [Deformação elástica segundo <i>Ox</i> , furo com 1,0 mm].	40
Figura 7.5. [Tensão segundo <i>Ox</i>].....	41
Figura 7.6. [Tensão segundo <i>Ox</i> , furo com 1,0 mm].	41
Figura 7.7. [Simulação da relaxação de deformação de um provete de Ti-6Al-4V].....	42
Figura 7.8. [Comparação dos resultados do método experimental a 3bar com o MEF].	43
Figura 7.9. [Relaxação de tensão em profundidade 3 bar].	43
Figura 7.10. [Relaxação de tensão em profundidade 2.5 bar]	44
Figura 7.11. [Deformação medida pelos extensómetros em profundidade].....	45
Figura 7.12. [Tensões Residuais Induzidas - 3 bar (TiN) Smoothing 10%].	45
Figura 7.13. [Deformação medida pelos extensómetros em profundidade].....	46

Figura 7.14. [Tensões Residuais Induzidas - 3 bar (WC) Smoothing 8%].	46
Figura 7.15. [Deformação medida pelos extensómetros em profundidade].....	47
Figura 7.16. [Tensões Residuais Induzidas - 2.5 bar (WC) Smoothing 5%].	47
Figura 7.17. [Deformação medida pelos extensómetros em profundidade].....	48
Figura 7.18. [Tensões Residuais Induzidas - 3,5 bar (WC) Smoothing 5%].	48
Figura 7.19. [Deformação medida pelos extensómetros em profundidade].....	49
Figura 7.20. [Exemplo Tensões Residuais Induzidas - 3 bar (2arestas) Smoothing 15%]..	49
Figura 7.21. [Relaxação de tensão diferencial em profundidade]	50

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Propriedades do material (38).....	20
Tabela 7.1. [Valores mínimos e máximos de força e tensão].....	37
Tabela 7.2. [Características dos ensaios].....	38
Tabela 7.3. [Valores das variáveis inseridas nas simulações dos ensaios.].....	39

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

σ^m, σ^M – Microtensão e macrotensão

ε - Deformação

E – Módulo de Elasticidade

ν - Coeficiente de Poisson

$\sigma_{min}, \sigma_{máx}$ - Tensão principal mínima e máxima

R – Distância de um ponto na superfície da amostra até ao centro do furo

β – Ângulo horário entre o eixo dos xx da roseta e a tensão principal máxima

$\sigma_{máx}$

R_0, D_0 - Raio e diâmetro do furo

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ e ε_3 - Deformações medidas nos extensómetros 1, 2 e 3

Z – Profundidade do furo

Z/D – Profundidade do furo adimensional

σ_{eq} – Tensão equivalente de Von Mises

F_1, F_2 - Forças mínima e máxima aplicadas na calibração

σ_1, σ_2 - Tensões totais quando aplicadas F_1 e F_2

$\sigma_{1cal}, \sigma_{2cal}$ - Tensões de calibração correspondentes a F_1 e F_2

σ_{RS} - Tensão residual

$\Delta\sigma$ – Tensão de calibração

$\Delta\varepsilon_{cal}(z)$ - Relaxação da deformação na calibração em função da profundidade

$\Delta\varepsilon_{FEM}(z)$ - Relaxação da deformação na simulação numérica em função da profundidade

$R_{p0,2}$ - Tensão de cedência

R_m - Tensão à tracção

R_a - Raio do furo (variável do ANSYS)

h_{max} - Profundidade máxima do furo (variável do ANSYS)

espinc – Profundidade de cada incremento (variável do ANSYS)

ros – Tipo de roseta (variável do ANSYS)

tensao – Tensão de calibração (variável do ANSYS)

EX1 – Módulo de Young (variável do ANSYS)

PRXY1 – Coeficiente de Poisson (variável do ANSYS)

Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials

APDL – ANSYS Parametric Design Language

MEF – Método dos elementos finitos

GTR – Grupo de Tensões Residuais

MI – Método integral

SI – Sistema internacional de unidades

TFI – Técnica do furo incremental

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Neste trabalho procedeu-se ao estudo experimental e numérico do processo de furação de ligas de titânio com vista à melhoria do seu desempenho funcional e vida. Com base na técnica do furo incremental, tem sido desenvolvido uma metodologia híbrida experimental e numérica para avaliar as deformações induzidas pelo processo de furação e, conseqüentemente, as tensões residuais induzidas por este tipo processo. A técnica do furo incremental é uma técnica bem aceite para a determinação de tensões residuais. Para além desta técnica, existem ainda outras técnicas destrutivas e não destrutivas. Nas não destrutivas temos o exemplo da técnica de difração por raios-X, difração de neutrões, métodos magnéticos e ultrassónicos. Com base na técnica do furo é possível determinar curvas de relaxação de deformação em função da profundidade do furo. A relaxação de deformação é medida à superfície, na proximidade do furo, usando extensómetros eléctricos, por exemplo, e é proporcional à relaxação das tensões que existiam em cada um dos incrementos ao longo da profundidade do furo. Deste modo, munidos com uma metodologia que permite determinar as deformações e tensões induzidas pela furação torna-se possível otimizar este tipo de processos. Assim sendo, serão estudadas as tensões residuais induzidas pela furação incremental devido a diferentes parâmetros de furação, comparando as curvas experimentais com as curvas numéricas. Para isso será feita uma análise detalhada das características do material, uma liga de titânio (Ti 6Al-4V). Quantificar-se-á o efeito de furação nestas ligas, no que concerne às tensões residuais parasitas introduzidas pela maquinagem. Para isso estudar-se-á diferentes operações de furação, parâmetros de corte e geometria de ferramenta com vista a melhorar o estado de tensão residual final no material. A tentativa de optimização do processo de furação será tida em conta ao longo do trabalho, por forma a validar a aplicação do método do furo incremental para medir tensões residuais neste material. Com todas estas fases procurar-se-

á provar a fiabilidade e vantagens desta técnica, visto ser uma técnica bastante utilizada na indústria que está em permanente procura de uma melhoria dos processos assim como de uma redução dos custos.

Para além disso, existem poucos estudos acerca da aplicabilidade desta técnica em ligas de titânio. A maior parte dos trabalhos desenvolvidos nesta área são em ligas de aço, o que desenvolve um interesse acrescido em torno da técnica quando aplicada neste tipo de material.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo o estudo experimental e numérico do processo de furação em ligas de titânio com vista a melhoria do seu desempenho funcional e vida. Esta melhoria pode ser conseguida monitorizando as deformações e as tensões residuais induzidas durante o processo de furação. Para obtermos as tensões induzidas procede-se a uma comparação de curvas de relaxação de deformação em função da profundidade, obtidas durante uma calibração experimental com as obtidas por simulação numérica de todo o processo experimental. Para tal foi necessário propor um procedimento para eliminar o efeito das tensões residuais que possam existir antes da furação. Este procedimento baseia-se no princípio da sobreposição, já utilizado por outros autores, e permite eliminar o efeito das referidas tensões pela utilização de uma tensão de calibração diferencial em vez de uma tensão de calibração absoluta.

O estudo centrar-se-á principalmente sobre o efeito da velocidade de corte e duas geometrias de fresas. Será quantificada a velocidade das fresas em função da pressão do ar de acionamento das turbinas, de maneira a estudar o efeito da velocidade de corte nas tensões residuais induzidas pela furação a alta velocidade.

2. TENSÕES RESIDUAIS

2.1. Definição

As tensões residuais são tensões estáticas que existem num corpo sólido elástico na ausência de esforços ou momentos exteriores aplicados. São tensões multiaxiais (1). Estas podem ser de natureza macroscópica ou microscópica. As macroscópicas são normalmente originadas por desajustamento estrutural entre componentes de uma mesma estrutura. Já as microscópicas são provocadas por deformações dos cristais ou grãos do material durante operações de aquecimento ou arrefecimento das peças ou até devido a processos de deformação plástica não homogénea realizados a frio. As tensões residuais podem ser de tração ou compressão, tendo, respetivamente, valor positivo ou negativo(2)(3)(4).

De maneira a agrupar as tensões residuais, classificam-se estas pelo método pelo qual são medidas, pela sua causa (e.g. incompatibilidade térmica ou elástica), ou através da escala pela qual se equilibram(5).

Por este ultimo critério referido, as tensões residuais são classificadas consoante a extensão da sua homogeneidade no domínio do material, i.e., em função da distância sobre a qual se equilibram. Desta maneira, as tensões residuais dividem-se em três tipos (3)(5)(6)(7):

- Tensões residuais de primeira ordem, σ^I : São homogéneas num grande domínio do material, ou seja, homogéneas em vários grãos. Têm natureza macroscópica equilibrando-se num grande domínio do material. Uma modificação do equilíbrio dos momentos e das forças internas dá origem a variações dimensionais macroscópicas. Exemplo destas tensões de primeira ordem são as pré-tensões resultantes de tratamentos de superfície em que o seu valor pode ser obtido por análise experimental ou por cálculo.
- Tensões residuais de segunda ordem, σ^{II} : Tensões de natureza microscópica que se encontram em equilíbrio em domínios de material reduzido (≈ 1 a $100 \mu m$). Geralmente têm origem na anisotropia dos grãos que não têm sempre a mesma

orientação (materiais monofásicos) ou devido às diversas fases constituintes do material, pois estas possuem diferentes propriedades mecânicas e térmicas, como diferentes coeficientes de dilatação. Uma variação das suas forças e momentos internos, que se encontram em equilíbrio à escala micrométrica, podem dar origem a alterações dimensionais macroscópicas.

- Tensões residuais de terceira ordem, σ^{III} : Tensões de natureza submicroscópica, não homogêneas, que se equilibram no interior do grão, em algumas distâncias interatómicas (< tamanho do grão). Como exemplo da sua origem temos os defeitos pontuais da rede cristalina, as deslocações, lacunas, entre outros. Nas tensões residuais de terceira ordem, não existe qualquer variação dimensional macroscópica quando se dá uma alteração das forças ou dos momentos. Assim, uma sobreposição destas ordens de tensão, dá origem a um estado de tensão residual nos materiais reais.

As tensões de primeira ordem são normalmente designadas por macrotensões, assim como as tensões de segunda e terceira ordem são designadas por microtensões. Isto deve-se ao facto de ser difícil distinguir as tensões de segunda e terceira ordem no caso dos materiais metálicos de grão fino.

As tensões residuais de compressão são exemplo de macrotensões que são introduzidas quando são feitos tratamentos de pré-tensão superficial nas camadas superficiais do material, com o intuito de aumentar a resistência à fadiga ou corrosão. Estes tratamentos podem ser realizados impondo deformações ao material por efeitos térmicos (tempera), termoquímicos (cementação, nitruração, etc) ou até mecânicos (granalhagem, martelagem, laminagem profunda, etc) (8).

A tensão residual total é igual à soma dos três tipos de tensões residuais:

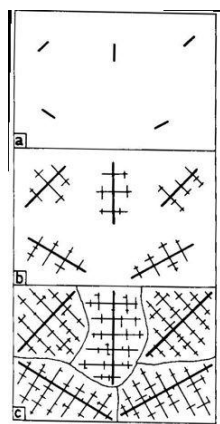
$$\sigma_{residual\ total} = \sigma^I + \sigma^{II} + \sigma^{III} \quad (2.1)$$

Ou seja, para o caso em que o grão é muito fino:

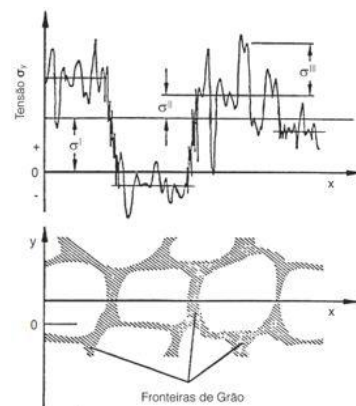
$$\sigma_{residual\ total} = \sigma^M + \sigma^m \quad (2.2)$$

Em que σ^M , σ^m representam, respetivamente, a macro e microtensão.

Grãos, ou cristais, são regiões do material que resultam de embriões que aparecem na massa metálica líquida e que se desenvolvem em todas as direções quando não existem barreiras ao seu desenvolvimento e desde que o gradiente térmico seja fraco. O grão é delimitado pela formação de um limite intercrystalino resultante do encontro de duas faces em crescimento. A esse limite dá-se o nome de *superfície limite do grão*. A sua formação está representada na Figura 2.1.



(a) Formação e crescimento de grãos



(b) Variação dos diferentes tipos de tensões residuais nos grãos de um material monofásico (9)(10)

Figura 2.1. Tensões residuais e grãos.

2.2. Origem

As tensões residuais estão normalmente presentes em todos os materiais devido aos habituais processos a que estão sujeitos durante o seu fabrico. Podem assim ter variadas origens. A nível de processos, podem ter sido criadas por processos de deformação plástica (laminagem, extração, extrusão, flexão, forjamento, granalhagem, etc.) ou por processos de fabrico (maquinagem, retificação, revestimento, soldadura, electrodeposição, CVD, PVD, etc.) que introduzem tensões residuais indesejáveis. Podem também ter origem nos tratamentos a que os materiais são sujeitos como tratamentos térmicos ou termoquímicos (têmpera, tratamento térmico a laser ou plasma, nitruração, carbonitruração, cementação, etc.). Os tratamentos superficiais são utilizados com a

finalidade de introduzir tensões residuais de compressão de modo a aumentar a resistência à fadiga dos materiais (2).

Fisicamente, podemos classificar a sua origem em três tipos:

- Origem mecânica: dá-se devido às deformações plásticas não uniformes criadas pelos processos de fabrico. Podem ser introduzidas intencionalmente com o objetivo de criar um determinado perfil de tensão num componente ou até ocorrer naturalmente durante o processamento.
- Origem térmica: quando as tensões residuais resultam, macroscopicamente, de operações de aquecimento/arrefecimento não uniformes. Microscopicamente, surgem no material devido à diferença entre os coeficientes térmicos de expansão das diferentes fases constituintes do material.
- Origem metalúrgica: neste caso, as tensões residuais surgem devido a reacções de transformação de fase que surgem, por exemplo, durante a soldadura, a têmpera ou outros processos. Estes são acompanhados pela libertação de calor latente, uma alteração de volume e um efeito de pseudo-plasticidade que influenciam também as tensões residuais do material.

Frequentemente, as tensões residuais têm origem numa combinação complexa de transferências calor, deformações mecânicas e variações metalúrgicas devido ao facto destas fontes de tensão estarem, por vezes e de alguma forma dependentes umas das outras, tal como mostra o esquema da Figura 2.2.



Figura 2.2. Origem das tensões residuais.(3)

É necessário compreender bem todos estes possíveis fenómenos para uma correta previsão do estado de tensões residuais. Para tal, são realizados ensaios experimentais combinados com simulações numéricas, visto que a solução analítica é normalmente impossível de ser aplicada.

