



• U C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Deteção da propagação de fendas

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

Detection of crack propagation

Autor

Mateus Miranda da Silva

Orientadores

Doutora Ana Sofia Figueira Ramos

Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa

Júri

Presidente Professor Doutor Ricardo Nuno Soares Madeira Branco
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professora Doutora Maria Teresa Freire Vieira
Professora Catedrática da Universidade de Coimbra
Professor Doutor Luís Filipe Pires Borrego
Professor Coordenador do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Orientador Doutora Ana Sofia Figueira Ramos
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2018

Projeto “CrackFree - Para materiais metálicos autorreparáveis”, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do programa Portugal-2020 (PT2020), no âmbito do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI-01-0145-FEDER-029101) e por fundos nacionais.



Agradecimentos

O trabalho realizado só foi possível com a ajuda e contribuição de algumas pessoas às quais deixo o meu profundo agradecimento:

À minha orientadora **Doutora Ana Sofia Figueira Ramos** pela dedicação, apoio, motivação, pela total disponibilidade ao longo destes meses, por todo o conhecimento transmitido e esclarecimento de todas as dúvidas, pelas ideias, sugestões e recomendações, por toda a orientação e ajuda incansável, por tudo isto o meu sincero agradecimento.

Ao meu orientador **Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa**, por todo o apoio, pela disponibilidade, conhecimento transmitido, por toda a ajuda na preparação e execução dos ensaios mecânicos, pelas sugestões e ideias, o meu sincero agradecimento.

Ao **Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco**, pela realização da simulação numérica e fornecimento dos resultados e pela ajuda na interpretação dos mesmos.

Ao **Professor Joel Alexandre da Silva de Jesus**, por toda a ajuda na preparação e execução do ensaio de propagação de fendas.

Ao **Sr. Fernando** das oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica, pela produção dos provetes necessários para os ensaios mecânicos e pela ajuda nas restantes tarefas realizadas nas oficinas.

Ao **Instituto Pedro Nunes**, pela disponibilização das amarras necessárias para a realização do ensaio de tração do fio de nitinol e pela disponibilização do espaço para a realização de alguns testes do método de introdução do fio de nitinol no alumínio.

Aos meus pais, **Manuel e Deolinda**, por me proporcionarem todas as condições necessárias para o meu percurso académico, pelo apoio e motivação.

Ao meu irmão **David**, por todo o acompanhamento do meu percurso, pela preocupação, ajuda, convívio, motivação, pela partilha de ideias e experiências. Também à minha cunhada **Fernanda** pelo acompanhamento do meu percurso académico, convívio e incentivo e ao meu sobrinho **Dinis** por toda a sua alegria contagiante e pelos momentos motivadores que proporciona.

Resumo

O trabalho aqui apresentado tem como principal objetivo o desenvolvimento de sensores capazes de detetar a presença de fissuras em provetes de ligas de alumínio, dando assim um contributo significativo para futuros mecanismos de autorreparação em materiais metálicos.

Como sensores foram utilizados fios de nitinol superelásticos que, após caracterização de modo a confirmar a estrutura cristalina, foram solicitados à tração para se obter o valor da tensão de início da transformação martensítica. Para introduzir os fios NiTi com 0,70 mm de diâmetro nos provetes de ligas de alumínio foram efetuados furos de 0,65 mm e, de seguida, procedeu-se ao aquecimento dos provetes promovendo a sua dilatação e ao arrefecimento do fio para que este comprimisse, facilitando a entrada do fio no furo. Como este procedimento se revelou difícil e insuficiente optou-se por introduzir os fios em furos de 0,70 mm e fixá-los à liga de alumínio com cola cianoacrilato. Para avaliar a sua eficiência como sensores de fissuras, os fios NiTi, isolados eletricamente através de um revestimento polimérico, foram introduzidos num provete de fadiga especialmente desenhado para o efeito. Aquando da realização do ensaio de fadiga de propagação de fendas, utilizando os parâmetros determinados por simulação numérica, foi feita a monitorização da diferença de potencial.

No desenvolvimento do sensor de fissuras foram identificados dois pontos críticos: i) introdução do fio nos provetes metálicos, e ii) medição das propriedades elétricas do fio de NiTi durante os ensaios mecânicos. Contudo, foi possível introduzir os fios e realizar os ensaios de tração e fadiga previstos, utilizando os provetes concebidos no âmbito desta dissertação. Durante o ensaio de propagação de fendas com utilização de uma sonda de 4 pontos, a liga de Al e o fio NiTi permaneceram solidários. No entanto, os provetes de fadiga adaptados não permitiram que a fenda ao propagar tomasse a direção do fio de modo a detetar a sua presença.

Palavras-chave: NiTi, Fendas, Sensor, Superelasticidade, Transformação martensítica, Alumínio.

Abstract

The main objective of this work is the development of sensors capable of detecting the presence of cracks in aluminium alloy specimens, thus making a significant contribution to future self-healing mechanisms in metallic materials.

Superelastic nitinol wires were used as sensors which, after characterization in order to confirm the crystalline structure, were tensile tested to obtain the value of the stress required to induce the martensitic transformation. To introduce the NiTi wires with a diameter of 0.70 mm into the aluminium alloy specimens, holes of 0.65 mm were made and then the specimen was heated to promote its expansion and the wire was cooled so that it compressed, facilitating the entry of the wire into the hole. As this procedure proved difficult and insufficient, it was decided to introduce the wires into 0.70 mm holes and fix them to the aluminium alloy with glue. To evaluate their efficiency as crack sensors, NiTi wires, insulated electrically through the deposition of a polymeric coating, were introduced into a specially designed fatigue test specimen. During the crack propagation fatigue test, using the parameters determined by numerical simulation, the voltage was monitored.

During the development of the crack sensor, two critical points were identified: (i) introduction of the wire into the metallic test specimens, and (ii) measurement of the electrical properties of the NiTi wire during the mechanical tests. However, it was possible to introduce the wires and carry out the tensile and fatigue tests, using the specimens designed in this dissertation. During the crack propagation test using a 4-point probe, the Al alloy and the NiTi wire remained cohesive. However, the fatigue specimens did not allow the crack to propagate towards the wire in order to detect its presence.

Keywords: NiTi, Cracks, Sensor, Superelasticity, Martensitic transformation, Aluminium.

Índice

Índice de Figuras.....	vii
Índice de Tabelas	ix
Simbologia e Siglas.....	x
Simbologia.....	x
Siglas e acrónimos	xi
INTRODUÇÃO	1
1. Revisão bibliográfica.....	3
1.1. Ligas com memória de forma.....	3
1.1.1. Nitinol	4
1.1.2. Transformação de fase	6
1.2. Sensores NiTi	8
1.3. Autorreparação em materiais metálicos.....	9
1.4. Alumínio e suas ligas	9
1.4.1. Rotura por fadiga	10
1.4.2. Estudo da propagação de fendas.....	11
1.4.3. Curva da/dN – Δ K	12
2. Materiais e Ensaio.....	14
2.1. Materiais.....	14
2.1.1. Fios de Nitinol.....	14
2.1.2. Provete da liga de alumínio AA 5083-H111 para ensaio de tração.....	16
2.1.3. Provete da liga de alumínio AA6082–T651 para ensaio de fadiga	18
2.3. Introdução dos fios de nitinol nos provetes de ligas de alumínio.....	19
2.4. Ensaio mecânicos	22
2.4.1. Ensaio de tração do fio de Nitinol	22
2.4.2. Ensaio de tração do provete da liga de alumínio AA 5083 com o fio de nitinol	25
2.4.3. Ensaio de fadiga do provete da liga de alumínio AA 6082 com o fio de nitinol	26
3. Apresentação e Discussão de Resultados	28
3.1. Caracterização dos fios de Nitinol.....	28
3.2. Ensaio mecânicos	29
3.2.1. Transformação martensítica induzida por tensão	29
3.2.2. Ensaio de tração em provetes com fio	31
3.2.3. Simulação numérica.....	35
3.2.4. Ensaio de fadiga de propagação de fendas.....	40
4. Conclusões.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
ANEXO A – Fichas ICDD.....	49

Apêndice A – Desenho 2D cotado das peças do provete para ensaio de tração	50
Apêndice B – Relação da tensão limite de elasticidade da liga de alumínio com a tensão de início da transformação martensítica	51
Apêndice C – Desenho 2D cotado do provete para ensaio de fadiga	53
Apêndice D – Cálculo da Variação de dimensões do furo e do fio, por efeito de temperatura.....	54
Apêndice E – Cálculo da pressão de aperto com as variações de diâmetro desejadas	56
Apêndice F – Cálculo da força de resistência ao corte da junta colada	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Propriedades das ligas com memória de forma.	3
Figura 1.2. Principais fases do Nitinol.	5
Figura 1.3. Transformação de fase por variação de temperatura. Adaptado de [10].	6
Figura 1.4. Transformação de fase induzida por tensão. Adaptado de [7].	7
Figura 1.5 Curva típica da/dN – ΔK [23].	12
Figura 2.1 Fio de Nitinol, $\phi = 0,70$ mm.	14
Figura 2.2 Peças do provete para ensaio de tração.	17
Figura 2.3 Forma final do provete depois de ser introduzido o fio de nitinol na zona destacada.	17
Figura 2.4 Forma geométrica do provete para ensaio de fadiga.	19
Figura 2.5. Chapa de alumínio de 6 mm.	20
Figura 2.6 Chapa de liga de alumínio de 3 mm com o fio introduzido.	21
Figura 2.7 Provete da liga de alumínio AA 5083 para ensaio de tração com o fio introduzido.	21
Figura 2.8 Amarras para o fio de Nitinol.	22
Figura 2.9 Sequência de etapas do ensaio de tração ao fio de nitinol.	23
Figura 2.10 Montagem do ensaio de tração.	24
Figura 2.11 Fio de Nitinol (1) e Extensómetro (2).	24
Figura 2.12 Montagem do ensaio de tração dos provetes com o fio de nitinol introduzido.	25
Figura 2.13 Máquina utilizada para ensaio de propagação de fendas.	26
Figura 2.14 Provete polido e com o fio introduzido, pronto para o ensaio de propagação de fendas.	27
Figura 3.1 Difratograma de raios X do fio de nitinol com $\phi = 0,70$ mm.	28
Figura 3.2. Gráfico Tensão – Deformação do fio de nitinol.	29
Figura 3.3 Gráfico Tensão – Deslocamento do ensaio de tração do provete da liga de alumínio com o fio introduzido.	31
Figura 3.4 Provete da liga de alumínio com fio colado.	32
Figura 3.5 Gráfico Tensão – Deslocamento do ensaio de tração do provete da liga de alumínio com o fio colado.	33

Figura 3.6 Gráfico Tensão – Deslocamento do ensaio de tração do provete com o fio inserido ao longo de uma espessura de 8 mm.	34
Figura 3.7 Malha desenvolvida para o provete especialmente desenhado para este trabalho.	35
Figura 3.8 Malha desenvolvida para provete CT normalizado.	36
Figura 3.9 Fator de intensidade de tensões (K) em função da relação a/W	37
Figura 3.10 Fator geométrico calculado pelas equações 3.2 e 3.3.	38
Figura 3.11 Integral – J.	39
Figura 3.12 Fator geométrico calculado pelas equações 3.3 e 3.4.	40
Figura 3.13 Fonte de corrente (1) e multímetro (2) utilizados.	41
Figura 3.14 Montagem do ensaio de fadiga de propagação de fissuras.	41
Figura 3.15 Representação da direção de propagação da fissura.	42

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 . Valores de resistividade elétrica (ρ) de fios de NiTi retirados da literatura.	5
Tabela 1.2 Ligas de alumínio, composições e suas aplicações [18, 19].	10
Tabela 2.1 Composição química dos fios de nitinol, $\phi = 0,70$ mm.....	14
Tabela 2.2 Temperaturas de transição dos fios de nitinol, $\phi = 0,70$ mm.	14
Tabela 2.3 Condições do ensaio de difração de raios X.	15

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A- Área de secção [mm²]

A_s – Temperatura de início de austenite [°C]

A_p – Temperatura de pico da austenite [°C]

A_f - Temperatura de fim de austenite [°C]

d- Distância entre planos atômicos [nm]

da / dN – velocidade de propagação da fenda [mm/ciclo]

K- Fator de intensidade de tensões [MPa \sqrt{m}]

L- Comprimento [mm]

M_s – Temperatura de início de martensite [°C]

M_p – Temperatura de pico da martensite [°C]

M_f – Temperatura de fim de martensite [°C]

n- Número inteiro

N- n° de ciclos

R- Resistência elétrica [Ω]

φ - Diâmetro [mm]

λ- comprimento de onda [mm]

θ- Ângulo de difração [°]

ρ- Resistividade elétrica [Ω · mm]

σ^{Ms} – Tensão de início de martensite [MPa]

σ^{Mf} – Tensão de fim de martensite [MPa]

σ^{As} – Tensão de início de austenite [MPa]

σ^{Af} – Tensão de fim de austenite [MPa]

Siglas e acrónimos

A – Austenite

CT – Compact Tension

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DSC - Differential Scanning Calorimetry – Calorimetria Diferencial de Varrimento

ICDD – International Centre for Diffraction Data

IPN – Instituto Pedro Nunes

M - Martensite

PTFE - Politetrafluoretileno

XRD - X-Ray Diffraction - Difração de raios X

INTRODUÇÃO

À medida que os materiais vão sendo utilizados, tanto na indústria automóvel, aeroespacial ou outras, estes sofrem dano e ao longo do tempo podem surgir defeitos, como por exemplo fissuras que, se não forem detetadas e reparadas, podem trazer consequências graves tanto a nível material como pessoal. De modo a evitar falhas em serviço torna-se crucial desenvolver mecanismos que sejam capazes de detetar as fissuras numa fase precoce para posteriormente se proceder *in loco* à sua reparação - “Self-Healing”, e assim evitar o crescimento da fenda até valores críticos, aumentando a segurança e o tempo de vida das estruturas. A autorreparação em metais é complexa, tornando a sua investigação um desafio. O presente trabalho, cujo foco é a deteção da propagação de fendas, insere-se no âmbito de um projeto mais vasto que visa explorar uma nova abordagem que contribua para a autorreparação em materiais metálicos.

Deste modo, o objetivo deste trabalho é desenvolver sensores que detetem a presença de fissuras em materiais metálicos, utilizando para o efeito fios de nitinol (NiTi) e avaliar o seu comportamento e eficiência neste tipo de aplicação. A escolha da liga de memória de forma NiTi deve-se ao facto deste material apresentar superelasticidade e efeito de memória de forma. Os fios têm que se apresentar, à temperatura ambiente, na sua fase menos deformável, ou seja, na fase austenítica e assim permitir detetar as fissuras se a tensão na ponta da fissura for suficiente para induzir a transformação martensítica no fio. Por sua vez, a transformação martensítica é identificada através da medição da resistência elétrica.

Os fios utilizados apresentam diâmetro de 0,70 mm e, para confirmar que se encontram nas condições desejadas, recorreremos a um ensaio XRD para identificar a estrutura cristalina do nitinol à temperatura ambiente, e assim poder confirmar a presença da fase austenítica. Os fios foram introduzidos num provete da liga de alumínio AA 5083 especialmente desenhado para o efeito e testados num ensaio de tração que visa verificar se os materiais (fio e provete) estão solidários. Para a introdução do fio foram feitos furos de 0,70 e 0,65 mm. No caso dos furos de menor diâmetro procedeu-se ao aquecimento da liga de alumínio para promover a dilatação do furo, acompanhado com o arrefecimento do fio

num banho de azoto líquido, arrefecendo-o e comprimindo-o facilitando assim o processo de introdução do fio de 0,70 mm no furo.

Após o ensaio de tração e tendo já o método de introdução do fio bem definido, seguiu-se uma simulação numérica das condições de serviço prevendo o comportamento que será observado no ensaio de propagação de fendas com o fio de nitinol introduzido no provete com entalhe, igualmente concebido no âmbito do presente trabalho.

Por fim, com base nos resultados de simulação, foi efetuado um ensaio de propagação de fendas com o fio de nitinol introduzido no provete com uma forma específica e fabricado numa liga de alumínio AA 6082. Esta é uma liga da serie 6xxx envelhecida por tratamento térmico e que possui uma tensão limite de elasticidade maior que a liga AA 5083. Este ensaio deve ser acompanhado por uma monitorização da resistência elétrica ou da diferença de potencial, de modo a permitir detetar a transformação martensítica induzida pelo estado de tensão gerado pela fenda.

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos. O primeiro capítulo onde se apresenta uma breve revisão bibliográfica acerca de ligas de memória de forma, em particular nitinol, e se abordam temáticas como o uso de NiTi como sensor/atuador, a autorreparação em materiais metálicos e a propagação de fendas em ligas de alumínio. No capítulo dois são descritos os materiais e métodos utilizados ao longo do trabalho. Segue-se o capítulo três onde se apresentam e discutem os resultados experimentais e de simulação numérica. Por fim, no capítulo quatro são apresentadas as conclusões de todo o trabalho realizado.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Ligas com memória de forma

As ligas com memória de forma, conhecidas como “Shape memory Alloys” (SMAs), descobertas em 1932 por Arne Olander [1], são ligas “inteligentes” que se definem pela capacidade de recuperarem a sua forma inicial, tendo por base a transformação de fase da liga, através de variação de temperatura ou de carga aplicada. Como consequência estas ligas apresentam duas propriedades fundamentais: efeito de memória de forma (SME¹) e superelasticidade (SE) [2].

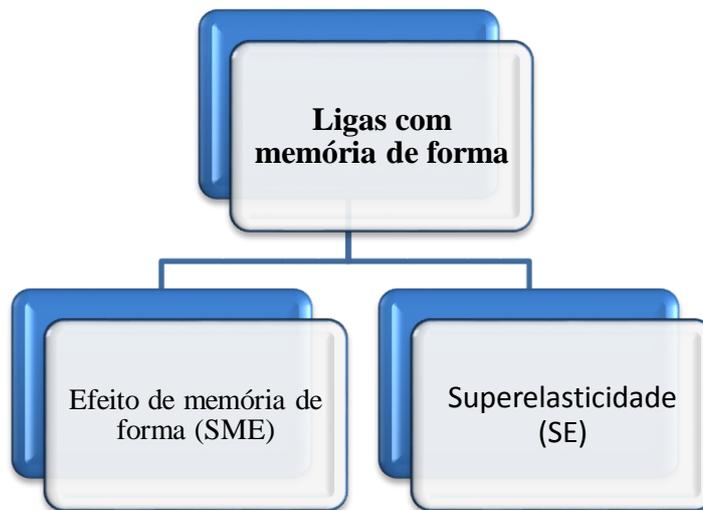


Figura 1.1. Propriedades das ligas com memória de forma.

¹ Do inglês “Shape Memory Effect”

O efeito de memória de forma traduz a capacidade das ligas, depois de sujeitas a deformação, voltarem ao seu estado inicial como resultado do aumento de temperatura. Geralmente estes materiais podem ser facilmente deformados plasticamente a uma temperatura relativamente baixa, ao serem expostos a uma temperatura mais elevada retomam a forma inicial (antes da deformação). Quando o efeito de memória de forma se manifesta somente durante o aquecimento diz-se que se trata de memória de forma simples ("one-way shape memory effect"). Se este efeito se manifestar também durante o arrefecimento, diz-se que se trata de um efeito de memória duplo ("two-way shape memory effect") [3].

Superelasticidade

A superelasticidade, também conhecida como pseudoelasticidade (PE), ocorre quando o material recupera a forma inicial após retirar a carga que lhe foi aplicada e que deu origem a uma determinada deformação.

1.1.1. Nitinol

Descoberto em 1959 [4] por William J. Buehler, o NiTi ou Nitinol (Ni - Níquel; Ti – Titânio; N – Naval; O – Ordnance; L - Laboratory) é a liga com memória de forma mais estudada. Esta liga, que apresenta superelasticidade e efeito de memória de forma, é utilizada em várias aplicações como por exemplo na indústria automóvel, aeroespacial, robótica e biomédica.