2.3. Consequências

As tensões residuais têm efeitos que podem ser benéficos assim como prejudiciais, dependendo da sua magnitude, sinal e da sua distribuição. Na maioria das vezes, as tensões residuais são prejudiciais, devido ao facto de se sobreporem às tensões de serviço. No entanto, podem também ser benéficas, pelo facto de permitirem o aumento da tensão limite de fadiga em componentes solicitados dinamicamente (11). São então prejudiciais se forem tensões de tração e benéficas se de compressão. Isto devido ao facto das tensões de compressão diminuírem a tensão média e as de tração a aumentarem. Como exemplo de um efeito prejudicial, temos as tensões residuais de tração na superfície de um componente sujeito a carregamento de fadiga que podem conduzir a uma falha prematura, já que resulta num aumento da tensão média. Quando um componente está em serviço, a tensão total que atua sobre ele é igual à soma das tensões externas nele aplicadas com as tensões residuais já existentes no material, que são classificadas como cargas estáticas. No caso deste somatório ultrapassar um valor crítico (limite elástico do material), o componente entra em regime de deformação plástica que poderá conduzir à falha prematura da peça. Desta forma, poderá causar problemas em todo o sistema que se encontra inserida e reduzir o desempenho dos componentes através de um aumento dos danos causados por efeitos de fadiga, fluência ou degradação ambiental (12). No caso das tensões residuais terem um efeito benéfico, temos como exemplo as tensões internas de compressão. Já as tensões residuais de tração na superfície de um componente são prejudiciais pois aumentam a propensão do componente a efeitos de fadiga, corrosão, e outros.

Infelizmente, a presença destas tensões residuais passa muitas vezes despercebida, até que falhas ou um mau funcionamento ocorram (13).

2.4. Medição

Existem várias técnicas para a medição de tensões residuais. Temos como exemplo a técnica de remoção de camadas e curvatura, o método do furo com extensometria ou com processos óticos, difração de raios X e de neutrões, técnicas magnéticas e de ultra-sons, etc. Algumas destas técnicas utilizam processos mecânicos de relaxação de tensões para poderem ser medidas, noutras deteta-se a presença de tensões pelos efeitos nas propriedades dos materiais.

No caso da medição por métodos mecânicos incita-se uma perturbação no estado de equilíbrio inicial estabelecendo-se um novo estado de equilíbrio. A este método dá-se o nome de técnica de relaxação de tensões residuais. Existem ainda outras técnicas que permitem a medição das tensões pela variação que estas provocam nas características físicas do material. Devido a estas diferenças podemos agrupar as técnicas de medição de tensões residuais em dois grupos distintos: técnicas destrutivas e não destrutivas.

No caso das técnicas de relaxação é necessário proceder à medição das deformações superficiais após a relaxação das tensões instaladas. Para uma medição cuidada do estado de deformação pode-se utilizar a técnica de extensometria que recorre a uma formulação analítica para calcular as tensões residuais (11).

Cada uma das diferentes técnicas apresenta vantagens e desvantagens fazendo com que a sua escolha seja influenciada por diferentes critérios, como por exemplo, o tamanho da amostra, a precisão e a exatidão pretendidas para os resultados ou questões económicas. Por estas razões, muitas vezes é utilizado mais do que um método na medição das tensões (14).

2.4.1. Métodos Destrutivos

Os métodos destrutivos medem os efeitos da relaxação (e.g. deslocamento, deformação, etc.) e não a relaxação em si. Para isso é eliminado o estado de equilíbrio das tensões residuais existentes no material, sendo forçada a relaxação das tensões. Neste método cria-se um novo estado de tensão recorrendo a maquinaria ou à remoção de camadas de material. De seguida, identificam-se as mudanças na tensão local através da medição da deformação ou do deslocamento. Pode-se assim proceder ao cálculo da tensão

residual em função da deformação, recorrendo à Teoria da Elasticidade (analiticamente ou por simulação numérica) (2).

Exemplos de métodos destrutivos:

- Técnica de remoção por camadas,
- Técnica de seccionamento.

2.4.2. Métodos Semi-destrutivos

Algumas técnicas são consideradas semi-destrutivas pelo facto de ser possível reparar a amostra após o ensaio.

Exemplo de métodos semi-destrutivos:

- Técnica do anel central;
- Técnica do furo.

2.4.3. Métodos Não Destrutivos

As técnicas não destrutivas baseiam-se numa relação entre os parâmetros físicos ou cristalográficos da amostra (e.g. espaçamento interplanar da rede cristalina) e a tensão residual.

Exemplo de métodos não destrutivos (2)(5):

- Difração de raios-X:
Mede as deformações da rede cristalina pelas variações da distância interplanar do material. Pode ser aplicado até 20 μm de profundidade. Com esta técnica é possível medir três tipos de tensões residuais. σ^I e σ^{II} têm influência sobre o deslocamento dos picos do difractograma, já σ^{II} e σ^{III} alteram o alargamento dos picos.
- Difração de neutrões:
Esta técnica baseia-se nos mesmos princípios que a anterior. A diferença é que esta última utiliza feixe de neutrões em vez de raio X. Devido à natureza penetrante dos neutrões, esta técnica tem vantagens em relação à anterior pois com esta técnica é possível medir amostras até uma profundidade de 150 mm, dependendo do material. Para além disso, permite ainda uma descrição completa de estados de tensão complexos. No entanto,

tem também algumas desvantagens, como uma baixa disponibilidade e custo acrescido, devido ao facto de os neutrões necessários só estarem disponíveis em instalações que possuam reatores nucleares.

- Método ultrassónico:

Esta técnica tem como base a diferença da velocidade de propagação das ondas sonoras que se relacionam com o estado de tensão residual pela constante elástica de terceira ordem do material. É sensível aos três tipos de tensões residuais mas não possibilita a sua distinção.

- Método magnético:

Baseia-se na interação entre a magnetização e as constantes elásticas dos materiais ferromagnéticos. É sensível aos três tipos de tensões residuais mas não possibilita a sua distinção.

- Método termoelástico:

Tem como base a variação da temperatura provocada pela deformação elástica. Esta técnica está relacionada com a constante termoelástica do material podendo medir a deformação elástica com uma camera de infravermelhos.

- Método fotoelástico:

Baseia-se no efeito fotoelástico que consiste na variação anisotrópica da velocidade da luz quando o material é sujeito a uma tensão, para materiais transparentes.

3. TÉCNICA DO FURO INCREMENTAL

3.1. Nota Histórica

A origem da técnica do furo remonta ao ano de 1934 quando proposta por Mathar como uma técnica experimental de medição de tensões residuais com extensómetros mecânicos que mediam os deslocamentos em torno de furos circulares em placas tracionadas (15).

A precisão deste método foi melhorada em 1950 por Soete e Vancrombrugge (16) com a utilização de extensómetros elétricos. Em 1951 foi proposta a técnica do anel central por Milbradt, (17) que veio a sofrer melhorias em 1958 por Gunnert (2)(3).

Em 1956, foi publicada a primeira investigação da variação da tensão residual com a profundidade usando a técnica do furo, por Kelsey (18), que foi pioneiro na utilização de furos cegos. Graças aos estudos de Rendler e Vigness, em 1966 surge uma aplicação moderna desta técnica (19). Conseguiram ainda que esta técnica se transformasse num procedimento sistematizado e facilmente reproduzível. Definiram ainda, geometricamente, a roseta de extensómetros de tipo A da norma ASTM E 837-99 (2) (20).

Em 1971, houve um aperfeiçoamento do uso de jatos de ar abrasivo para maquinagem, a nível experimental, que permitiu a formação de um furo sem tensões induzidas pelo processo de furação, por Beaney e Procter (21).

Em 1976, foi proposta uma modificação à técnica de maneira a determinar tensões residuais em placas finas, por Nawwar et. al. (22). Bijak-Zochowki [24] apresentou, em 1978 (23), um método fiável para o cálculo de tensões residuais não uniformes em profundidade (2)(3).

Em 1981, Schajer (24) conseguiu o primeiro estudo teórico generalizado da TFI (técnica do furo incremental), tendo como base uma análise de elementos finitos (FEA) (2)(3).

Flaman, propôs, em 1982 (25), a furação a velocidades ultra-rápidas que consiste na utilização de pequenas fresas acionadas por uma turbina de ar comprimido, o

que faz com que haja uma redução na introdução das tensões residuais parasitas, conseguindo-se obter furos com geometrias bastante perfeitas.

A década de 1980 distingue-se pelo estudo das tensões residuais em profundidade, onde o crescente poder computacional disponível da altura facilitou o uso de técnicas de FEA avançadas no estudo de tensões residuais, o que não seria possível apenas com a calibração experimental.

Em 1994, Zhu e Smith (26) expuseram uma nova análise teórica de forma a aplicar a técnica em superfícies curvas e Schajer e Yang (27) desenvolveram a técnica de maneira a poder ser aplicada em casos de anisotropia elástica (e.g. compósitos reforçados com fibras, etc.) Em 1995, Tootonian e Schajer (28) propuseram que o furo fosse efetuado incrementalmente com um aumento progressivo de diâmetro de maneira a aumentar a sensibilidade na medição da relaxação de deformação. Dois anos depois, os mesmos investigadores apresentaram uma nova roseta, esta de 6 extensómetros, permitindo assim a medição da relaxação de deformação radial e tangencial, onde, em comparação com as rosetas retangulares anteriormente normalizadas, a sensibilidade na medição das deformações foi melhorada por um fator de 2,3 e a profundidade de avaliação aumentada em cerca de 1/3. Esta roseta foi classificada numa roseta do tipo C na revisão da norma ASTM E 837-99 (29).

3.2. Descrição

O método do furo (*hole-drilling method*) é um método mecânico que se baseia em relaxar as tensões existentes furando o material. A relaxação de deformação pode depois ser medida por extensometria ou por métodos óticos. É relativamente simples, versátil, económico, rápido, bem conhecido e com uma grande aplicabilidade na determinação de tensões residuais.

Este método apresenta também alguns inconvenientes. No caso do furo cego, a relaxação da tensão residual à superfície obtida com a furação está muito localizada na vizinhança da fronteira do furo e diminui rapidamente à medida que a distância ao furo aumenta. As dimensões dum extensómetro, tanto largura como comprimento são, normalmente, duas vezes o raio do furo, r_0 (2). Como a região coberta pelo extensómetro é muito grande relativamente à do campo de deformação relaxada, a deformação média

medida no interior desta zona, pode ser uma fraca aproximação da deformação real no ponto de calibração. Os métodos do furo incremental que utilizam rosetas *standard*, só podem medir as deformações no plano segundo as três direções dos seus extensómetros (11).

Algumas das restrições da técnica do furo são, outras vezes, devidas a erros e incertezas potencialmente elevados pelas imprecisões cometidas durante a furação (e.g. enviesamento da fresa, excentricidade do furo, rugosidade da superfície, má preparação da superfície da amostra, etc.).

Para além deste método existem ainda outros que medem as tensões residuais e que envolvem a destruição da amostra, a que lhes damos o nome de métodos destrutivos, como é o caso do seccionamento, remoção de camadas, entre outros. Por vezes, a técnica do furo é classificada como tal por implicar apenas a remoção de uma pequena parte do material da amostra que pode ser recuperada depois. Este caso é habitual em componentes de grandes dimensões (30).

O *efeito de plastificação* é outra limitação conhecida da TFI, que acontece sempre que o estado de tensão residual introduz deformações plásticas localizadas, provocadas pela concentração de tensões em torno do furo. Quando essa concentração de tensões local ultrapassa a tensão de cedência do material, o campo de deformações em torno do furo é modificado, ocorrendo uma sobrestimação das tensões residuais instaladas no material (2)(3)(31). A norma ASTM E 837 é uma referência internacionalmente aceite nesta matéria.

A técnica do furo incremental permite a análise das tensões não-uniformes em profundidade, com a medição de perfis e gradientes de tensão (30). O furo é feito por um conjunto de vários incrementos.

Esta técnica, que utiliza extensometria elétrica, tem uma correta aplicabilidade em materiais isotrópicos com comportamento elástico linear e cujas tensões residuais não ultrapassem 60% da tensão de cedência do material (32).

Resumindo o procedimento da medição de tensões residuais por extensometria elétrica, temos (33):

- No local da amostra onde se pretende determinar as tensões residuais procede-se à colagem da roseta de extensómetros;

- As grelhas dos extensómetros são ligadas a um dispositivo próprio para a medição das variações de potencial elétrico criadas pela relaxação das tensões (usualmente uma ponte de Wheatstone);
- Efetuam-se os vários incrementos do furo no centro geométrico da roseta, medindo-se as relaxações que cada um destes provoca;
- Utilizando relações matemáticas, efetua-se o cálculo da magnitude e da orientação das tensões residuais principais a partir das deformações medidas.

3.3. Tensões residuais não uniformes

Na prática da Engenharia o mais comum é depararmo-nos com casos em que os campos de tensões residuais são não uniformes, especialmente à superfície da amostra.

Estes campos de tensão são muitas vezes introduzidos por processos de fabrico (e.g. tratamentos de corte superficiais, granalhagem de pré-tensão, etc.) e têm elevados gradientes na superfície do material. A técnica do furo foi aperfeiçoada de forma a ser aplicada neste caso de estudo das tensões residuais não uniformes em profundidade, graças ao forte desenvolvimento dos métodos de cálculo numéricos.

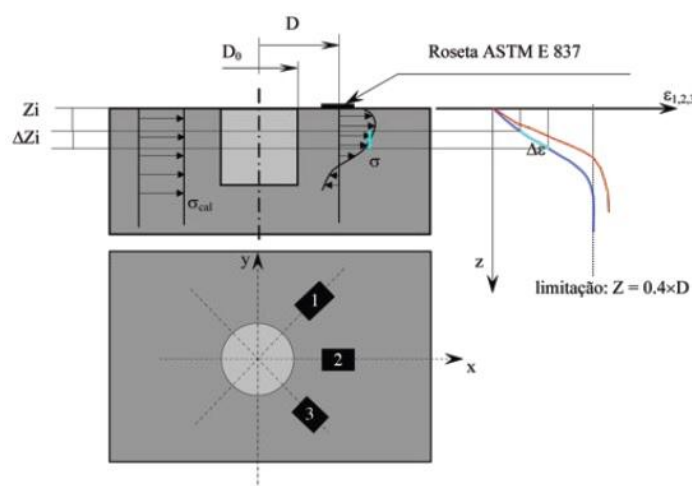


Figura 3.1. Ilustração do furo incremental (3).

O furo é feito de forma incremental de maneira a ser possível avaliar as tensões residuais. A profundidade máxima deste depende do diâmetro do furo, como mostra a

Figura 3.1. Desta forma, é então necessário calcular as tensões residuais presentes em cada incremento do furo, tendo como base a relaxação das deformações medida pelos extensómetros na superfície da amostra para que seja possível determinar as tensões residuais em profundidade. Para esse cálculo existem vários métodos, como:

- Método integral;
- Método da tensão média;
- Método da série de potências;
- Método diferencial.

O método utilizado nesta tese foi o método integral.

3.3.1. Método integral

O método integral (MI) é um método moderno de cálculo de tensões residuais que tem como base calibrações fiáveis providas de cálculos de elementos finitos. O MI foi proposto por Bijak-Zochowski (23) e posteriormente desenvolvido por vários autores (34)(35).

No caso do método integral, as deformações medidas durante a furação são o resultado acumulado da relaxação das tensões residuais existentes na zona de cada um dos sucessivos incrementos de profundidade, ao longo de toda a profundidade do furo. Este método tem como principal objetivo identificar o efeito das tensões existentes em cada incremento na tensão total (2).

No MI, os incrementos em profundidade feitos durante a furação e a medição das deformações possibilitam a obtenção do perfil das tensões residuais. Cada uma destas tensões, correspondentes a cada incremento, é constante e igual à média do perfil real da tensão nesse mesmo incremento (3).

Assim, a soma das deformações causadas pela relaxação das tensões em cada incremento, dá origem à deformação total medida.

Os componentes p_i , q_i e t_i , após i incrementos, são dados por:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_i = \frac{1 + \nu}{E} \sum_{j=1}^{j=i} \bar{a}_{ij} P_j \\ q_i = \frac{1}{E} \sum_{j=1}^{j=i} \bar{b}_{ij} Q_j \\ t_i = \frac{1}{E} \sum_{j=1}^{j=i} \bar{b}_{ij} T_j \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Com $1 \leq j \leq i$

P_j , Q_j e T_j são, respetivamente, as tensões hidrostática média, de corte a 45° e de corte ao longo do eixos xy , existentes no incremento j . \bar{a}_{ij} e \bar{b}_{ij} são as constantes de calibração que relacionam os componentes de tensão e deformação. Os fatores $(1 + \nu)/E$ e $1/E$ existem para que \bar{a}_{ij} e \bar{b}_{ij} sejam independentes do material.

A primeira equação de (3.1) pode ser escrita na forma matricial

$$p = \frac{1+\nu}{E} \bar{a}P \quad (3.2)$$

em que, para um furo de quatro incrementos,

$$p = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix} \quad \bar{a} = \begin{pmatrix} \bar{a}_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & 0 & 0 \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} & 0 \\ \bar{a}_{41} & \bar{a}_{42} & \bar{a}_{43} & \bar{a}_{44} \end{pmatrix} \quad P = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix}$$

O cálculo de q e t pode ser conseguido com equações similares a (3.2).

As constantes a_{ij} são constantes de calibração para um furo de profundidade i , em que o incremento j possui uma determinada tensão residual (Figura 3.2).

A matriz a é uma matriz triangular inferior em que o valor dos seus elementos depende da posição do incremento (j) e da profundidade do incremento (i). A relaxação de deformação devida à tensão aplicada num incremento é dada pelas colunas da matriz. Os incrementos são de posição constante mas fazem aumentar a profundidade do furo. Com o aumento do furo, o valor dos coeficientes aumenta devido à mudança na geometria. A

relaxação de deformação corresponde às linhas, Essa relaxação deve-se à tensão aplicada num incremento que se situa a uma profundidade crescente mas com profundidade total do furo constante.

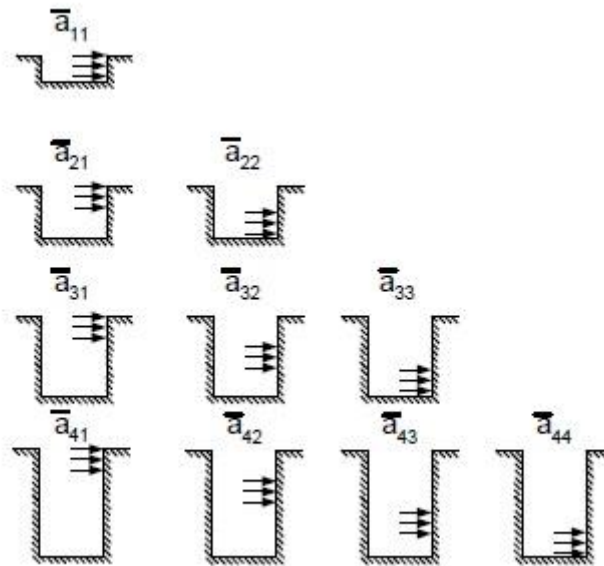


Figura 3.2. Ilustração das constantes \bar{a}_{ij} (4).

A combinação de todos os coeficientes de uma linha corresponde a um campo de tensão uniforme sobre a profundidade do furo (2).

No procedimento de cálculo para tensões não-uniformes todas as quantidades numéricas aparecem sob a forma de matrizes (2).

Tendo como base os estudos de Schajer (24)(36), o *Handbook of Measurement of Residual Stresses* (2) apresenta a seguinte metodologia para o cálculo das tensões residuais em campos de tensão não uniformes:

1. Recorrendo às seguintes equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} p = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{2} \\ q = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{2} \\ t = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{2} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Determina-se p, q e t com base nas deformações medidas pelos extensómetros.

2. Determina-se P, Q e T usando as equações (3.1)
3. Calcula-se o valor de $\sigma_{máx}$, σ_{min} , β , σ_x , σ_y e τ_{xy} usando as seguintes equações:

$$\sigma_{máx}, \sigma_{min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad (3.4)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{-T}{-Q} \right) \quad (3.5)$$

$$\sigma_x = P - Q \quad (3.6)$$

$$\sigma_y = P + Q \quad (3.7)$$

$$\tau_{xy} = T \quad (3.8)$$

onde σ_x , σ_y e τ_{xy} são, respetivamente, as tensões segundo O_x , O_y e de corte no plano O_{xy} , relativamente ao referencial e ao plano da roseta.

A principal limitação do MI está na obtenção dos coeficientes a_{ij} e b_{ij} por via experimental, tendo como alternativa a opção de recorrer ao método dos elementos finitos. Estes coeficientes foram determinados por Schajer (36) e podem ser aplicados a rosetas normalizadas na ASTM E 837.

No MI existem erros induzidos nos valores dos coeficientes de calibração que têm como origem a análise de elementos finitos, provocados por parâmetros inerentes a esta técnica, como é o caso do refinamento da malha. No entanto, também existem erros de natureza experimental, como na medição das deformações relaxadas e da profundidade do furo, que conduzem a imprecisões no cálculo das tensões. Estas imprecisões aumentam à medida que a profundidade aumenta, duplicando para cada incremento.

4. MATERIAL

Neste estudo foi utilizada a liga de titânio (Ti 6Al-4V). Trata-se de uma liga bastante utilizada comercialmente, possui aplicações em componentes aeroespaciais, aeronáuticos, automotivos, navais e médicos. As amostras tiveram a forma de provetes para ensaios de tração e foram maquinados a partir de chapas cedidas pela Airbus.

É uma liga alfa-beta ($\alpha - \beta$) que contém 6% de alumínio e 4% de vanádio. Exibe uma excelente combinação de resistência à corrosão, tenacidade, leveza e maleabilidade. Por estes motivos tem vindo a ser muito utilizada comercialmente com forte aplicação em componentes aeroespaciais, aeronáuticos, automotivos, navais e médicos. É a liga de titânio mais comum, responsável por mais de 50% do consumo total de titânio. No entanto, o titânio tem uma baixa condutividade térmica pelo que, sendo difícil escoar o calor gerado durante a furação, podem surgir tensões residuais altas com deformações algo elevadas que conduzem a furos com geometria irregular.

É recomendada para uma utilização em temperaturas de serviço até aproximadamente $350^{\circ}C$. Forma espontaneamente uma película estável após a exposição ao oxigénio no ar ou na água, o que explica a sua excelente resistência à corrosão. Pode ser trabalhada a quente por meio de métodos convencionais, tais como a laminagem a quente, forjamento e prensagem a quente. Normalmente, o trabalho a quente é feito no intervalo de 870 a $980^{\circ}C$ ($1600 - 1800^{\circ}F$). A resistência à deformação de Ti 6Al-4V decai rapidamente com a temperatura, tornando-se prontamente moldável a temperaturas intermédias.

Em geral, são recomendadas baixas velocidades de corte e o processo nunca deve ser interrompido enquanto a ferramenta de trabalho está em contacto com o material. Não é recomendada para aplicações de desgaste (37).

As características principais da liga encontram-se resumidas na tabela Tabela 4.1:

Tabela 4.1. Propriedades do material (38)

Propriedades	Valor	Unidades
Massa volúmica (ρ)	4430	Kg.m^{-1}
Módulo de Young (E)	113,8	GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,342	-
Limite elasticidade 0.2% ($R_{p0,2}$)	880	MPa
Resistência à rutura (R_m)	950	MPa
Alongamento (A)	14 %	-
Condutividade térmica (λ)	6,7	$\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
Capacidade térmica mássica (γ)	526,3	$\text{J.Kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
Tenacidade	75	$\text{MPa.Kg}^{1/2}$
Temperatura de fusão (T)	1660	°C

4.1. Provetes

A geometria dos provetes seguiu uma série de requisitos como (14):

- A zona útil tem uma geometria e dimensão adaptada às rosetas de extensómetros que têm que ser coladas;
- A zona útil tem ainda que ser projetada tendo em consideração a limitação da carga máxima da máquina de ensaios de tração, que é de 20kN;

- Foi tido em conta a concentração de tensões na zona do pino-furo e na zona de curvatura de maneira a que se desse deformação plástica esta ocorresse na zona útil.

As chapas tiveram que ser maquinadas até se conseguir obter uma espessura de 4 mm.

Depois de todas estas restrições terem sido tidas em conta, chegou-se à geometria do provete apresentada na Figura 4.1. A Figura 4.2 mostra um dos provetes a utilizar na calibração experimental.

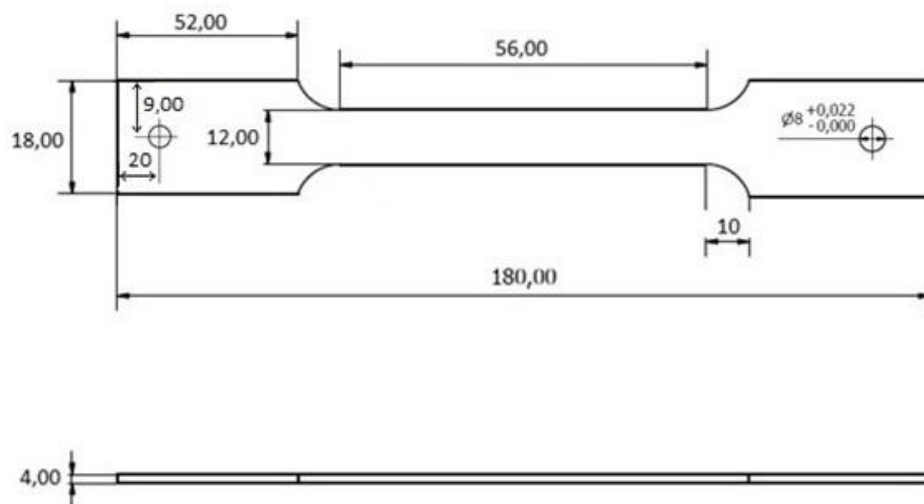


Figura 4.1. Geometria e medidas do provete de Ti-6Al-4V.



Figura 4.2. Provete de Ti-6Al-4V utilizado nos ensaios experimentais.

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1. Método Proposto

Este trabalho experimental consiste na aplicação prática do método do furo incremental apoiado na análise numérica recorrendo ao software ANSYS Multiphysics 14.5.

Com este trabalho pretende-se saber o impacto da furação na formação de tensões residuais, para além das já existentes. Os trabalhos mais relevantes nesta área desenvolvidos até hoje são normalmente aplicáveis a materiais metálicos nos quais é possível atingir um estado livre de tensões residuais a partir de tratamentos térmicos apropriados. Para além disso, as suas conclusões são maioritariamente qualitativas.

Os materiais modernos, como é o caso de alguns polímeros e compósitos cujas tensões residuais iniciais não podem ser aliviadas por tratamento térmico, não têm ainda um estudo aprofundado e detalhado acerca das suas tensões residuais (39). Assim sendo, foi desenvolvido um método possível de determinar o efeito da furação com maior precisão e de aplicabilidade global em termos de materiais.

O objetivo deste método é então melhorar e otimizar as operações de furação na aplicabilidade da técnica do furo em vários tipos de materiais, em que se compara o campo de relaxação das deformações obtido por calibração experimental e simulação numérica.

Na calibração experimental utiliza-se então a técnica do furo incremental para a medição das deformações submetendo a amostra a uma força de tração bem definida. Esta calibração experimental é então comparada à simulação numérica em casos de tensões já bem conhecidas. Como resultado das duas situações temos um conjunto de curvas que mostram a variação da relaxação da deformação em função da profundidade do furo.

A relaxação de deformação ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) aumenta com a profundidade do furo (embora o gradiente diminua). O furo é normalmente feito até uma profundidade de pelo menos $Z/D = 0,4$ (de forma a maximizar o sinal).

Para quantificar as deformações induzidas pelo processo de furação, procede-se a uma comparação direta dos campos de relaxação de deformação quer experimental, quer numérico. Para tal é preciso ter em atenção às tensões residuais já existentes no material antes da furação. Para isso foi utilizada uma calibração experimental diferencial baseada no princípio da sobreposição, ilustrado na Figura 5.1, que é normalmente utilizado para obter a tensão ou o deslocamento num ponto de uma amostra quanto está sujeita a uma situação de carga complexa.

Para uma correta aplicação deste princípio é necessário ter em atenção duas condições, que o comportamento elástico linear se verifica na amostra e que a força aplicada não muda significativamente a geometria original da amostra, de modo à direção e ponto de aplicação das forças e ainda os seus momentos não se alterarem.

Então a fase experimental consiste num determinado número de passos (14):

1. Verifica-se a linearidade do comportamento de tensão deformação do material, corroborando assim o princípio da sobreposição;
2. Traciona-se a amostra com uma carga uniaxial F_1 bem conhecida, efetuando o primeiro incremento. A roseta de extensómetros colocada no provete mede então a deformação provocada pelo primeiro incremento;
3. Aumenta-se a carga de tração para um valor máximo F_2 e mede-se mais uma vez a deformação criada (tendo em atenção qual o valor de F_2 utilizado para não se correr o risco de ocorrer deformação plástica em torno do furo);
4. Reduz-se a carga para F_1 centrando a máquina no furo já existente;
5. Repetem-se os pontos anteriores até se atingir um furo com uma profundidade aproximadamente igual ao seu diâmetro;
6. Concluída esta fase experimental, traça-se uma curva representativa da relaxação da deformação em função da profundidade do furo $\Delta\epsilon_{cal}(z)$, para cada extensómetro.