O nitinol pode-se apresentar em duas fases: i) austenite (fase mãe), ii) martensite. A fase austenítica é menos deformável do que a martensítica [5]. Nesta fase o NiTi apresenta estrutura cristalina CCC (cúbica de corpo centrado) enquanto que na fase martensítica, fase mais deformável, o NiTi apresenta estrutura cristalina monoclinica (figura 1.2).

As fases martensítica e austenítica possuem diferentes resistividades elétricas. Contudo, os valores encontrados na literatura não são consensuais no que respeita aos

valores desta propriedade (tabela 1.1). A resistividade elétrica de fios de NiTi é definida como função da fração da fase martensítica [6].

Tabela 1.1 . Valores de resistividade elétrica (ρ) de fios de NiTi retirados da literatura.

Referências bibliográficas	$\rho_{\text{austenite}}$ ($\mu\Omega.cm$)	$\rho_{\text{martensite}}$ ($\mu\Omega.cm$)
J. Uchil [7]	82	65
S. J. Furst [8]	89	102
V. Novák [9]	87	75

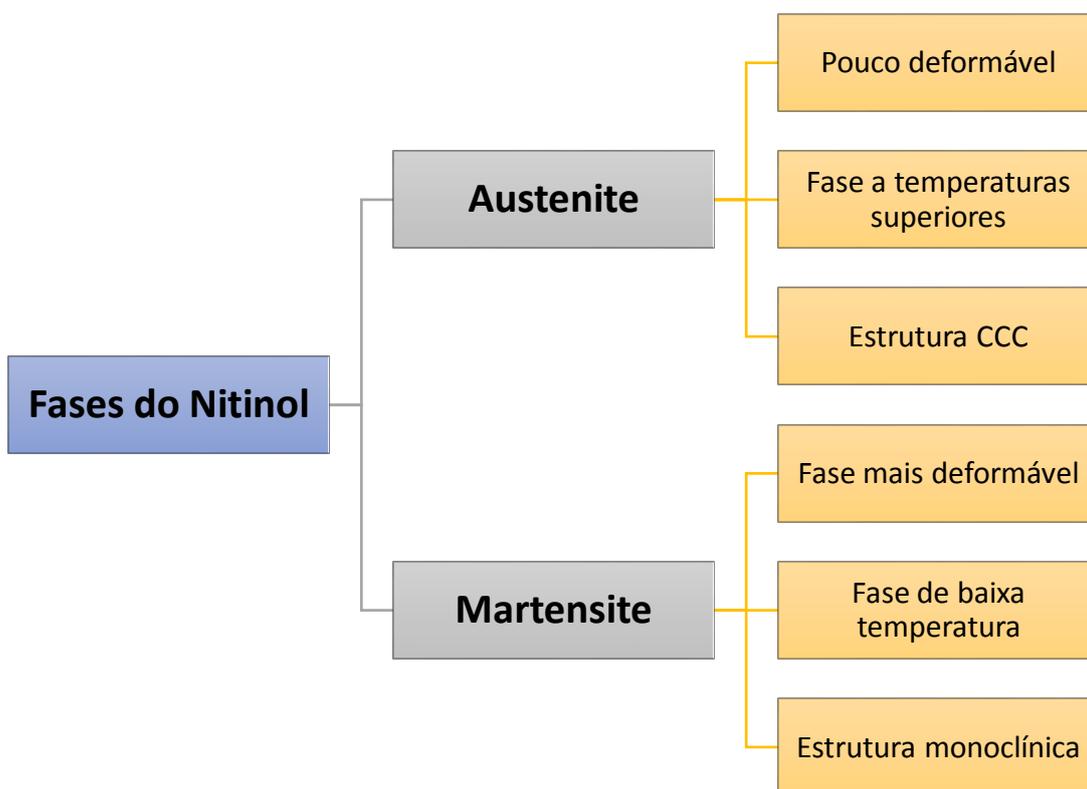


Figura 1.2. Principais fases do Nitinol.

O efeito de memória de forma e a superelasticidade ocorrem devido a mudanças na estrutura cristalina do nitinol (austenite / martensite) que dependem da temperatura e/ou da tensão às quais esta liga é sujeita.

1.1.2. Transformação de fase

A transformação martensítica corresponde à transição de austenite em martensite, enquanto que a transição de martensite em austenite se designa por transformação inversa. As transformações martensítica e inversa ocorrem sem difusão e por mecanismo de maclagem [3]. Nalguns casos esta transformação ocorre com formação de uma fase intermédia, designada por “fase R”.

Quando a liga se encontra à temperatura ambiente na fase austenítica e sofre um arrefecimento, ocorre a transformação martensítica (figura 1.3), por isso à medida que a temperatura baixa, começa-se por atingir a temperatura de início da martensite (M_s) e posteriormente atinge-se a temperatura final da martensite (M_f), a qual indica que a transformação está completa (há apenas martensite). De acordo com a figura 1.3, a transformação inversa ocorre quando há aquecimento da liga, e assim com o aumento de temperatura atinge-se a temperatura de início da austenite (A_s), e posteriormente a temperatura final da austenite (A_f), a qual nos indica que a austenite é a única fase presente [10].

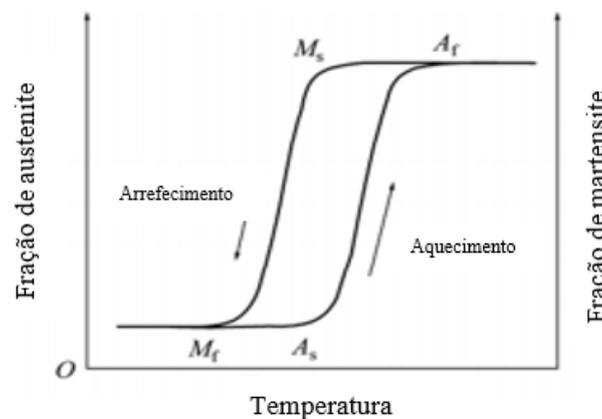


Figura 1.3. Transformação de fase por variação de temperatura. Adaptado de [10].

Por outro lado, também pode ocorrer transformação de fase através da aplicação de carga. Quando se aplica uma carga há um aumento de tensão, pelo que se diz que a transformação é induzida por tensão. Quando na presença de austenite se aplica uma carga, a tensão vai aumentando começando por se atingir a tensão de início da martensite (σ^{Ms}) e posteriormente a tensão final da martensite (σ^{Mf}), para a qual a transformação martensítica se encontra completa (figura 1.4). Quando se remove a carga, ocorre a transformação inversa que começa quando se atinge a tensão de início da austenite (σ^{As}) e termina ao atingir a tensão final da austenite (σ^{Af}), ou seja a tensão para a qual só existe austenite, recuperando o material a forma inicial.

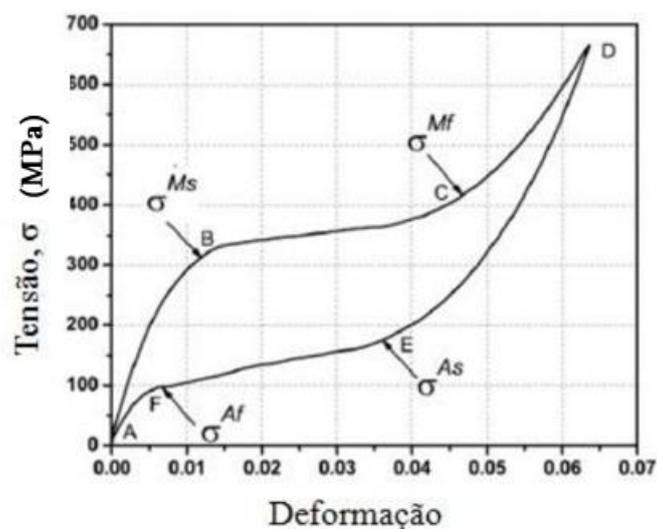


Figura 1.4. Transformação de fase induzida por tensão. Adaptado de [7].

As SMAs, e o nitinol em particular, apresentam um comportamento superelástico a uma temperatura acima de A_f . As temperaturas de transformação M_s , M_f , A_s e A_f são normalmente determinadas por calorimetria diferencial de varrimento (DSC), mas também têm sido determinadas através da medição da resistência e resistividade elétricas [11,12].

As características das ligas à base de NiTi tornam-nas promissoras para utilização como atuadores e sensores em sistemas inteligentes [8,13].

1.2. Sensores NiTi

O potencial de fios à base de NiTi como sensores de posição, deformação ou tensão, tendo por base a medição da resistência elétrica tem sido alvo de estudo. Com efeito, a variação da resistência elétrica pode ser utilizada nos materiais com memória de forma (SMA) para aplicações de *autodeteção* (“self-sensing applications”) [8,14]. Contudo, este processo não é tao simples como parece uma vez que a resistência elétrica é influenciada por fatores como a deformação, a tensão, a temperatura e as fases presentes (austenite, martensite, fase R).

A otimização de sensores SMA depende das características da transformação martensítica. Por outro lado, devido ao efeito de memória de forma, as SMAs têm sido muito estudadas para aplicações como atuadores. Ma et al. [15] desenvolveram um sistema de controle de posição usando como resposta a medida de resistência elétrica de um fio de NiTi. Nestes fios, a resistência é muito dependente da fração de cada fase presente, de modo que os atuadores têm a capacidade única de atuar como os seus próprios sensores de posicionamento [8]. Wu et al. [14], mostraram que para fios NiTi superelásticos, a temperatura constante, a variação da resistência elétrica é função linear da deformação. A possibilidade de utilizar fios NiTi como sensores de deformação ou tensão foi explorada através do estudo da variação da resistência elétrica dos fios durante ensaios termomecânicos. Este estudo permitiu aos autores concluir ser possível usar fios NiTi como sensores de deformação se não se formar a fase R durante o ensaio termomecânico, enquanto que o seu uso como sensores de tensão é mais difícil pois a relação entre a tensão e a resistência elétrica é complexa.

O uso de fios de NiTi como sensores de tensão é de suma importância, pois pode contribuir para o desenvolvimento de sensores de fissuras, e conseqüentemente para a possibilidade de autorreparação (“self-healing”) em materiais metálicos.