Durante o ensaio de tração é então aplicada uma carga axial F_1 . A tensão final resultante é conseguida por (40):

$$\sigma_1 = \sigma_{RS} + \sigma_{1cal} \quad (5.1)$$

Em que σ_{RS} é o valor da tensão residual já existente e σ_{1cal} é a tensão de calibração aplicada e bem conhecida, à qual corresponde a carga F_1 .

Quando for aplicada uma força superior a esta, por exemplo F_2 , temos:

$$\sigma_2 = \sigma_{RS} + \sigma_{2cal} \quad (5.2)$$

Como se assume que o material não sofre deformação plástica, o valor de σ_{RS} mantém-se constante. É então possível calcular a diferença entre estes dois estados de tensão de modo a eliminar o efeito da tensão residual já existente:

$$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 = (\sigma_{RS} + \sigma_{2cal}) - (\sigma_{RS} + \sigma_{1cal}) = \sigma_{2cal} - \sigma_{1cal} = \Delta\sigma_{cal} \quad (5.3)$$

A Figura 5.1 ilustra o princípio da sobreposição aplicado ao método:

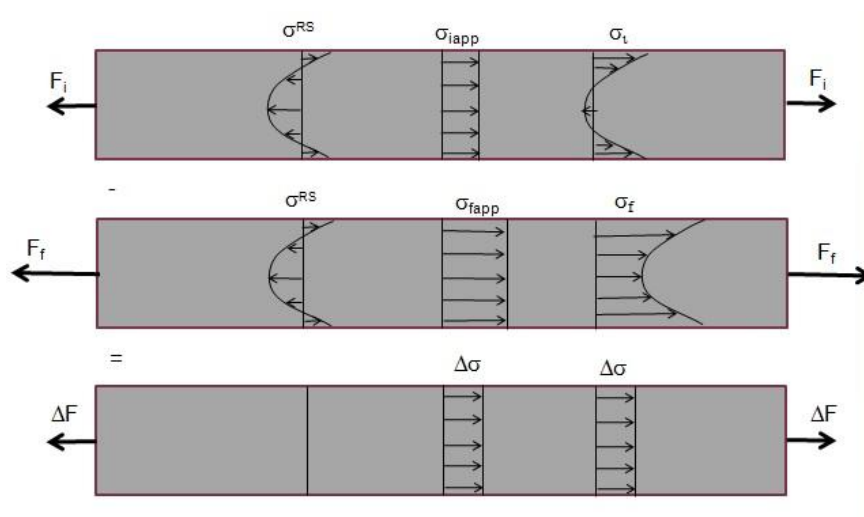


Figura 5.1. Ilustração princípio da sobreposição. (41)

O processo de calibração será simulado recorrendo ao método dos elementos finitos (MEF) em que todos os parâmetros experimentais e geométricos são tidos em consideração, com exceção das tensões residuais já existentes.

A simulação vai assim criar uma situação de uma amostra com as mesmas dimensões, propriedades mecânicas e condições experimentais, mas em que o furo criado é perfeito, sem indução de tensões residuais.

Desta vez obtemos as curvas de deformação em função da profundidade de um modo ideal, $\Delta\varepsilon_{FEM}(z)$.

Procedendo à diferença entre os valores obtidos da relaxação da deformação por via experimental e por via numérica, é possível então calcular as deformações induzidas pelos efeitos termo-mecânicos da furação:

$$\Delta\varepsilon_{ind}(z) = \Delta\varepsilon_{cal}(z) - \Delta\varepsilon_{FEM}(z) \tag{5.4}$$

Este método encontra-se esquematizado no fluxo da Figura 5.2:

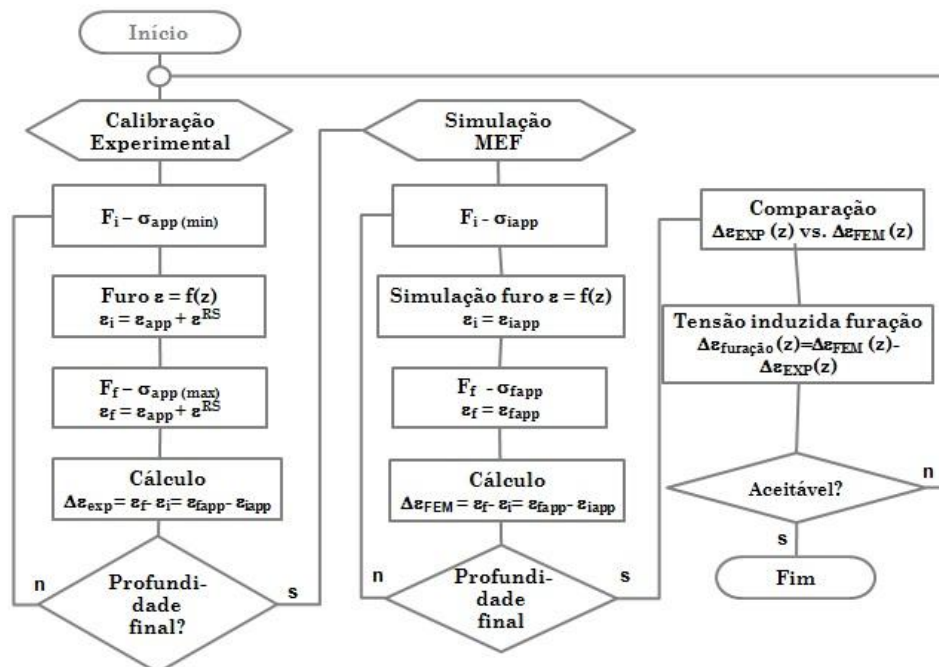


Figura 5.2. Fluxograma exemplificativo do método baseado no princípio da sobreposição. (39)

5.2. Equipamento

5.2.1. Máquina de tração e sistema de furação

A máquina utilizada para a parte experimental, é uma máquina de tração da marca Monsanto onde é possível aplicar uma carga até 20kN sobre o material em estudo.

Essa tensão é imposta manualmente por uma manivela. A força exercida sobre esta é medida por uma célula de carga HBM U9B, como a apresentada na Figura 5.3, que mede uma força máxima de 50kN.



Figura 5.3. Célula de carga HBM U9B. (42)

O provete encontra-se fixado na máquina com a ajuda de umas amarras concebidas para suportar uma força máxima de 20kN, como mostra a Figura 5.4.

A Figura 5.5 mostra todo o sistema montado.



Figura 5.4. Uma das amarradas utilizadas para fixar o provete ao tensómetro. (14)

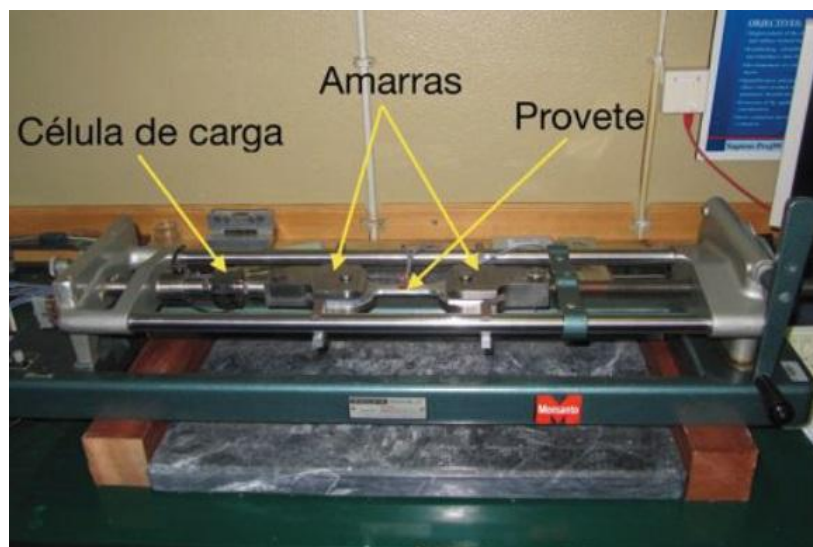


Figura 5.5. Máquina de tração montada com a localização da célula de carga, amarras e o provete. (14)

A furação incremental é feita recorrendo a um sistema de furação RS-200 da Vishay que contém um suporte que permite regular com exatidão a posição de uma turbina a ar na qual é montada a fresa que efetua a furação.

Para se conseguirem resultados corretos existem certos parâmetros que devem ser bem controlados, como a nivelamento do sistema relativamente à superfície da amostra e a centragem relativamente ao centro da roseta assim como o controlo da profundidade do furo.

Quando a fresa toca no provete existe o risco de flexão desta. O sistema RS-200 já possui um mecanismo de anti-flexão que anula o momento fletor sobre o provete.

As fresas utilizadas neste trabalho foram fresas do tipo cone invertido com 1,6 mm de diâmetro revestidas a carboneto de tungsténio (WC). Foi também utilizada uma fresa de nitreto de titânio (TiN) num dos ensaios.

Para avaliar o efeito do tipo de fresa utilizado na introdução das tensões residuais, repetimos alguns dos ensaios com uma broca de duas arestas.

A velocidade de corte da fresa, que está relacionada com a sua frequência de rotação, foi mais um parâmetro a ter em conta na influência da furação na introdução de tensões residuais. Devido ao facto de esta variável ser proporcional à pressão do ar que é

fornecido à turbina, realizaram-se ensaios para três frequências de tração diferentes, 2.5, 3 e 3.5 bar.

5.2.2. Extensometria elétrica

A medição das deformações é medida com extensómetros elétricos, introduzidos em 1950 por Soete e Vancrombrugge (16), que nos permitem obter medições mais precisas do que os antigos extensómetros mecânicos.

O modelo para a determinação de tensões residuais pela técnica do furo incremental, encontra-se na norma ASTM E 837-08 (32).

Esta norma apresenta três tipos de roseta, A, B e C.

A roseta de tipo A é a mais utilizada, mas a roseta B é bastante útil para casos com zonas de acesso difícil, devido à disposição dos seus extensómetros. Este foi um dos motivos pelo qual o estudo foi feito com este tipo de extensómetros, B.

Os provetes utilizados nos ensaios foram instrumentados com uma roseta de extensómetros Vishay CEA 13-062UM – 120, como apresentado na Figura 5.6. A Figura 5.7 mostra as rosetas de tipo A e C.

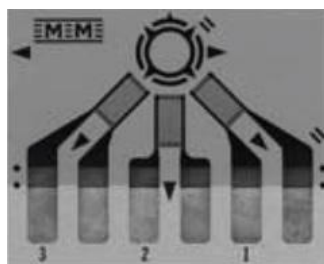
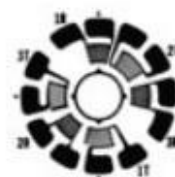


Figura 5.6. Roseta de extensómetro Vishay CEA 13-062UM-120, Tipo B. (43)



Tipo A



Tipo C

Figura 5.7. Rosetas de extensómetros Tipo A e Tipo C. (32)

Esta roseta é autocompensada, mas utilizou-se um outro provete com uma roseta de extensómetros idêntica para uma compensação do efeito da temperatura, que é um dos problemas da medição de deformações por extensometria, que pode provocar alteração nas dimensões do material em estudo que possui um determinado coeficiente de expansão térmica.

5.2.3. Sistema de medida e aquisição de dados

O sistema de medida e aquisição de dados tem que ser um sistema em que a resistência do extensómetro seja determinada com precisão. Trata-se de uma situação complicada devido ao facto de as deformações medidas pelos extensómetros serem de valor muito baixo.

Assim, este sistema tem como primeiro componente o próprio extensómetro, que converte a deformação numa variação de resistência eléctrica.

O segundo componente é uma ponte de Wheatstone, sendo este um circuito de medição que equivale a dois divisores de tensão em paralelo. Neste caso, os extensómetros estão ligados em quarto de ponte, ou seja, a resistência dos braços da ponte é desempenhada pelo extensómetro.

É necessário fornecer energia ao extensómetro e ao sistema para desenvolver um sinal, energia esta fornecida por uma fonte de tensão eléctrica alternada.

O sistema possui também um amplificador que amplifica o sinal de saída da ponte, que tem normalmente valores muito reduzidos. Trata-se assim do terceiro componente.

O quarto e último componente é normalmente um computador, que permite ao utilizador visualizar e armazenar os dados obtidos.

Neste estudo, o sistema HBM Spider8-30 é a fonte de aquisição dos valores das deformações medidas pelos extensómetros. Está ligado a um computador por uma interface RS-232.

Este sistema electrónico de medição para PC consegue a medição eléctrica das variáveis mecânicas tais como deformação, força, pressão, entre outras.

O software que apresenta os dados no computador é o catman® Express 4.0 da HBM. O sistema completo e montado é apresentado na Figura 5.8.



Figura 5.8. Sistema completo e montado.

5.2.4. Software GTR e cálculo das tensões residuais

O software GTR, desenvolvido pelo Grupo de Tensões Residuais da UC, Figura 5.9, foi o software utilizado para o cálculo das tensões residuais a partir das deformações obtidas por extensometria elétrica. Com este software é possível fazer o cálculo das tensões residuais por diferentes métodos de avaliação. Neste trabalho optou-se pelo método integral (MI).



Figura 5.9. Software GTR utilizado no cálculo das tensões residuais.

Na fase de aquisição do sinal das deformações é possível ocorrer alguns erros de leitura que podem ser uniformizados selecionando a opção que o programa disponibiliza de suavização das curvas de deformação através de aproximações polinomiais (*smoothing*).

Com o software GTR é possível obter nos resultados finais, para cada incremento, as seguintes grandezas:

- σ_1 : tensão principal máxima (MPa);
- σ_2 : tensão principal mínima (MPa);
- τ_{max} : tensão de corte máxima (MPa);
- σ_x : tensão segundo Ox , no referencial da roseta (MPa);
- σ_y : tensão segundo Oy , no referencial da roseta (MPa);
- τ_{xy} : tensão de corte no plano xy (MPa);
- β : ângulo horário entre o eixo Ox da roseta e σ_1 ($^\circ$).

6. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

6.1. Introdução

O ANSYS é um programa que possui uma linguagem paramétrica conhecida como APDL (*ANSYS Parametric Design Language*), que foi utilizada para criar scripts com as instruções necessárias para a obtenção dos valores de $\varepsilon_{FEM}(z)$. Neste trabalho recorreu-se ao ANSYS Multiphysics 14.5.

O *Método dos Elementos Finitos* (FEM) é o procedimento numérico utilizado para a obtenção da solução aproximada de um sistema de equações diferenciais.

A resolução destas mesmas equações, sujeitas a algumas condições, permite a previsão aproximada de um certo fenómeno físico, sabendo as condições às quais está sujeito (44).

A resolução dos problemas apoia-se em três ambientes do programa, ou seja, divide-se em três fases:

1. Pré-processamento:

Estabelece a geometria do problema definindo-a em termos de linhas, áreas e volumes. Definidos estes limites físicos, procede-se à escolha do tipo de elemento a ser usado na discretização do objeto, ou seja, dividi-lo em vários elementos de tamanho menor, *meshing*.

2. Solução:

Fase em que as cargas e constrangimentos são especificados e aplicados ao modelo 3D. Aqui, nesta fase, acontece a simulação da furação.

3. Pós-processamento:

Fase em que é possível a visualização personalizada dos resultados da simulação. É possível obter uma lista dos deslocamentos nodais, forças e

momentos de cada elemento, gráficos de deflexão e diagramas de contorno de tensão ou mapas de temperatura (44).

Nesta fase define-se as zonas da superfície que correspondem ao local onde estão colocados os extensómetros da roseta no modelo 3D.

O pós-processamento tem como principal função a integração das deformações na área dos extensómetros.

Nesta fase consegue-se o que o extensómetro real mede, ou seja, um valor médio da deformação radial debaixo da área que cobre.

6.2. Modelo numérico

Depois dos testes de calibração experimental, a simulação numérica da técnica de furo incremental foi realizada onde todos os parâmetros experimentais e geométricos foram tidos em consideração. O modelo usa elementos quadráticos estruturais de 8 nós 3D SOLID 185 (45) e foi parametrizado de modo a ser aplicado em diferentes geometrias do furo, minimizando as alterações no script APDL. A malha dos elementos finitos foi modelada considerando 1/4 do modelo, com dois planos de simetria. Durante a fase do processo numérico, o processo de furação foi sempre simulado incrementalmente no modelo MEF, usando “*birth and death*” no código ANSYS (45). A espessura de cada incremento de profundidade introduzida no modelo foi igual à usada durante os testes experimentais (~50µm).

Quando o *script* é carregado, surge uma janela de diálogo onde são inseridos os diferentes parâmetros necessários para a construção do modelo 3D da chapa (14):

- Ra – Raio do furo [mm].
- hmax – Profundidade máxima do furo [mm].
- espinc – Profundidade (espessura) de cada incremento [mm].
- ros – Tipo de roseta (ASTM). Dependendo do tipo de roseta usado, os extensómetros têm dimensões e disposições distintas. Como tal, as áreas nas

quais é necessário fazer a integração das deformações são diferentes. Existem 5 opções (tipos) para este parâmetro: A pequena, A média, A grande, B e C.

- *tensao* – Tensão de calibração $\Delta\sigma$ (aplicada segundo o eixo dos *xx*) [MPa].
- *EX1* – Módulo de elasticidade [MPa].
- *PRXY1* – Coeficiente de Poisson.

O resultado final deste *script* é o modelo tridimensional de um quarto de uma chapa.

Os valores destes parâmetros são apresentados na Tabela 7.3.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. Resultados

Ao longo deste capítulo serão apresentados todos os resultados deste estudo. Será feita uma análise acerca dos ensaios de tração de forma a determinar o comportamento elástico dos provetes. Será também discutida a calibração experimental para um estudo detalhado das tensões residuais já existentes nos provetes assim como as tensões induzidas pelo processo de furação.

Os gráficos de tensão residual apresentados ao longo desta secção foram calculados com o método integral (MI).

7.1.1. Ensaios de tração

De maneira a avaliar do comportamento elástico e linear da liga de titânio numa gama de tensões bem conhecidas e aplicadas a cada uma delas, foi feito um ensaio de tração antes de cada calibração experimental.

Essa gama de tensões variou até a um carregamento mínimo de 1000 N até um posterior carregamento máximo de 10000 N.

Com estes ensaios até um carregamento máximo é ainda possível obter o valor das deformações dos extensómetro antes do furo, valores estes necessários ao cálculo das deformações induzidas. Para cada um dos extensómetros são traçadas curvas de tensão-deformação, representadas na Figura 7.1:

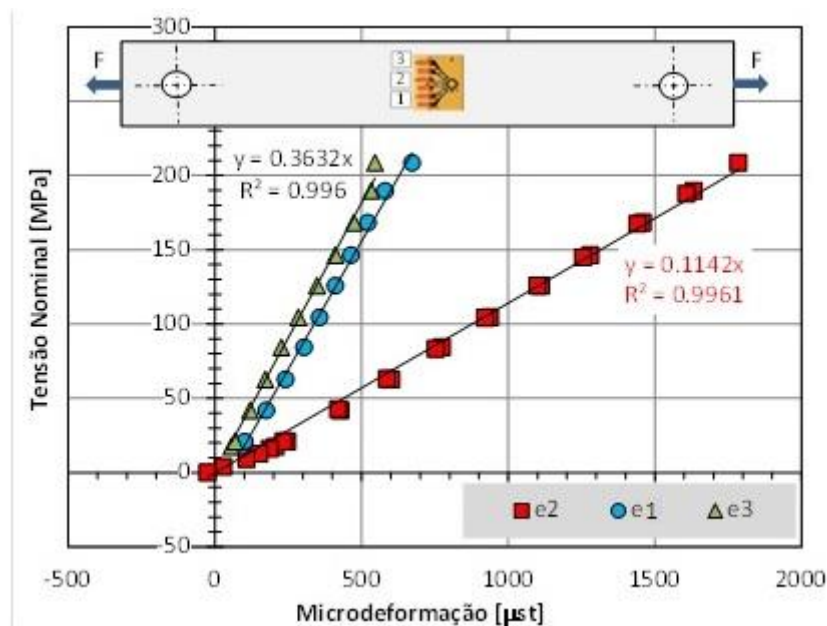


Figura 7.1. Curvas tensão-deformação de um ensaio de tração.

Os ensaios de tração permitem também calcular as constantes elásticas da liga de titânio usada neste estudo. Pela Figura 7.1 pode ver-se que o valor do módulo de Young medido foi cerca de 114GPa, um valor muito próximo do referenciado por outros autores sobre este material. Esta variável tem um papel bastante importante por ser necessária à simulação numérica e ao cálculo das tensões residuais. Este resultado permite também validar os valores das deformações medidas pelo sistema de medida utilizado.

7.1.2. Calibração experimental

Na calibração experimental foram usadas rosetas Vishay CEA 13-062UM-120. A zona útil do provete, onde estas foram colocadas, teve as dimensões calculadas de maneira a que aplicando a força de tração máxima esta não entrasse em regime de deformação plástica, como mostra a Tabela 7.1:

Tabela 7.1. [Valores mínimos e máximos de força e tensão]

Material	Área efectiva [mm ²]	Valor mínimo		Valor máximo		$\Delta\sigma$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]
		F_1 [N]	σ_1 [MPa]	F_2 [N]	σ_2 [MPa]		
Ti-6Al-4V	48	1000	21	10000	209	187,5	880

Após o cálculo das tensões para uma força de 1000 e 10000 N é notório que estes valores conduzem a tensões bastante inferiores à tensão de cedência ($R_{p0,2}$), mesmo considerando um coeficiente estático de concentração de tensões igual a 3, correspondente a uma placa com um furo e sujeita a um estado uniaxial de tensão.

Foram efetuados vários ensaios a 2.5 bar, 3 bar e 3.5 bar de maneira a verificar a repetibilidade dos resultados. Após uma análise detalhada verificou-se que a pressão a 3 bar forneceu os melhores resultados, como se verificará adiante. Para esta pressão do ar de alimentação da turbina a ar comprimido, repetiram-se os ensaios para uma geometria da fresa diferente.

Os furos foram efetuados incrementalmente usando 10 incrementos iguais a 0,1016 mm, obtendo-se uma profundidade máxima de 1,016 mm controlada por um micrómetro, elemento integrante do sistema RS-200. Este micrómetro tem uma escala em polegadas, em que cada traço corresponde a 1/1000 de polegada, ou seja, 0,0254 mm.

Os resultados do cálculo das tensões são complicados de obter para o primeiro incremento por influência da dificuldade da determinação do zero.

As principais características dos ensaios realizados encontram-se organizadas na Tabela 7.2:

Tabela 7.2. [Características dos ensaios]

Ensaio	Pressão (bar)	Material/Geometria	Diâmetro (mm)
N.º 1	3	TiN Fresa de 6 arestas	1,84
N.º 2	3	WC Fresa de 6 arestas	1,84
N.º 3	3	WC Fresa de 6 arestas	1,82
N.º 4	2,5	WC Fresa de 6 arestas	1,79
N.º 5	3,5	WC Fresa de 6 arestas	1,82
N.º 6	3	WC Fresa de 6 arestas	1,83
N.º 7	3	WC Fresa de 6 arestas	1,83
N.º 8	2,5	WC Fresa de 6 arestas	1,86

A velocidade de corte foi avaliada por análise da frequência do som produzido pela turbina através de um algoritmo de uma transformada rápida de Fourier (FFT) (41). A Figura 7.2 mostra os resultados obtidos.

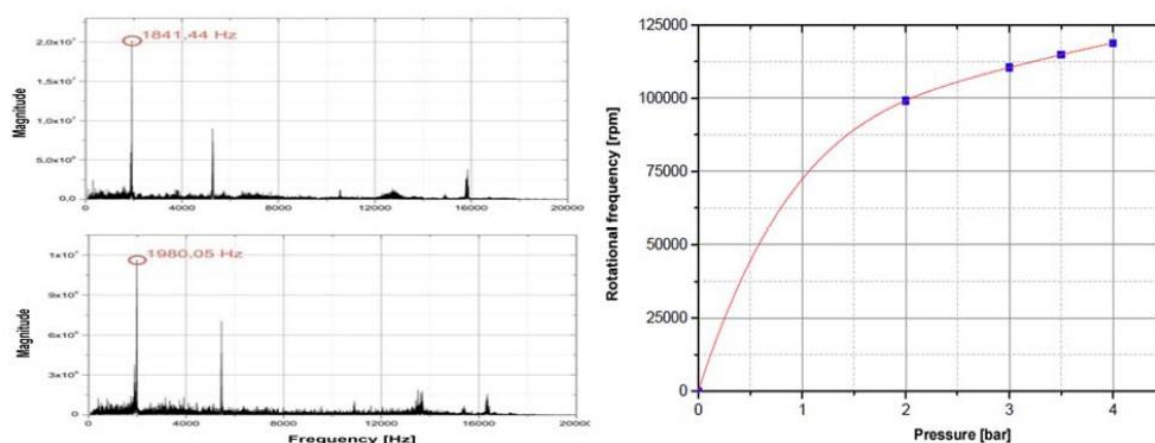


Figura 7.2. [Transformada rápida de Fourier do som da turbina a diferentes pressões de ar 3 bar (acima) e 4 bar (abaixo) (esquerda). A variação da frequência rotacional das fresas como uma função de pressão de ar]. (41)

Para a pressão de 3 bar, com a fresa de carboneto de tungstênio (WC), foram realizados três ensaios para verificar a sua repetibilidade. Os resultados foram bastante

próximos, sendo então a discussão centrada apenas em um deles. Já no caso da pressão a 2,5 bar, foram realizados também três ensaios mas um dos quais não chegou a ser considerado por se afastar demasiado dos restantes.

Depois de todos os ensaios realizados e de obter os valores de deformação fornecidos pelos extensómetros, foi feita uma média entre cada extensómetro de cada ensaio para a respetiva pressão.

Obtida esta média, utilizamos os valores na diferença entre estes e os valores obtidos por MEF, conseguindo assim os valores das deformações induzidas.

7.2. Resultados Numéricos (MEF) vs Resultados Experimentais

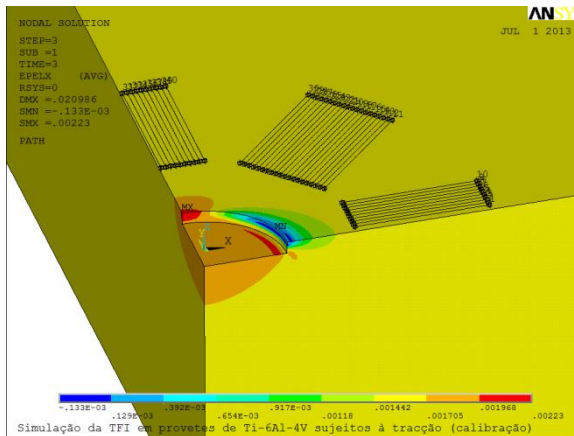
Na simulação numérica dos ensaios experimentais foram inseridas algumas variáveis no script desenvolvido pelo grupo de tensões residuais.

Na Tabela 7.3 são apresentados os valores das variáveis inseridas em todas as simulações.

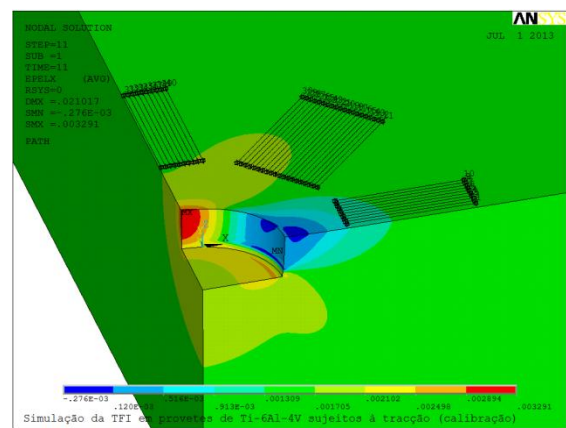
Tabela 7.3. [Valores das variáveis inseridas nas simulações dos ensaios.]

Ensaio	Tipo Roseta	D_{roseta}	Esp. (mm)	Esp. Inc.	E (GPa)	ν	D (mm)	σ (MPa)
3 bar (TiN)	B	5,13	4	0,05	114	0,342	1,84	187,5
3 bar (WC)	B	5,13	4	0,05	114	0,342	1,83	187,5
2,5 bar (WC)	B	5,13	4	0,05	114	0,342	1,83	187,5
3,5 bar (WC)	B	5,13	4	0,05	114	0,342	1,82	187,5
3 bar (2arestas)	B	5,13	4	0,05	114	0,342	1,92	187,5

Os gráficos de contornos das simulações obtidas no ANSYS estão apresentados na Figura 7.3 à Figura 7.6. Estes gráficos simulam os resultados nodais da deformação elástica e da tensão segundo O_x e O_y para 0,1 mm, 0,5 mm e para o furo completo. Estas imagens ilustram ainda a concentração de tensões, que como se pode constatar aumentam com a profundidade do furo.