1.3. Autorreparação em materiais metálicos

A autorreparação (“Self-healing”) torna-se cada vez mais uma necessidade em todo o tipo de materiais e, uma vez que a maior parte dos materiais utilizados nas mais variadas aplicações não possui a capacidade de se autorrepararem, é necessário estudar sistemas e técnicas de adaptação desses mesmos materiais de modo a que o processo de autorreparação seja possível. Este processo de autorreparação consiste em duas etapas fundamentais: i) deteção de fissuras e ii) reparação dos danos. A deteção atempada de fissuras precursoras de danos irreversíveis constitui um pré-requisito crucial para o desenvolvimento de materiais autorreparáveis.

Ao longo dos últimos anos a possibilidade de autorreparação tem sido investigada, tendo sido alcançados alguns progressos. No entanto, os estudos realizados têm sido sobretudo centrados em materiais poliméricos e materiais cerâmicos [4]. Estudos dedicados a materiais metálicos são escassos, pois a autorreparação em metais é mais difícil, tornando a sua investigação um desafio [16]. Os mecanismos e princípios básicos da autorreparação em metais são ainda desconhecidos e quaisquer contributos constituem uma mais-valia.

A utilização de materiais autorreparáveis é ainda mais premente em locais de difícil acesso, pelo que a possibilidade de autorreparação é crucial para o desenvolvimento da indústria aeronáutica e aeroespacial, bem como para dispositivos biomédicos.

O alumínio e suas ligas têm-se destacado como material de eleição para a indústria automóvel, aeronáutica e aeroespacial.

1.4. Alumínio e suas ligas

O alumínio, um dos metais mais abundantes na crosta terrestre, começou a ser utilizado a partir do século 19 [17] e, com o aumento da sua utilização, é atualmente um dos materiais mais utilizados na indústria devido às suas excelentes propriedades das quais se destacam a baixa densidade, elevada resistência à corrosão, boa condutividade elétrica e térmica, e ao facto de ser fácil de maquinar.

Na maior parte das aplicações o alumínio não é utilizado no seu estado puro, mas sim em forma de liga. As ligas de alumínio são obtidas através da adição de certos elementos ao alumínio puro de forma a melhorar as suas propriedades.

Estas ligas dividem-se em dois grupos [17,18]: ligas para fundição e ligas para trabalho mecânico (laminagem).

As ligas de alumínio para laminagem dividem-se em várias “famílias” dependendo do elemento principal presente na liga. Na tabela 1.2 estão compiladas “famílias” ou séries definidas pela *Aluminium Association*.

Tabela 1.2 Ligas de alumínio, composições e suas aplicações [18, 19].

Série	Elemento Principal	Aplicações
1 xxx	Al puro	Indústria elétrica e química
2 xxx	Cobre (Cu)	Aeronaves
3 xxx	Manganês (Mn)	Aplicações arquitetónicas
4 xxx	Silício (Si)	Fios de soldadura e ligas de brazagem
5 xxx	Magnésio (Mg)	Produtos expostos a ambientes marinhos
6 xxx	Magnésio (Mg) e Silício (Si)	Estruturas e transportes
7 xxx	Zinco (Zn)	Aeronáutica
8 xxx	Lítio (Li), Estanho (Sn), outros.	Outras aplicações

De notar ainda que apenas as ligas 2xxx, 6xxx, 7xxx e 8xxx é que são tratáveis termicamente de modo a aumentar a sua resistência mecânica. O tratamento térmico tem por objetivo promover a formação de precipitados finamente dispersos na matriz de alumínio. O processo de endurecimento por precipitação envolve 3 passos: solubilização, têmpera e envelhecimento. O envelhecimento pode ser efetuado à temperatura ambiente (envelhecimento natural) ou a temperaturas de aproximadamente 15 a 25 % da temperatura de solubilização [20]. Nas restantes, é possível aumentar a dureza por encruamento.

1.4.1. Rotura por fadiga

A maior parte das roturas de materiais que ocorrem em serviço são provocadas pelo fenómeno conhecido como fadiga. Este fenómeno ocorre quando os materiais estão

sujeitos a cargas dinâmicas, ou seja, cargas que variam com o tempo levando assim o material à rotura para valores de tensão inferiores ao valor da tensão limite de elasticidade do material.

A rotura por fadiga deve-se à propagação de fendas que se formam devido a ação das cargas dinâmicas nos locais onde há defeitos ou mau acabamento superficial, originando pontos de elevada concentração de tensões propícios à formação de fendas [21].

1.4.2. Estudo da propagação de fendas

A propagação de fendas surge, numa primeira fase de iniciação, com a nucleação e crescimento microscópico, desenvolvendo-se numa segunda fase, fase de propagação, a sua propagação e conseqüente rotura final do material. [21]

Um dos fatores importantes no estudo da propagação das fendas é o fator de intensidade de tensões, K .

O fator K permite controlar a propagação de fendas em materiais sujeitos a cargas dinâmicas, sendo o seu valor dado pela seguinte expressão [22]:

$$K = \sigma Y \sqrt{\pi a} \quad (1.1)$$

a - Dimensão característica da fenda;

Y - Fator geométrico. Fator adimensional;

σ - Tensão remotamente aplicada.

Quando o valor de K atinge o seu valor crítico, K_c , o material entra em rotura. O fator Y depende da forma geométrica do provete, da fenda e do tipo de carga aplicada.

Para um estudo mais completo da propagação das fendas recorre-se à Mecânica da Fratura Linear Elástica, **MFLE**, que permite relacionar o nível de defeitos e a vida das peças. Assim, podem ser obtidas curvas a - N , que relacionam o comprimento da fenda em função do número de ciclos (N) de carga aplicada, e através dos declives dessas curvas obtêm-se os valores das velocidades de propagação da fenda, da/dN .

Os valores das velocidades de propagação podem então ser utilizados para traçar as curvas $da/dN - \Delta K$ que são fundamentais na caracterização da propagação das fendas.

1.4.3. Curva da/dN –ΔK

Na figura 1.5 está representada uma curva típica **da/dN -ΔK**, no entanto, esta curva pode apresentar pequenas variações, uma vez que esta depende de alguns fatores como as propriedades do material, tensão média, temperatura e meio ambiente.

Os valores de ΔK são obtidos através da seguinte equação:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \tag{1.2}$$

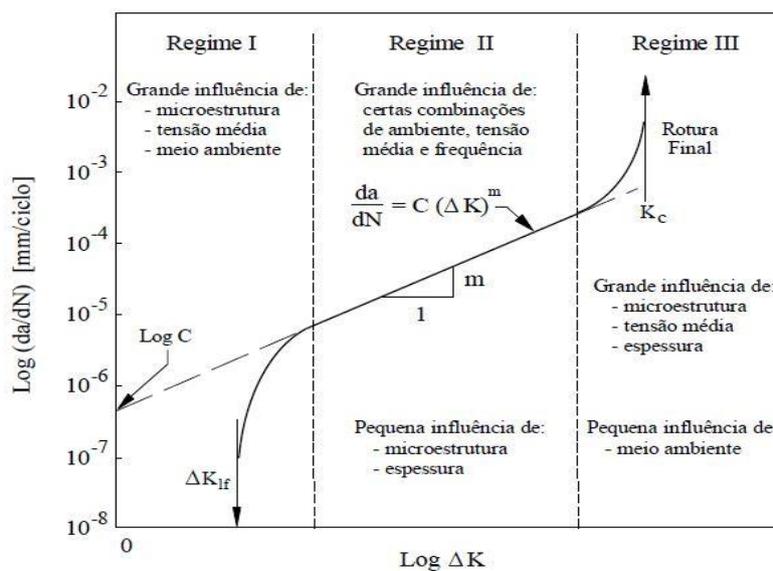


Figura 1.5 Curva típica da/dN – ΔK [23].

Ao analisar a curva facilmente se observam 3 regimes distintos [21,22]:

- *Regime I* - Inicialmente, no regime I, a propagação da fenda ainda é lenta e limitada inferiormente pelo valor ΔK_{lf} (valor abaixo do qual a velocidade de propagação da fenda é inferior a 10^{-7} mm/ciclo), que é o limiar de propagação da

fenda à fadiga. Este regime é afetado por fatores como a microestrutura, a tensão média e o meio ambiente.

- *Regime II* – No segundo regime, a velocidade de propagação aumenta linearmente com ΔK , sendo que, neste regime aplica-se a **Lei de Paris** dada pela equação 1.3:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m = C (\Delta \sigma Y \sqrt{\pi a})^m \quad (1.3)$$

C e m são constantes, dependentes do material, obtidas experimentalmente.

Neste regime há grande influência do ambiente, tensão média e frequência, ao contrário da microestrutura e da espessura que nesta fase não se revelam fundamentais.

- *Regime III* - Por fim, na última fase da propagação da fenda, há uma rápida progressão da mesma e quando o fator de intensidade de tensões atinge o seu valor máximo admissível, K_c , ocorre a fratura do material. Esta fase, é fortemente influenciada pelas propriedades e espessura dos materiais.

2. MATERIAIS E ENSAIOS

2.1. Materiais

2.1.1. Fios de Nitinol

Durante este trabalho foram utilizados fios de nitinol (NiTi) superelásticos que foram fornecidos pela *Fort Wayne Metals* e têm um diâmetro de 0,70 mm (figura 2.1). Nas tabelas 2.1 e 2.2 são apresentadas a composição química e as temperaturas de transição do NiTi fornecidas pelo fabricante.



Figura 2.1 Fio de Nitinol, $\phi = 0,70$ mm.

Tabela 2.1 Composição química dos fios de nitinol, $\phi = 0,70$ mm

Elemento	Composição química (% pd.)
Carbono (C)	0,03 %
Níquel (Ni)	56,15 %
Titânio (Ti)	43,84 %
Oxigénio (O)	0,026 %
Outros	< 0,3301 %

Tabela 2.2 Temperaturas de transição dos fios de nitinol, $\phi = 0,70$ mm.

Temperaturas de transformação de fase	°C
A_s	-51°C
A_p	-40°C
A_f	-31°C

A_s , A_p , A_f – Temperatura de início, pico e fim da austenite

De modo a identificar a estrutura cristalina dos fios de nitinol à temperatura ambiente e assim confirmar que se apresentam na fase austenítica tal como se pretende, foi realizado um ensaio de difração de raios X.

Nestes ensaios, um feixe de raios X incide sobre a amostra e o feixe difratado é contabilizado num detetor, permitindo assim obter um difratograma que nos fornece as contagens do detetor em função do ângulo de incidência dos raios X. Através da comparação dos ângulos para os quais ocorrem “picos de intensidade” com os que constam de fichas padrão, é possível identificar a(s) fase(s) cristalina(s) presente(s).

A difração do feixe de raios X é representada pela lei de Bragg dada pela equação 2.1.

$$n \lambda = 2 d \text{sen}(\theta) \tag{2.1}$$

Com:

n- Número inteiro (ordem de reflexão)

λ- comprimento de onda da radiação

d- Distância entre planos atómicos

θ- ângulo de incidência

Para este ensaio, que foi realizado no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, foram cortados alguns fios de nitinol e colocados uns a par dos outros sobre fita cola de modo a poderem ser colocados no porta-amostra sem se separarem evitando ao máximo o aparecimento de espaços vazios na amostra o que poderia afetar os resultados. O ensaio foi realizado num equipamento PANalytical, modelo X’Pert PRO, com radiação de cobre e utilizando as condições apresentadas na tabela 2.3.

Tabela 2.3 Condições do ensaio de difração de raios X.

Tensão	45 KV
Intensidade da Corrente	40 mA
Intervalo de Difração	25° a 100°
Passo	0,025°
Tempo de passo	3 s
Duração	2h30m

A medição da resistência elétrica dos fios, obriga ao seu isolamento para garantir que não há interferência do provete da liga de alumínio no qual estes vão ser introduzidos. Deste modo, fios de NiTi após desbaste com lixa de SiC 1200 foram revestidos com PTFE por pulverização catódica rf^2 magnetrão. Para o efeito foi utilizado um alvo de PTFE com 100 mm de diâmetro ao qual foi aplicada uma potência de 250 W após introdução de árgon até a pressão na câmara de deposição ser da ordem de 1,3 Pa. O alvo e o substrato foram previamente limpos durante 10 min. utilizando um “shutter” e aplicando a ambos uma potência de 250 W. O tempo da deposição propriamente dito foi de 35 min., dando origem a um revestimento fino com cerca de 2 μm de espessura.

A utilização dos fios de NiTi como sensores obriga à sua introdução num provete do material no qual se pretende detetar a presença de fissuras. Para confirmar que fio e provete estão solidários, é efetuado um ensaio de tração utilizando um provete especialmente concebido para o efeito.

2.1.2. Provete da liga de alumínio AA 5083-H111 para ensaio de tração

Para a realização do ensaio de tração foi desenvolvido um provete numa liga de alumínio AA 5083-H111, que apresenta as seguintes propriedades [24]:

- Densidade: 2,70 g/cm^3
- $T_{\text{fusão}} = 570 \text{ }^\circ\text{C}$
- Coeficiente de dilatação: $25 \times 10^{-6} /\text{K}$
- Módulo de elasticidade: 72 GPa
- Condutividade térmica: 121 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
- Resistividade elétrica: $0,058 \times 10^{-6} \Omega\cdot\text{m}$
- Tensão limite de elasticidade: 125 MPa (Min)
- Resistência à tração: 275 - 350 MPa (Min)
- Dureza: 75 HB

² Radiofrequência

Este provete (medidas no apêndice A) apresenta uma geometria específica para esta aplicação, de forma a que o fio fique no eixo de tração e assim poder estudar o seu comportamento quando se encontra inserido no provete.

Este provete é constituído por duas peças iguais, apresentadas na figura 2.2, que serão unidas pelo fio na zona destacada na figura 2.3 e obter assim o provete na sua forma final para realizar o ensaio de tração.



Figura 2.2 Peças do provete para ensaio de tração.



Figura 2.3 Forma final do provete depois de ser introduzido o fio de nitinol na zona destacada.

Para testar a possibilidade de detetar fissuras através da variação da resistência elétrica de fios de nitinol, pretende-se estudar a propagação de fendas num provete de uma liga de alumínio com geometria não normalizada, tendo em visto o objetivo pretendido.

2.1.3 Provete da liga de alumínio AA6082–T651 para ensaio de fadiga

Para a realização do ensaio de fadiga de propagação de fendas foi também desenvolvido um provete com forma específica e com 6 mm de espessura, sendo que este foi fabricado numa liga de alumínio da série 6000 endurecida por precipitação após tratamento térmico de solubilização e envelhecimento. A liga selecionada foi a AA 6082 – T651, cumprindo a condição imposta pela relação de tensões calculada no apêndice B. O tratamento inicial de solubilização desta liga é realizado a uma temperatura entre 520°C e 540°C durante 0,5 – 1h, seguido de um arrefecimento rápido em água à temperatura ambiente, e posterior envelhecimento artificial a uma temperatura entre 160°C e 170°C durante 8h a 12h [23]. Esta liga apresenta as seguintes propriedades [25]:

- Densidade: 2,70 g/cm³
- $T_{\text{fusão}} = 555 \text{ °C}$
- Coeficiente de dilatação: $24 \times 10^{-6} /\text{K}$
- Módulo de elasticidade: 70 GPa
- Condutividade térmica: 180 W/m·K
- Resistividade elétrica: $0,038 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$
- Tensão limite de elasticidade: 255 MPa (Min)
- Resistência à tração: 300 MPa (Min)
- Dureza: 91 HB

Este provete foi concebido a partir de um provete CT utilizado no estudo de propagação de fendas. O provete, cujas dimensões se apresentam no apêndice C, tem a forma geométrica representada na figura 2.4, que permite a introdução do fio numa zona próxima da extremidade do entalhe e assim a fenda após uma propagação de cerca de 8,5 mm consiga

atingir o fio que será introduzido perpendicularmente ao plano da fenda ao longo de um comprimento de 8 mm.

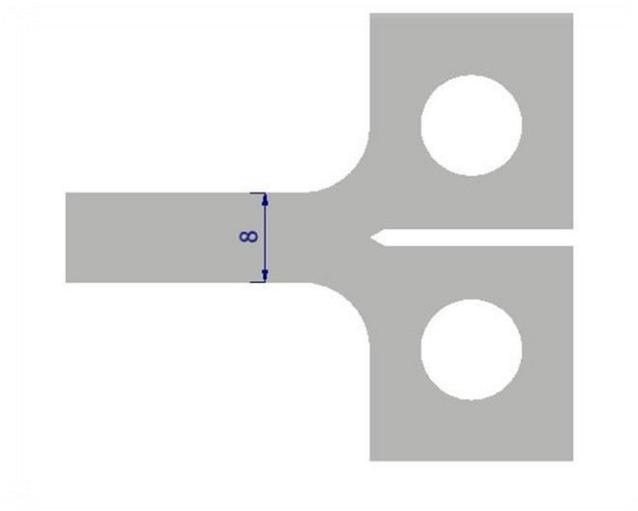


Figura 2.4 Forma geométrica do provete para ensaio de fadiga.

2.3. Introdução dos fios de nitinol nos provetes de ligas de alumínio

A introdução dos fios de nitinol nos provetes das ligas de alumínio foi uma das tarefas mais complicadas e exigentes de todo este processo uma vez que o fio tem que ter um comportamento solidário com o provete e não ocorrer escorregamento para não afetar os resultados.

Para garantir o não escorregamento teríamos que ter furos com menor diâmetro que os fios e conseguir de algum modo introduzir os fios nesses furos. Assim esta etapa começou com a aquisição de brocas de 0,65 mm de diâmetro para fazer os furos onde se vai introduzir o fio de 0,70 mm de diâmetro.

De modo a prever o sucesso ou insucesso da técnica de introdução do fio, foram calculados os valores da variação de diâmetros através das variações de temperatura descritas abaixo (apêndice D) e também da pressão de aperto mediante a variação de diâmetros (apêndice E) de modo a confirmar se o aperto previsto é suficiente para o objetivo.

Inicialmente foram realizados alguns testes preliminares, em chapas de 6 e 3 mm de espessura onde foram feitos alguns furos com as brocas adquiridas, como se mostra nas figuras 2.5 e 2.6, para se definir os passos necessários antes de aplicar a técnica nos provetes. Assim, a técnica passou por aquecer a liga de alumínio a uma temperatura de aproximadamente 300 ° C, provocando a sua dilatação e aumento do diâmetro do furo, e num processo de tentativa/ erro tentar que o fio, afiado na sua extremidade, atravessasse os furos. De notar que este aquecimento ocorre a uma temperatura superior à temperatura de envelhecimento, pelo que as propriedades mecânicas da liga são alteradas. Constatou-se que apenas o aquecimento da liga de alumínio não era suficiente pois foram muito poucas as tentativas feitas com sucesso e essas ocorreram apenas para uma espessura de 3 mm. Assim, tornou-se necessário completar a técnica com um passo extra que contribuísse positivamente para o resultado final. Neste segundo passo, para além do aquecimento da liga de alumínio procedeu-se também ao arrefecimento do fio de nitinol num banho de azoto líquido. O azoto líquido encontra-se a uma temperatura que ronda os -200°C levando a que o fio comprima e reduza o seu diâmetro enquanto se encontra a essa temperatura. Conseguiu-se melhorar a margem de manobra uma vez que para além do aumento de diâmetro do furo também o fio diminui a sua seção, no entanto a baixa temperatura do azoto faz com que o nitinol passe da fase austenítica para fase martensítica e assim o fio torna-se muito mais deformável o que dificulta bastante este trabalho que é feito manualmente. No entanto, ao manter o fio à temperatura ambiente acaba por ocorrer a transformação inversa com formação de austenite

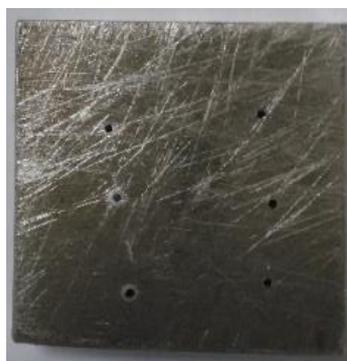


Figura 2.5. Chapa de alumínio de 6 mm.



Figura 2.6 Chapa de liga de alumínio de 3 mm com o fio introduzido.