(a) Furo com 0,1 mm.



(b) Furo com 0,5 mm.

Figura 7.3. [Deformação elástica segundo O_x]

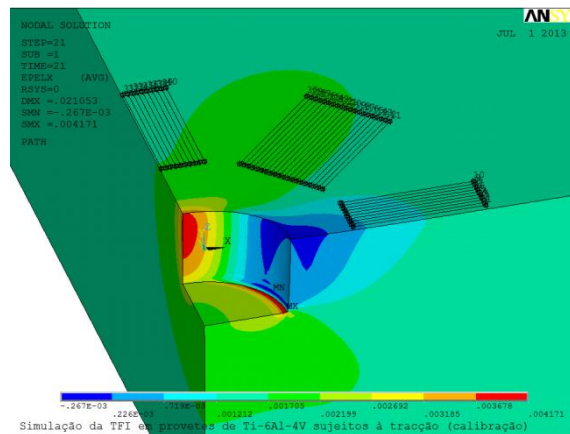
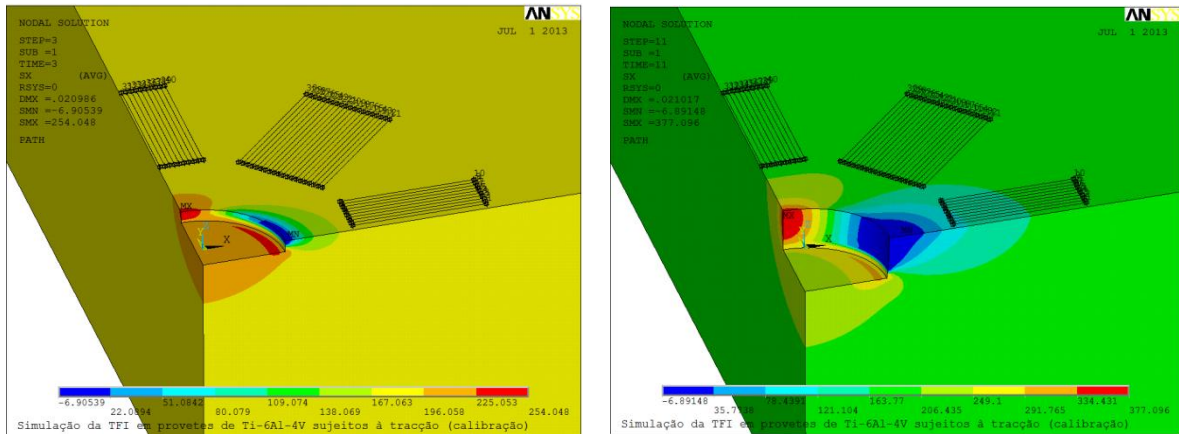


Figura 7.4. [Deformação elástica segundo O_x , furo com 1,0 mm].



(a) Furo com 0,1 mm.

(b) Furo com 0,5 mm.

Figura 7.5. [Tensão segundo O_x]

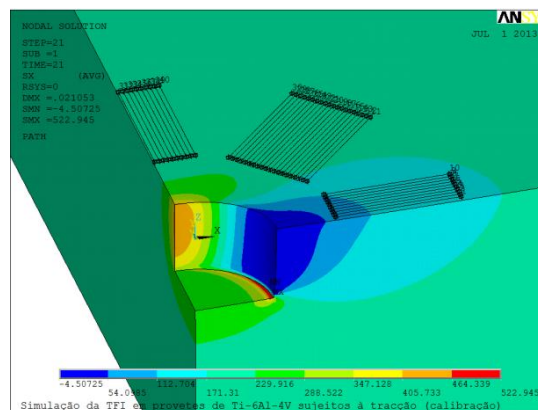


Figura 7.6. [Tensão segundo O_x , furo com 1,0 mm].

Feita uma média entre os valores de deformação obtidos por cada extensômetro, obtemos por MEF o que se apresenta na Figura 7.7:

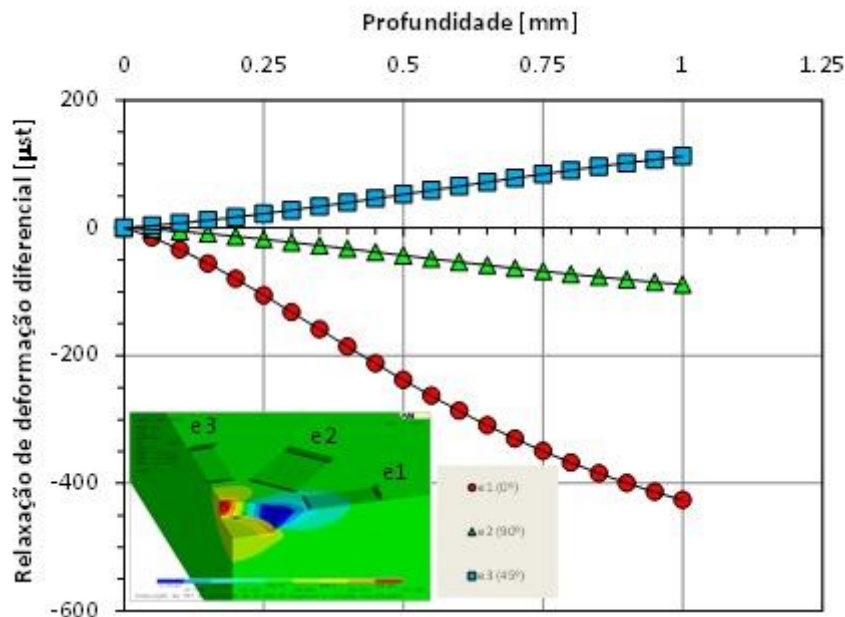


Figura 7.7. [Simulação da relaxação de deformação de um provete de Ti-6Al-4V].

Tendo em atenção que a simulação numérica é a representação de uma tensão ideal, o esperado era obter valores de tensões residuais constantes e iguais para ensaios da mesma liga. É assim provado, que em termos de deformações os ensaios apresentam comportamento bastante semelhante, devido ao facto de então estar a ser recriada uma situação de furação ideal, não havendo quaisquer efeitos que afetem as deformações, como por exemplo, efeitos termo-mecânicos. As pequenas diferenças que se poderão ter sentido, devem-se provavelmente ao diferente valor introduzido em Ra , raio do furo.

As curvas obtidas são constantes e iguais ao valor de $\Delta\sigma$ do respetivo material. Para se conseguir o valor esperado de $\Delta\sigma$ obtêm-se os valores médios dos pontos de cada curva para cada caso.

A Figura 7.8 é ilustrativa da dispersão observada experimentalmente e mostra como os valores do ensaio experimental não destoam dos da simulação.

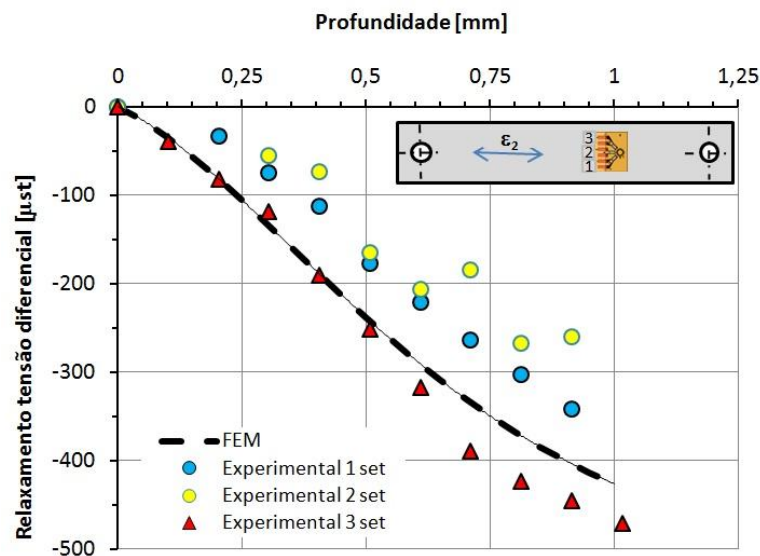


Figura 7.8. Comparação de três resultados do método experimental a 3bar com o MEF.

Foi efetuado um estudo da dispersão estatística para os ensaios de 3 bar com a fresa de carboneto de tungsténio (WC) e para 2,5 bar com a mesma fresa. Esta mostra a variação que existe em relação à média ou valor esperado.

No primeiro caso, para uma pressão a 3 bar com uma fresa de carboneto de tungsténio (WC), encontramos barras de erro de maior dimensão, onde, analisando estatisticamente, nos remetem para um maior desvio-padrão que pode ser indicativo de que os dados estão espalhados por uma gama de valores. Estas barras estão ilustradas na Figura 7.9.

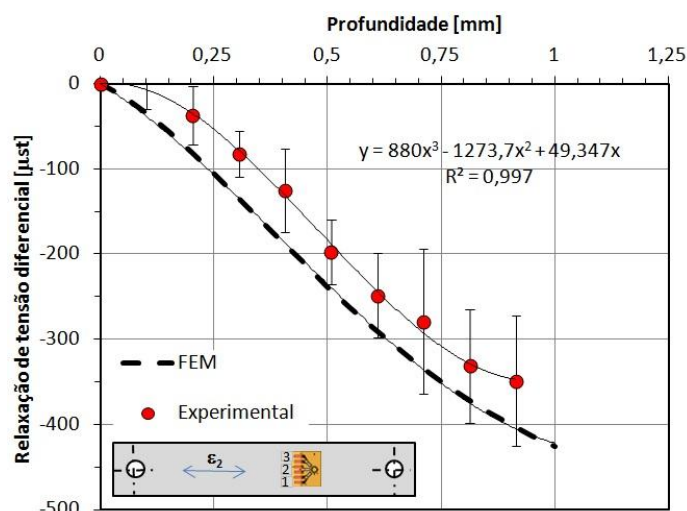


Figura 7.9. [Relaxação de tensão em profundidade 3 bar].

Já para o caso de uma pressão de 2,5 bar para uma fresa de carboneto de tungsténio, a dispersão é bastante pequena, como podemos ver pelo tamanho das barras-erro na Figura 7.10, o que nos remete para um baixo desvio-padrão que indica que os dados tendem a estar próximos da média.

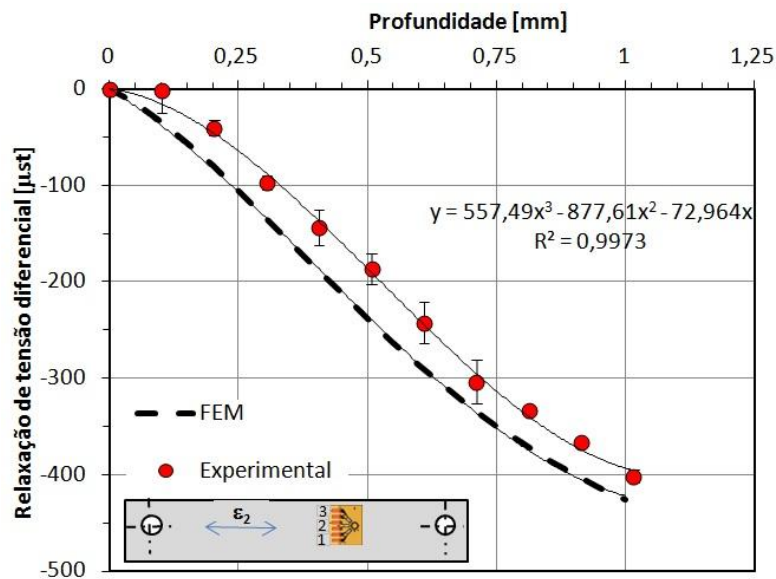


Figura 7.10. [Relaxação de tensão em profundidade 2.5 bar]

7.3. Discussão

Finalmente, inserindo estes valores no software GTR, é possível obter os valores das tensões residuais induzidas:

- **Ensaio 3 bar (TiN):**

Como em todos os casos, o extensómetro 2 é mais sensível às deformações, regista deformações de maior valor. Isto deve-se ao facto de estar alinhado com a direcção da força de tração. Os extensómetros 1 e 3 já se encontram a 45°, registando assim valores mais baixos.

Neste ensaio, o extensómetro 2 registou ainda valores bastante mais elevados de deformação do que nos outros ensaios, como se pode ver na Figura 7.11. Uma

possível causa para isto acontecer será o uso de uma ferramenta de material diferente. A fresa usada neste primeiro ensaio foi de nitreto de titânio (TiN) onde encontramos maiores dificuldades de corte, um som mais agudo e um possível aquecimento acrescido na zona de corte, que pudemos verificar devido à presença de faíscas.

Na Figura 7.12 temos os resultados obtidos pelo software GTR para as tensões residuais induzidas.

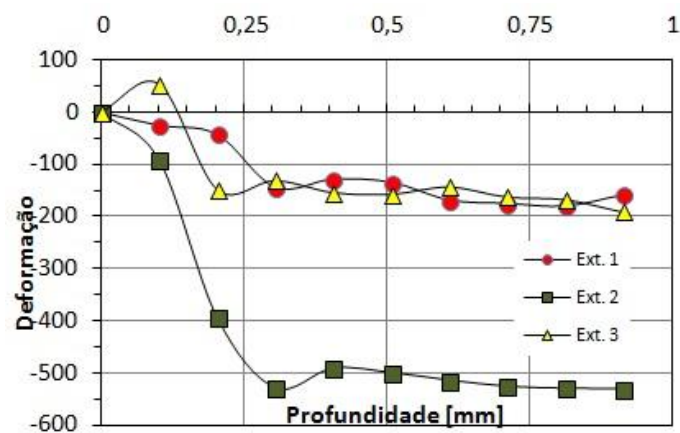


Figura 7.11. [Deformação medida pelos extensômetros em profundidade].

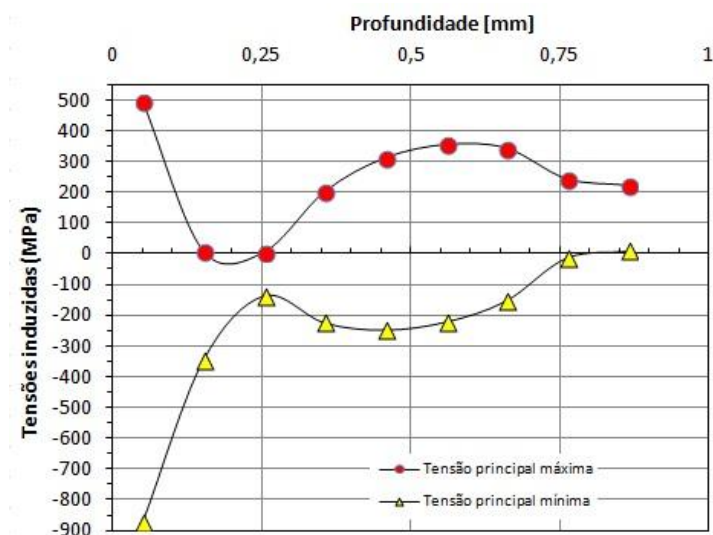


Figura 7.12. [Tensões Residuais Induzidas - 3 bar (TiN) Smoothing 10%].