Aplicando este procedimento aos provetes da liga 5083, os fios foram também afiados nas extremidades com o auxílio de um esmeril, o que permitiu que a introdução dos mesmos fosse mais rápida e assim a taxa de sucesso desta técnica aumentou como se pode observar na figura 2.7 onde se apresenta o provete para o ensaio de tração já com o fio introduzido.

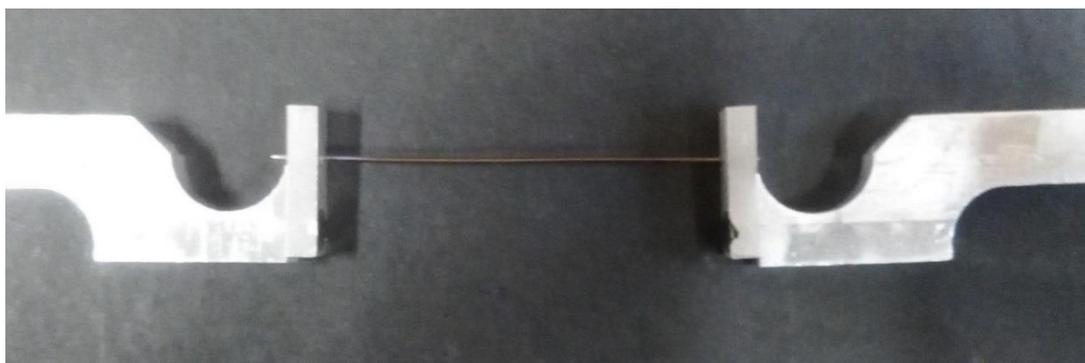


Figura 2.7 Provette da liga de alumínio AA 5083 para ensaio de tração com o fio introduzido.

2.4. Ensaio mecânicos

2.4.1. Ensaio de tração do fio de Nitinol

Um dos objetivos do trabalho é garantir que a tensão na ponta da fissura seja suficiente para induzir a transformação martensítica do fio de nitinol. Neste sentido torna-se necessário conhecer o valor da tensão de início da martensite do fio, e para isso recorremos a um ensaio de tração.

Os ensaios de tração são muito utilizados para estudar o comportamento mecânico dos materiais, sendo que neste caso o material que queremos estudar é o fio de nitinol.

Para este ensaio foram utilizadas amarras específicas apresentadas na figura 2.8, que foram disponibilizadas pelo IPN, e que impedem o escorregamento do fio durante o ensaio e não provocam dano nas zonas de fixação.



Figura 2.8 Amarras para o fio de Nitinol.

Este ensaio, realizado no DEM na máquina da marca *Shimadzu* e modelo *Autograph AG-X* com célula de carga de 5 kN e com o auxílio de um extensómetro *Shimadzu*

SSG25-50SSG, com 25 mm de comprimento de referência l_0 , seguiu o procedimento indicado na norma ASTM F 2516-07 “Standard Test Method for Tension of Nickel-Titanium Superelastic Materials”.

O ensaio de tração compreendeu várias etapas (figura 2.9). Inicialmente o fio, com 125 mm de comprimento de prova, foi tracionado a uma velocidade de 2,5 mm/min, até se atingir 6 % de deformação registada pelo extensómetro. Quando atingido este valor, decorreu um período de 2s antes de se iniciar a descarga à mesma velocidade até se atingir uma tensão de 7 MPa (fim da segunda etapa). Após um novo período de 2s teve início a etapa final do ensaio onde se aplicou carga, agora a uma velocidade de 25 mm/min até ocorrer a rotura do fio.

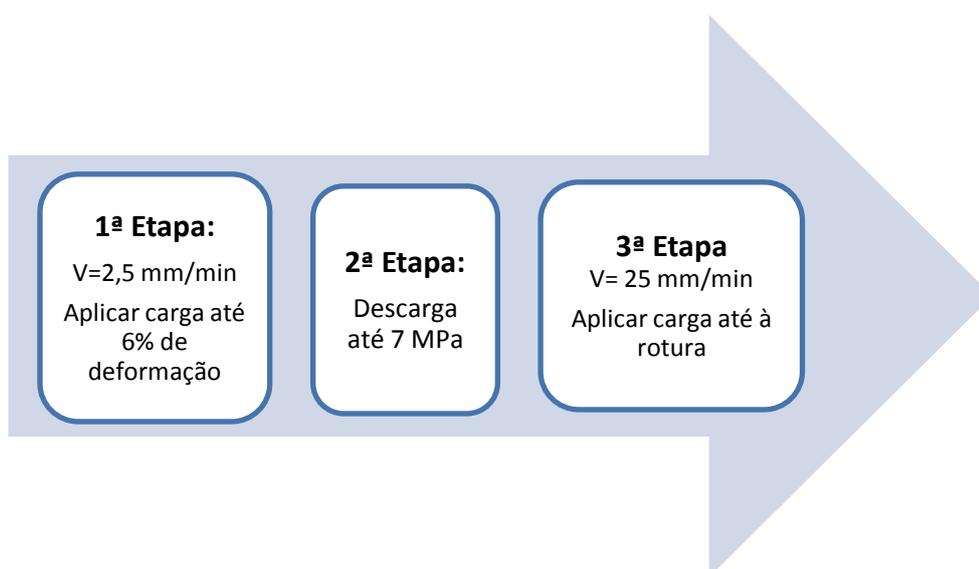


Figura 2.9 Sequência de etapas do ensaio de tração ao fio de nitinol.

Na figura 2.10 é possível observar a máquina utilizada com os devidos componentes já montados para se proceder ao ensaio e na figura 2.11 pode-se ver, com mais pormenor, o fio de nitinol (1) e o extensómetro (2).



Figura 2.10 Montagem do ensaio de tração.

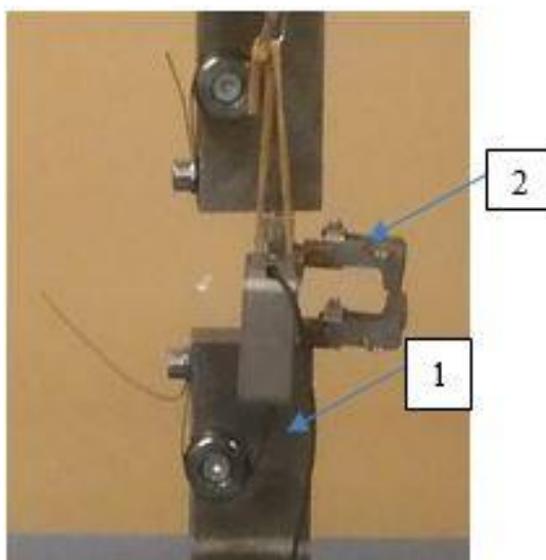


Figura 2.11 Fio de Nitinol (1) e Extensómetro (2).

2.4.2. Ensaio de tração do provete da liga de alumínio AA 5083 com o fio de nitinol

Como referido anteriormente, pretende-se que o fio de nitinol apresente um comportamento solidário com o provete e para isso é necessário que não ocorra escorregamento entre ambos. Assim foi realizado um ensaio de tração de modo a verificar a condição de não escorregamento até tensões próximas da tensão de início da transformação martensítica.

Este ensaio foi realizado no DEM na máquina *Shimadzu* (ver subcapítulo 2.4.1), com uma velocidade de 0,5 mm/min /figura 2.12).



Figura 2.12 Montagem do ensaio de tração dos provetes com o fio de nitinol introduzido.

2.4.3. Ensaio de fadiga do provete da liga de alumínio AA 6082 com o fio de nitinol

Como já foi referido, um dos principais objetivos deste trabalho é avaliar se os fios de nitinol funcionam como detetores da propagação de fendas, através do registo de variações das suas propriedades elétricas.

Assim, foi efetuado um ensaio de fadiga de propagação de fendas utilizando o provete com a forma já descrita, e com o fio NiTi isolado eletricamente, introduzido e fixado por colagem. Neste ensaio, realizado no laboratório de construções mecânicas do DEM, na máquina servo-elétrica da marca *Instron* e modelo *Eletropuls E 10000* (figura 2.13) com capacidade de carga até 10 KN, foram necessários os dados da simulação numérica, e foram aplicados ciclos de carga uniaxial com $\Delta P = 150$ N e frequência de 15 Hz.



Figura 2.13 Máquina utilizada para ensaio de propagação de fendas.

De modo a acompanhar a sua propagação, a fenda foi periodicamente acompanhada visualmente com recurso a uma câmara microscópica. De modo a melhorar a percetibilidade da fenda o provete foi previamente desbastado utilizando lixas de SiC 350, 600, 1000 e 2500 mesh e no fim foi aplicada uma suspensão de diamante de 3 μm num pano de polimento. Na figura 2.14 apresenta-se o provete polido e com o fio isolado introduzido

estando por isso preparado para a realização do ensaio. Durante o ensaio de propagação de fendas foi utilizada uma sonda de 4 pontos para registo da diferença de potencial do fio NiTi.



Figura 2.14 Provete polido e com o fio introduzido, pronto para o ensaio de propagação de fendas.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1. Caracterização dos fios de Nitinol

Para a caracterização dos fios de nitinol a serem utilizados neste trabalho foi efetuado um ensaio de difração de raios X nas condições indicadas no subcapítulo 2.1.1. Através do difratograma resultante (figura 3.1), e com o auxílio das fichas ICDD de raios X do anexo A, é possível saber qual a estrutura cristalina presente nos fios à temperatura ambiente.