- **Ensaio 3 bar (WC):**

Este ensaio foi efetuado a 3 bar e com uma fresa de carboneto de tungsténio (WC). As suas deformações em profundidade têm valores mais razoáveis. Depois de várias repetições e em comparação com os elementos finitos, pareceu a melhor opção, com resultados mais coerentes e próximos da simulação numérica como mostra a Figura 7.8. Para além disso o processo de furação foi mais simples e foi possível obter furos mais perfeitos com um diâmetro bastante mais equilibrado. Temos os valores das tensões induzidas na Figura 7.14.

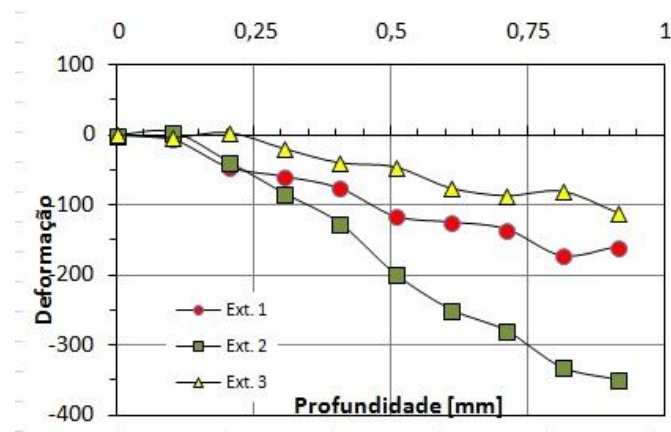


Figura 7.13. [Deformação medida pelos extensómetros em profundidade].

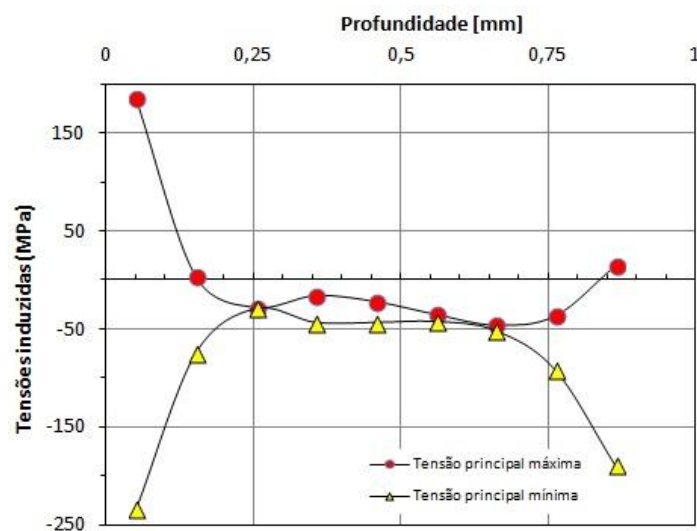


Figura 7.14. [Tensões Residuais Induzidas - 3 bar (WC) Smoothing 8%].

- **Ensaio 2.5 bar (WC):**

Neste ensaio, os valores das deformações já voltam a ser superiores do que no caso anterior, como mostra a Figura 7.15. É apresentada também uma certa inconstância nos valores de deformação registados pelos extensómetros 1 e 3. Isto pode-se dever ao facto de a velocidade da fresa estar sob o efeito de um valor menor de pressão, 2,5 bar, o que pode levar a maiores dificuldades no corte.

As tensões residuais induzidas estão apresentadas na Figura 7.16.

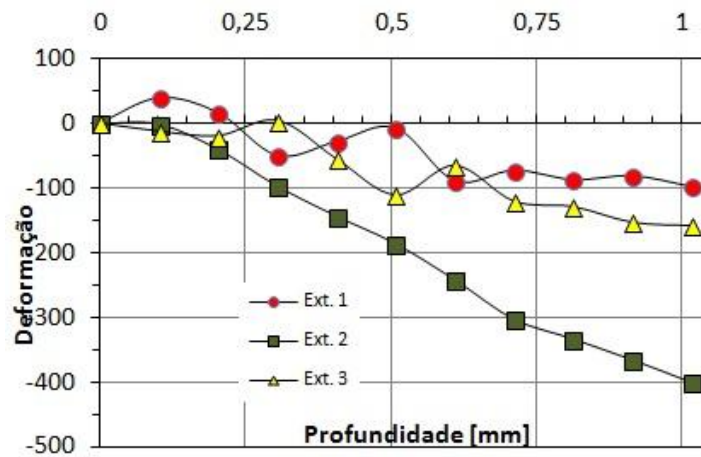


Figura 7.15. [Deformação medida pelos extensómetros em profundidade].

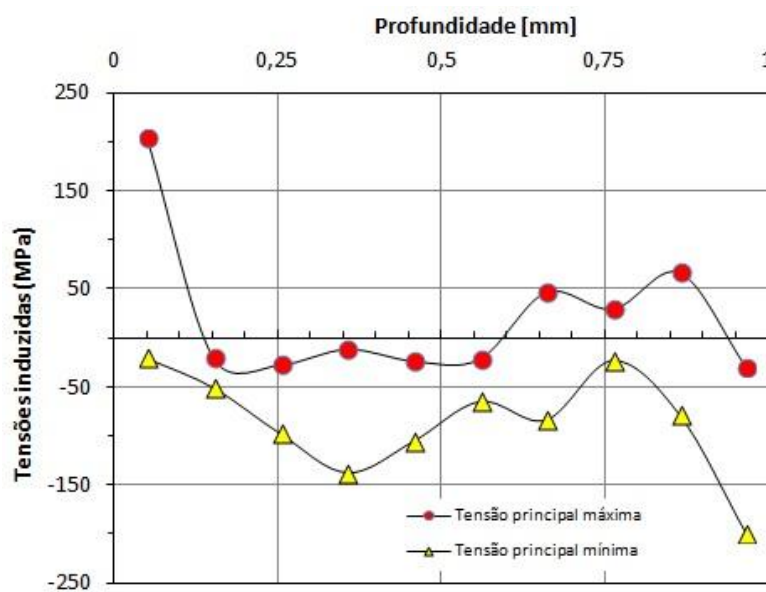


Figura 7.16. [Tensões Residuais Induzidas - 2.5 bar (WC) Smoothing 5%].

- **Ensaio 3,5 bar (WC):**

Este ensaio, feito a uma pressão superior de 3,5 bar ainda com uma fresa de carboneto de tungsténio (WC), volta então a apresentar valores inferiores de deformação no extensómetro 2, como mostra a Figura 7.17. No entanto há também uma maior discrepância entre os valores dos extensómetros 1 e 3. Estes deveriam ter valores bastante próximos pelo facto de medirem as deformações na mesma direção, no entanto, talvez por motivos de problemas com o extensómetro, como por exemplo na colagem, estes valores diferem um pouco.

Os valores das tensões induzidas são apresentados na Figura 7.18.

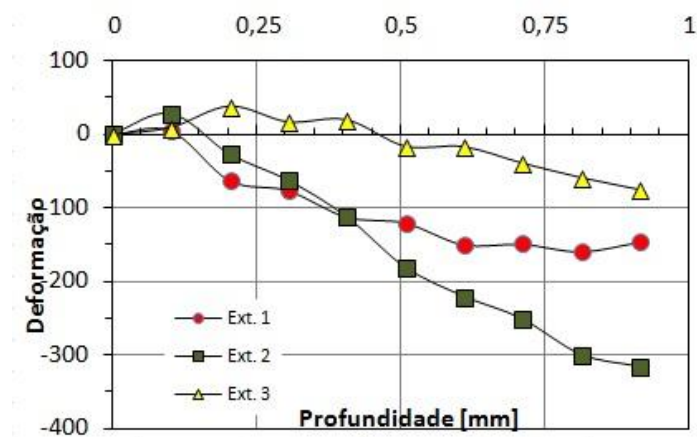


Figura 7.17. [Deformação medida pelos extensómetros em profundidade].

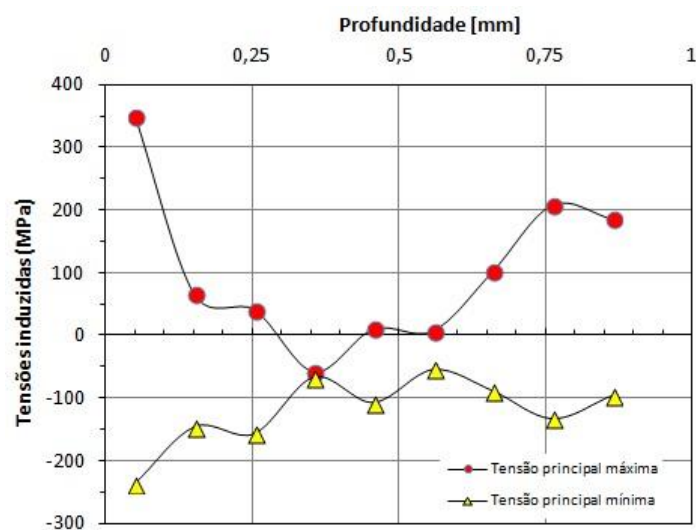


Figura 7.18. [Tensões Residuais Induzidas - 3,5 bar (WC) Smoothing 5%].

- **Ensaio 3 bar (2arestas):**

Por último, temos o caso em que foi utilizada uma ferramenta de geometria diferente, uma broca de duas arestas. Neste ensaio houve grandes dificuldades no corte, lascando até uma das arestas. A presença de faíscas era mais acentuada do que o normal, havendo possivelmente um aumento de temperatura localizada no momento do corte bastante acentuado.

Desta forma, as deformações introduzidas pelo sistema de corte têm um valor bastante superior aos últimos casos, como é possível verificar na Figura 7.19. Para além disso, a geometria do furo obtida foi bastante irregular.

As tensões induzidas neste caso, são apresentadas na Figura 7.20.

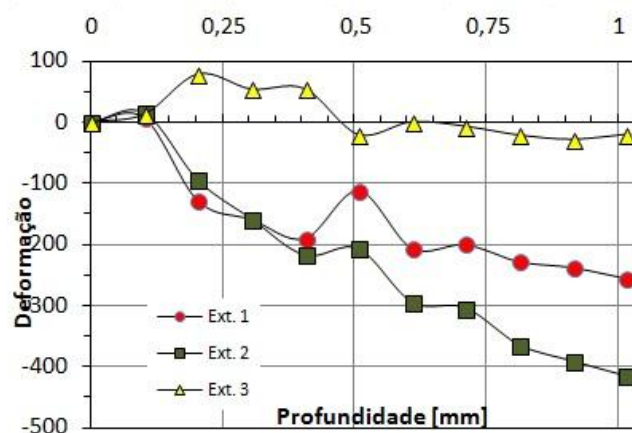


Figura 7.19. [Deformação medida pelos extensómetros em profundidade].

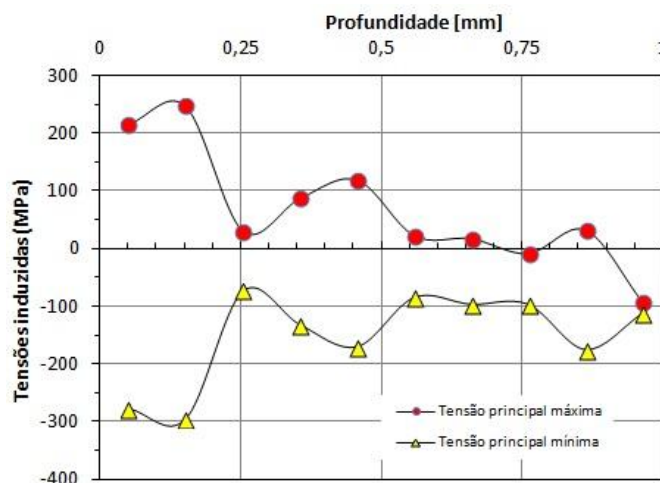


Figura 7.20. [Exemplo Tensões Residuais Induzidas - 3 bar (2arestas) Smoothing 15%].

É realmente notório que os ensaios a 3 bar com a ferramenta de carboneto de tungsténio, são os que apresentam melhores resultados a nível de linearidade das deformações e de um menor valor das tensões residuais induzidas. A geometria do furo que observamos nestes ensaios é bastante mais perfeita.

Numa análise estatística mais detalhada, foi efetuado um estudo da dispersão estatística de maneira a comparar todas as curvas médias obtidas para as diferentes pressões e geometria. É assim possível analisar a variação que existe em relação à média ou valor esperado.

Como é possível constatar pela Figura 7.21, o caso com barra de erro maior é o de 3,5 bar, o que nos indica um maior desvio-padrão, ou seja, é possível que os dados estejam espalhados por uma gama de valores. O exemplo de 2,5 bar é o que apresenta um menor desvio-padrão, tendo assim os dados mais próximos da média.

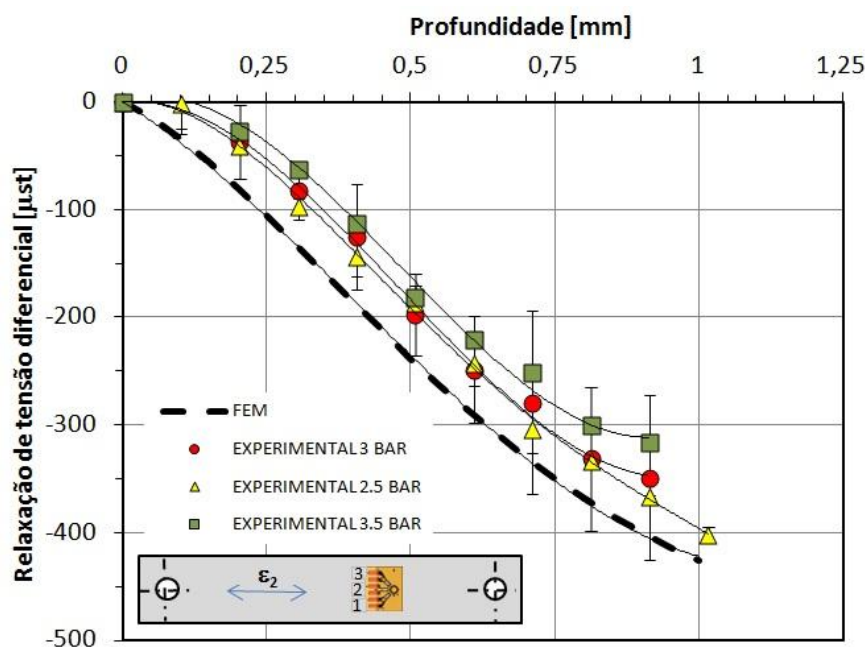


Figura 7.21. [Relaxação de tensão diferencial em profundidade]

8. CONCLUSÃO

Este trabalho centrou-se no estudo das tensões residuais induzidas durante a aplicação da técnica do furo incremental numa liga de titânio (Ti 6Al-4V). Foi estudada a influência da velocidade de corte no processo de furação a alta velocidade. Para tal a pressão do ar de alimentação da turbina de acionamento foi alterada nos diferentes ensaios. A calibração experimental foi seguida de uma simulação numérica para a quantificação das tensões residuais induzidas pelo processo de furação na liga de titânio, Ti-6Al-4V.

De uma forma geral as curvas experimentais de relaxação de deformação em função da profundidade aproximaram-se das curvas obtidas por simulação numérica. Para cada velocidade de corte, foram realizados vários ensaios e determinadas as curvas médias. Nalguns casos constatou-se um grande desvio relativamente ao valor médio que foi atribuído a problemas de colagem das rosetas de extensómetros. Os melhores resultados foram obtidos para a pressão do ar mais baixa de 2,5 bar, isto é, para a velocidade de corte mais baixa. No entanto os resultados não são conclusivos pelo facto das curvas médias estarem dentro da gama de erro observada em todas as medidas. Com base na diferença entre as curvas numéricas e as experimentais, determinou-se a deformação induzida pelo processo de furação e, conseqüentemente, as tensões residuais induzidas. Os valores obtidos estão de acordo com as observações anteriormente referidas relativamente às curvas de relaxação de deformação induzida pelo processo de furação.

Foi possível observar que os incrementos iniciais são os mais críticos, visto serem os que apresentam uma maior indução de tensões. No entanto, estes valores podem estar sobrestimados devido ao facto de existir uma certa dificuldade na medição exata do zero da profundidade, ou seja, em definir o início do furo e também ao efeito do chanfro da ferramenta que não foi tido em conta na simulação numérica.

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que a metodologia proposta pode ser bastante útil na otimização dos processos de furação das ligas de titânio. Com base nesta metodologia é possível estudar diferentes parâmetros e processos de furação por forma a diminuir as deformações e as tensões residuais induzidas pelo processo de furação.

8.1. Trabalho futuro

Depois de uma análise de todo o trabalho desenvolvido e considerando os resultados obtidos, apresentam-se algumas sugestões de trabalho futuro para complementar e melhorar o que já foi feito:

- Comparar o efeito da velocidade de rotação efetuando a furação com uma gama maior de frequências de rotação.
- Refinar mais a malha do modelo 3D na zona dos extensómetros de forma a melhorar a precisão dos resultados da simulação numérica.
- Analisar a morfologia das aparas que resultam da furação e analisar a forma com que fica o furo no final. Teoricamente, quanto menor for o tamanho das aparas e mais cilíndrica for a forma do furo, mais perfeita é a furação.
- Estudar a furação tradicional vs. furação orbital de modo a ser feito um furo com o eixo da fresa deslocado em relação ao centro do furo. Ou seja, a fresa roda em torno do seu próprio eixo e também em torno do eixo do furo.

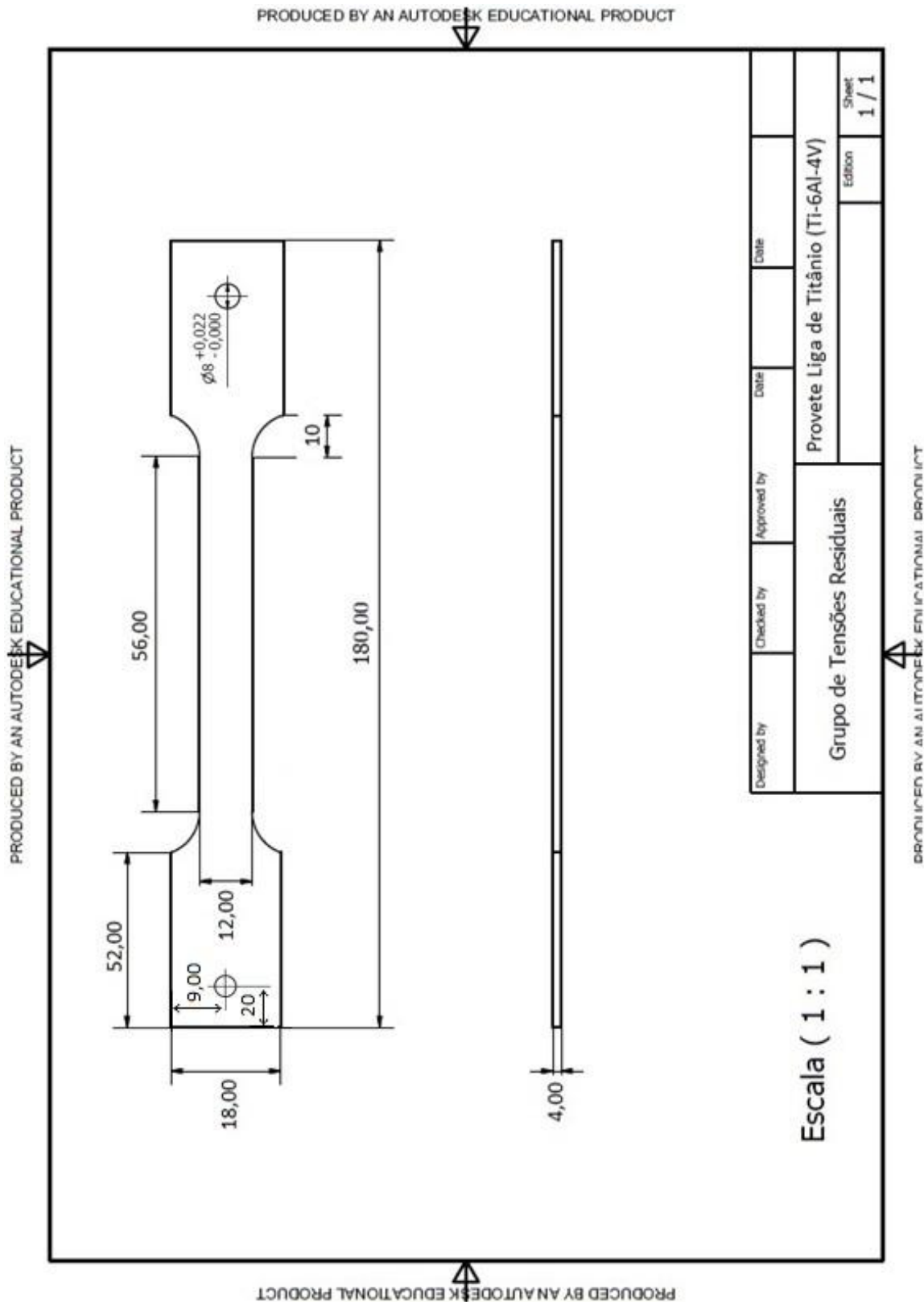
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Macherauch, E., Wohlfahrt, H. e Wolfstieg, U.** *Zur Zweckmassigen Definition von Eigenspannungen*. HTM, 28 (1973) 201-211.
2. **Lu, J., et al.** *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. The Fairmont Press, Lilburn, GA, U.S.A. 1996.
3. **Nobre, J. P.** *Determinação de Tensões Residuais pela Técnica do Furo Incremental: Princípios e Métodos de Cálculo*. Coimbra, 2010.
4. **Barros, J. H.** *A técnica do Furo Incremental para Medições de Tensões Residuais: Métodos de Cálculo, Desenvolvimento e Aplicação*. Coimbra.
5. **Withers, P. J. e Bhadeshia, H. K. H. D.** *Residual stress: Part 1 - measurement techniques*.
6. **Withers, P. J. e Bhadeshia, H. K. H. D.** *Residual stress: Part 2 - nature and origins*.
7. **Totten, G. E. e MacKenzie, D. S.** *Handbook of Aluminum, volume 1*. New York : CRC Press, 2003.
8. **Maeder, G., et al.** *Précontraintes et Traitements Superficiels, Techniques de l'Ingénieur*. *Traité Métallurgie* (1991) M1180-1-26/M1181-1-8.
9. **de Seabra, A. V.** *Metalurgia Geral, volume 1*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2002.
10. ISF Welding and Joining Institute.
<http://mercury.kau.ac.kr/welding/Welding%20Technology%20II%20-%20Welding%20Metallurgy/Chapter%203%20-%20Residual%20Stresses.pdf>.
11. **Ribeiro, João E. P. C.** Tese de Doutoramento "*Caracterização Experimental e Numérica de Campos de Tensões Residuais Provocadas por Processos de Fabrico*." Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006.
12. The Welding Institute.
<http://www.twi.co.uk/content/ksrhl001.html>.
13. **Ribeiro, J., Vaz, M. e e Piloto, P.** *Medição de Campos de Tensões Residuais - Estudo Preliminar, nos Proc. VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional*, Évora, 2003.
14. **Guimarães, Ruben M. D.** Dissertação de Mestrado "*A técnica do furo incremental na determinação de tensões residuais em ligas de alumínio*." Departamento de Física da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012.
15. **Mathar, J.** *Ermittlung von eigenspannungen durch messung von bohrlochverformungen*. *Archiv fur das Eisenhüttenwesen*, 6(7):277-281, 1993.
16. **Soete, W. e Vancrombrugge, R.** *An industrial method for determination of residual stress*. *Proceeding of the Society for Experimental Stress Analysis*, 8(1):17-18, 1950.
17. **Milbradt, K. P.** *Ring method determination of residual stresses*. *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis*, 9(1), 1951.
18. **Kelsey, R. A.** *Measuring non-uniform residual stresses by the hole drilling method*. *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis*, 14(1):181-194, 1956.
19. **Rendler, N. J. e Vigness, I.** *Hole-drilling strain-gage method of measuring residual stresses*. *Experimental Mechanics*, 6(12):577-586, 1966.

20. **ASTM-E-837-94a.** *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method.* Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards, (1994) 1-7.
21. **Beaney, E. M. e Procter, E.** *A critical evaluation of the center hole technique for the measurement of residual stresses.* Strain, 10:7-15, 1974.
22. **Nawwar, A. M., McLachlan, K. e Shewchuk, J.** *A modified hole-drilling technique for determining residual stresses in thin plates.* Experimental Mechanics, 33:226-232, 1976.
23. **Bijak-Zochowski, M.** *A semi-destructive method of measuring residual stresses.* VDI-Berichte, 313:469-476, 1978.
24. **Schajer, G.S.** *Application of finite element calculations to residual stress measurements.* Journal of Engineering Materials and Technology (ASME), 103(2):157-163, 1981.
25. **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.
26. **Zhu, W. X. e Smith, D. J.** *Residual stresses by hole-drilling in curved components.* Recent Advances in Experimental Mechanics, Proceedings of 10th International Conference on Experimental Mechanics, 1994.
27. **Schajer, G.S. e Yang, L.** *Residual-stress measurement in orthotropic materials using the hole-drilling method.* Experimental Mechanics, 51:324-333, 1994.
28. **Tootoonian, M. e Schajer, G. S.** *Enhanced sensitivity residual-stress measurements using taper-hole drilling.* Experimental Mechanics, 52:124-129, 1995.
29. **ASTM-E-837-99.** *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method.* Reprinted from Annual Book of ASTM Standards, (1999) 1-10.
30. **Grant, P. V., Lord, J. D. e Whitehead, P. S.** *The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique.* National Physical Laboratory, Teddington, UK, 2002.
31. **Nobre, J. P., Dias, A. M. e Scholtes, B.** *Use of the hole-drilling method for measuring residual stresses in highly stressed shot-peened surfaces.* 40(3):289-297 : Experimental Mechanics, 2000.
32. **International, ASTM.** *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method.* West Conshohoken, USA, 2008.
33. **Micro-Measurements, Inc.** *Technical Note TN503-4, Measurement of Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method.* Wendell, USA, 2010.
34. **Flaman, M. T. e Manning, B. H.** *Determination of residual-stress variation with depth by the hole-drilling method.* Experimental Mechanics, 25(9):205-207, 1985.
35. **Niku-Lari, A., Lu, J. e Flavenot, J. F.** *Measurement of residual stress distribution by the incremental hole-drilling method.* Journal of Mechanical Working Technology, 11:165-188, 1985.
36. **Schajer, G. S.** *Measurement of non-uniform residual stresses using the hole drilling method: Practical application of the integral method.* Journal of Engineering Materials and Technology (ASME), 110(4):344-349, 1988.
37. Titanium Alloy Ti 6Al-4V.
Junho de 2013. <http://cartech.ides.com/datasheet.aspx?i=101&E=269>.

38. **Demangeon, Bastien e Lepiniere, Emmanuel.** *Compréhension des mécanismes du retour élastique dans le cas du perçage de l'alliage de titane Ti-6Al-4V.* Arts et Métiers ParisTech Campus de Cluny, Cluny, 2008/2009.
39. **Nobre, J. P., et al.** *Quantifying the drilling effect during the application of incremental hole-drilling technique in laminate composites.* Materials Science Forum, 681:510-515, 2011.
40. **Nobre, J. P., et al.** *Induced drilling strains in glass fibre reinforced epoxy composites.* Elsevier, 2013.
41. **Nobre, J.P., et al.** *Evaluation of residual stresses induced by ultra-high-speed drilling in aluminium alloys.* Proc. 9th International Conference on Residual Stresses, Garmish-Partenkirchen, Germany, 7-9 October, 2012.
42. **Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.** *U9B Force Transducer Datasheet.* Darmstadt, Alemanha.
43. **Karris, S. H.** *Signals and Systems with MATLAB Computing and Simulink Modeling.* Orchard Publications, 3rd edition, 2007.
44. **Stolarski, T., Nakasone, Y. e Yoshimoto, S.** *Engineering Analysis with ANSYS Software.* Elsevier, 2006.
45. **ANSYS.** *Release 14.0 Documentation for ANSYS.* SAS IP, Inc., Houston, 2012.
46. *Induced drilling strains in glass fibre reinforced epoxy composites.* **Nobre, J. P., et al.** Elsevier, 2013.

ANEXO A



Estudo experimental e numérico do processo de furação em ligas de titânio com vista à melhoria do seu desempenho funcional e vida.

Erro! A origem da referência não foi encontrada.

Estudo experimental e numérico do processo de furação em ligas de titânio com vista à melhoria do seu desempenho funcional e vida. **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**