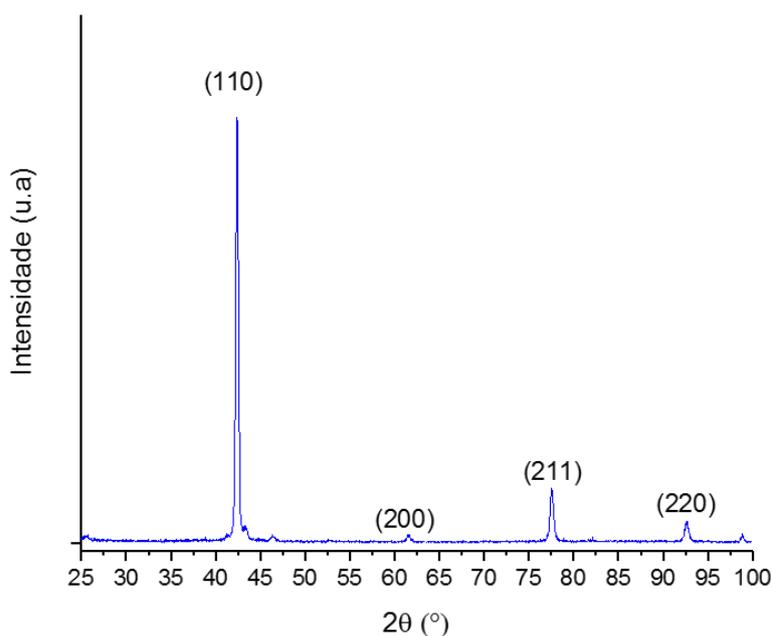


Figura 3.1 Difratograma de raios X do fio de nitinol com $\phi = 0,70$ mm.

Comparando a posição dos picos de raios X da figura 3.1 com os da ficha da fase B2- NiTi (ficha nº 18-0899), conclui-se que os fios apresentam, à temperatura ambiente, estrutura cúbica de corpo centrado confirmando assim a presença da fase austenítica tal como

era pretendido, e que não há presença de fase martensítica, pois todos os picos são indexados como B2-NiTi.

3.2. Ensaio mecânicos

3.2.1. Transformação martensítica induzida por tensão

Uma vez que um dos objetivos do trabalho é confirmar se a tensão gerada pela fenda é suficiente para induzir a transformação martensítica, é necessário conhecer o valor da tensão à qual se inicia a transformação de fase de austenite para martensite.

Assim, através de um ensaio de tração realizado apenas ao fio de nitinol nas condições já indicadas no capítulo anterior, é obtido o gráfico tensão-deformação apresentado na figura 3.2.

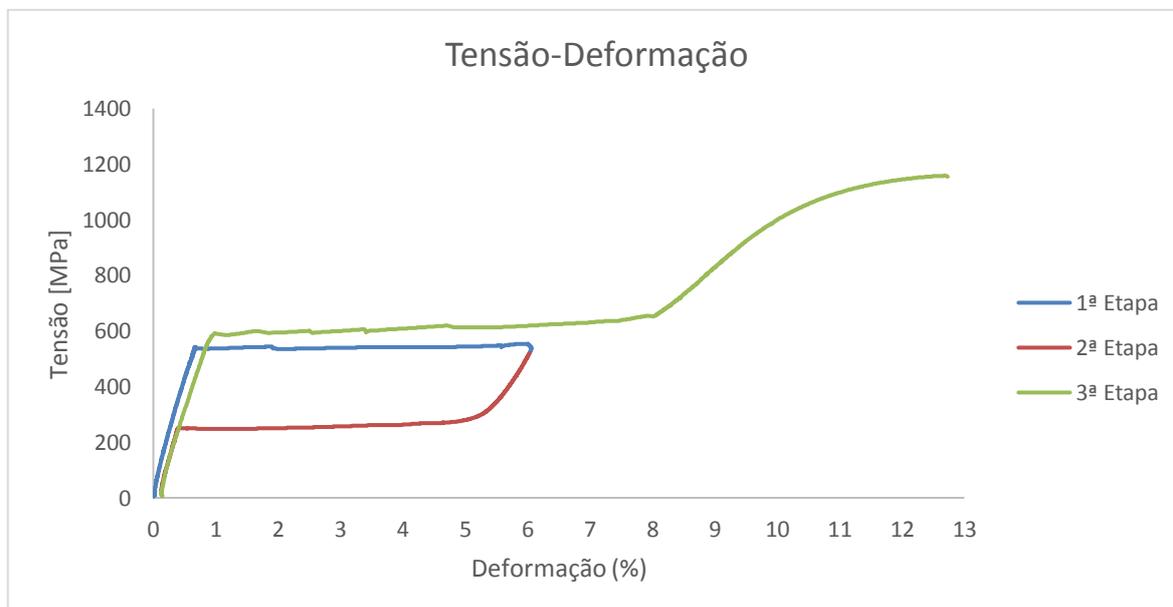


Figura 3.2. Gráfico Tensão – Deformação do fio de nitinol.

No gráfico da figura 3.2 os valores de deformação foram medidos pelo extensómetro axial, enquanto que a tensão corresponde à razão entre a força aplicada e a área da secção inicial do fio (considerada constante). Analisando o gráfico tensão-deformação, inicialmente observa-se que até uma deformação de aproximadamente 0,7 % a tensão aumenta linearmente com a deformação (regime elástico), onde ocorre uma ligeira redução de carga devido ao brusco incremento de alongamento resultante do início da transformação martensítica. Na fase seguinte a tensão mantém-se aproximadamente constante para valores de deformação compreendidos entre cerca de 0,7 e 6%. Ao atingir 6% de deformação a carga aplicada é aliviada e a deformação é recuperada (2ª etapa a vermelho), dando origem à histerese observada no gráfico. Aplicando carga novamente, observa-se uma evolução idêntica à inicial, mas com ligeiro deslocamento para cima e para a direita (3ª etapa a verde). Quanto à rotura do fio, esta ocorre no fim da 3ª etapa do ensaio para valores de deformação a rondar os 13 %.

O comportamento observado é típico de fios superelásticos para os quais ocorre a transformação martensítica, o que justifica o aumento acentuado da deformação a partir de cerca de 0,7 %, pois a martensite formada é mais deformável que a austenite. Quando se procede à descarga, ocorre a transformação inversa com formação da fase austenítica. O ponto onde se inicia a transformação de fase corresponde a uma tensão de aproximadamente 535 MPa. Conclui-se assim, que o valor de σ^{Ms} é 535 MPa, enquanto que σ^{As} é da ordem de 270 MPa (ver figura 1.4).

De acordo com a norma ASTM F 2516-07, é frequente caracterizar os materiais superelásticos à base de NiTi pelos valores de “Upper Plateau Strength” (UPS) e “Lower Plateau Strength” (LPS), que correspondem à tensão para uma deformação de 3,0 % durante o carregamento inicial e à tensão para uma deformação de 2,5 % durante a descarga, respetivamente. De acordo com o gráfico da figura 3.2, para o fio em estudo $UPS \approx 540$ MPa e $LPS \approx 250$ MPa. Estes valores são ligeiramente diferentes dos indicados pelo fornecedor.

3.2.2. Ensaio de tração em provetes com fio

Como referido no capítulo anterior, para aferir se o fio de nitinol inserido no provete de tração apresenta comportamento solidário com a liga de alumínio recorreu-se a um ensaio de tração realizado nas condições indicadas no capítulo 2. Como se concluiu através do cálculo das variações de diâmetro com as variações de temperatura impostas, tal variação não será suficiente para colocar o fio de $d = 0,70$ mm no furo de $D = 0,65$ mm, pois o valor é inferior ao valor da variação que se quer obter, e por isso seriam necessárias temperaturas muito superiores, impraticáveis do ponto vista experimental. No entanto, através do cálculo da pressão de aperto (apêndice E) com as variações de diâmetro pretendidas, conclui-se que seriam suficientes para o sucesso da técnica. Apesar destes resultados preverem o insucesso da técnica, foram realizadas algumas tentativas experimentais.

Após se ter inserido o fio de nitinol no provete da liga de alumínio através da técnica já descrita, com aquecimento do provete e arrefecimento do fio em azoto líquido, procedeu-se ao respetivo ensaio de tração do qual resultou o gráfico apresentado na figura (3.3):

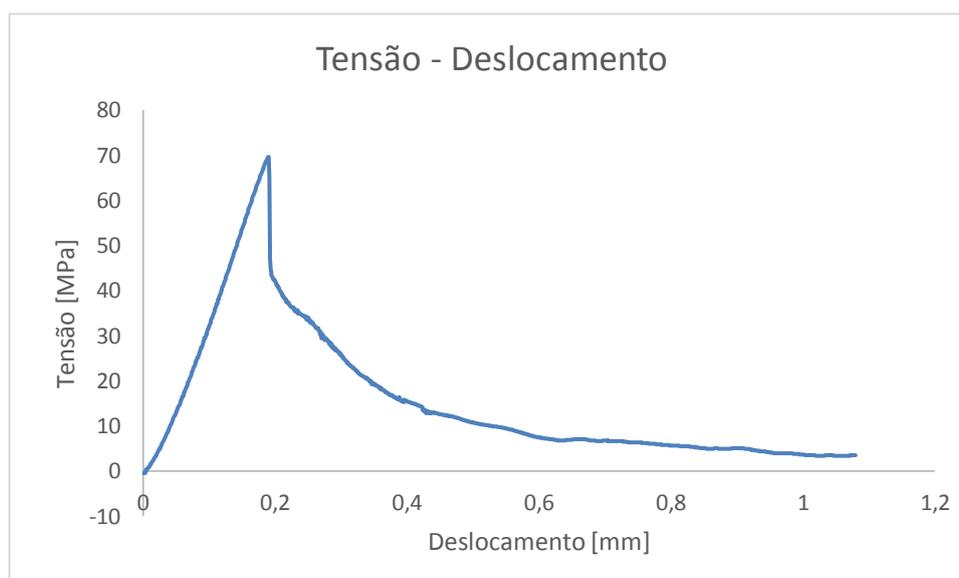


Figura 3.3 Gráfico Tensão – Deslocamento do ensaio de tração do provete da liga de alumínio com o fio introduzido.

Como se pode observar, o valor de tensão aumenta linearmente até aproximadamente 70 MPa e depois há uma descida significativa registada devido ao escorregamento do fio relativamente ao provete da liga de alumínio. Assim, a tensão máxima que o fio aguentou sem deslizar ronda os 70 MPa, que é um valor baixo comparativamente ao valor que queremos atingir, ou seja o valor da tensão de indução da transformação martensítica que é aproximadamente 535 MPa.

Tornou-se então necessária uma adaptação da técnica de introdução do fio de modo a que a tensão para a qual há escorregamento apresente resultados mais elevados, mais próximos do valor desejado. Caso contrário não estão reunidas as condições para a realização do ensaio de fadiga de propagação de fendas.

Deste modo, optou-se por fazer furos de 0,70 mm substituindo os de 0,65 mm feitos anteriormente. Uma vez que com furos de 0,70 mm o fio passa livremente e, por forma a “fixar” os fios nos furos, foi aplicada cola (cianoacrilato) aquando da sua introdução na liga de alumínio. Esta é uma cola de efeito rápido e que apresenta valores de tensão de corte entre 10 e 20 MPa, o que se traduz numa força de resistência ao corte da junta colada entre 90 e 180 N (cálculos apresentados no apêndice F).

Tal como se pode observar através da figura 3.4 esta adaptação na técnica de introdução do fio permitiu introduzi-lo com mais facilidade e com garantia que toda a espessura do provete é atravessada pelo fio de 0,70 mm, ao contrário do que acontecia em algumas tentativas já referidas anteriormente pelo processo de ajustamento com aperto por diferenciação de temperaturas.

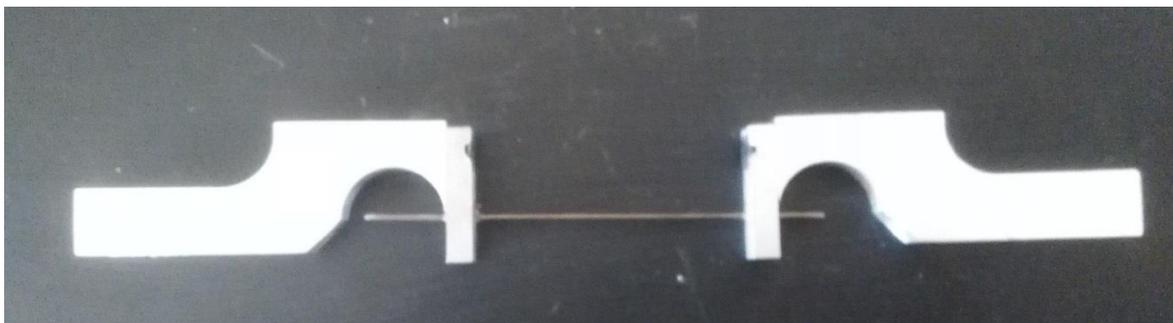


Figura 3.4 Provete da liga de alumínio com fio colado.

Foi realizado um novo ensaio de tração, agora com o fio colado, na tentativa de melhorar os resultados. O gráfico tensão-deformação deste ensaio é apresentado na figura 3.5.

O comportamento melhorou bastante, uma vez que o valor da tensão para a qual se inicia o escorregamento do fio é cerca de 300 MPa, sendo este um valor muito superior ao obtido no ensaio anterior. Assim, o método de introdução do fio por “colagem” revela-se mais eficiente do que o método anterior.



Figura 3.5 Gráfico Tensão – Deslocamento do ensaio de tração do provete da liga de alumínio com o fio colado.

Uma vez que no provete de fadiga o fio vai atravessar uma espessura de 8 mm, optou-se por realizar um ensaio de tração em que o fio atravessa também uma espessura de 8 mm em vez dos 4 mm usados nos provetes anteriores, de modo a avaliar a influência do comprimento de colagem. No gráfico da figura 3.6 apresentam-se os resultados deste ensaio de tração.



Figura 3.6 Gráfico Tensão – Deslocamento do ensaio de tração do provete com o fio inserido ao longo de uma espessura de 8 mm.

Neste caso observa-se um aumento ainda mais significativo do valor de tensão de início de escorregamento do fio, atingindo valores de aproximadamente 500 MPa, o que permite concluir que o aumento da espessura também contribui positivamente para os objetivos que se querem alcançar.

Uma vez confirmada a condição de não escorregamento até um valor de tensão próximo do valor da tensão de indução da transformação martensítica, estão reunidas as condições experimentais para passar à etapa seguinte - o ensaio de propagação de fendas. No entanto, para realizar este ensaio são também necessários resultados de simulação numérica, de modo a definir os parâmetros a adotar.

3.2.3. Simulação numérica

Visto que o provete para o ensaio de fadiga foi desenhado especialmente para este trabalho, a sua geometria é diferente da geometria normalizada de provetes CT.

Assim, através de uma simulação numérica do ensaio de fadiga, realizada no programa *COSMOS^M 2010* segundo a norma ASTM E399 – “Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials” - foram estudados os seus parâmetros, nomeadamente o fator geométrico (Y).

Para a simulação foi necessário desenvolver uma malha, apresentada na figura 3.7. Nesta malha, constituída por 2973 elementos e 9316 nós, com condições de fronteira e integral-J para $a/W = 0,306$, sendo “a” a dimensão característica da fenda e W a distância do centro do furo à extremidade do provete, foram utilizados elementos “Plane 2D” e foi considerada apenas metade da geometria em estado plano de deformação. A força é aplicada no furo, e foram testados 2 casos: 5 forças e 1 força segundo o eixo YY, sendo que as diferenças nos valores de K eram desprezáveis.

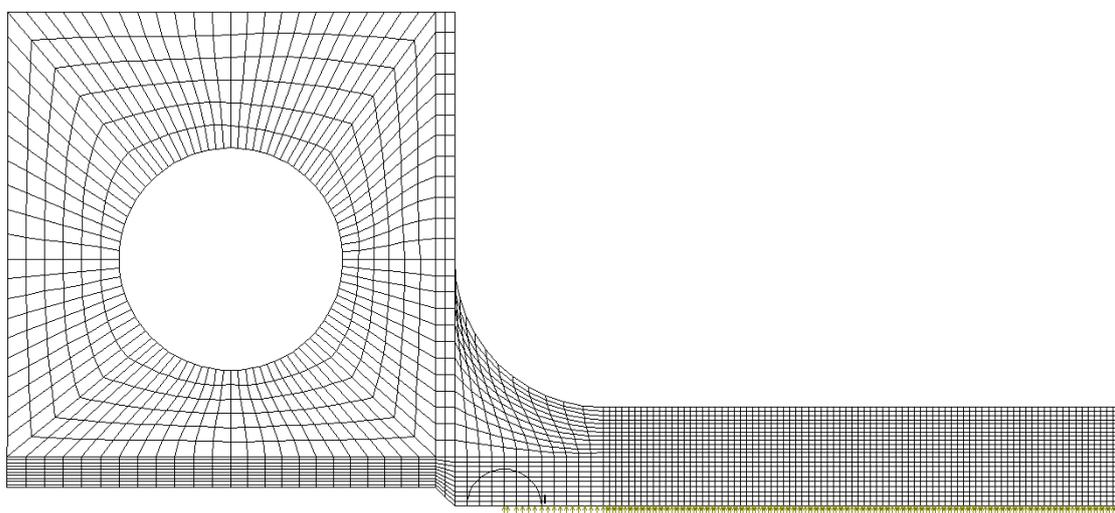


Figura 3.7 Malha desenvolvida para o provete especialmente desenhado para este trabalho.

Para comparação de resultados foi desenvolvida também uma malha do provete CT normalizado, constituída por 4124 elementos e 12772 nós, apresentada na figura 3.8. Tal como na malha da figura 3.7, as zonas 1 e 2 possuem uma área de 0,5 x 0,2 mm² e 0,25 x 0,2 mm², respetivamente.

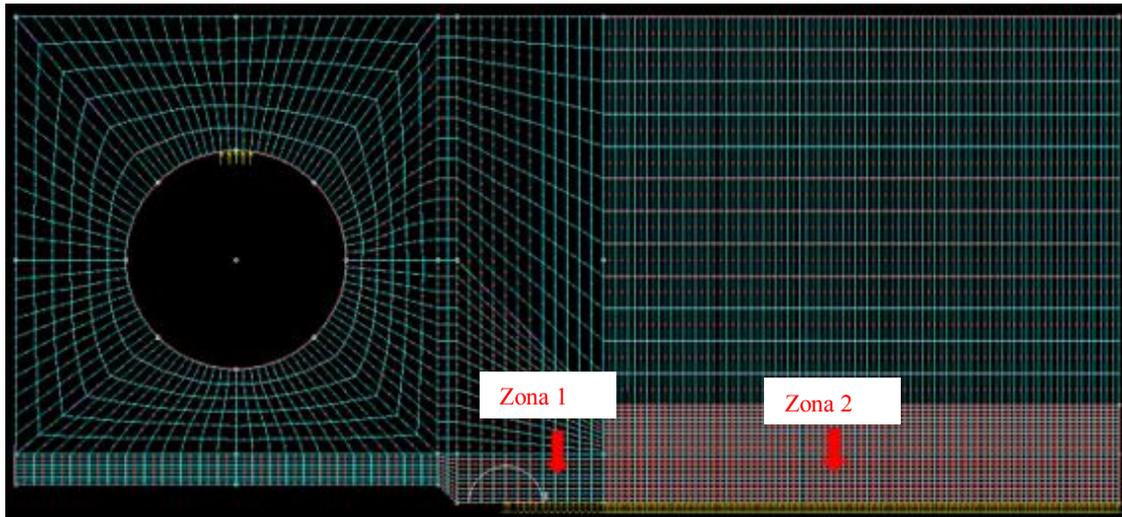


Figura 3.8 Malha desenvolvida para provete CT normalizado.

Segundo a norma acima referida, o valor do fator de intensidade de tensões é dado pela equação 3.1, em que o fator geométrico é calculado pela equação 3.2.

$$K = \left[\frac{P}{(B * W)^{1/2}} \right] * Y(a/W) \quad (3.1)$$

$$Y(a/W) = \frac{[2 + (a/W)(0.8666 + 4.64(a/W) - 13.32(a/W)^2 + 14.72(a/W)^3 - 5.6(a/W)^4)]}{(1 - a/W)^{3/2}} \quad (3.2)$$

O fator geométrico do provete não normalizado é calculado com recurso à equação 3.3, sendo que este se relaciona com os valores do fator de intensidade de tensões resultantes da simulação numérica.

$$Y = \frac{KB \sqrt{W}}{P} \tag{3.3}$$

Na figura 3.9 estão representados os valores do fator de intensidade de tensões (K) resultantes da simulação numérica do provete desenvolvido no âmbito deste trabalho. Os valores do fator geométrico (Y), que dependem do valor do comprimento da fenda (a), obtidos para um provete normalizado (equação 3.2) e para o provete não normalizado (equação 3.3) encontram-se no gráfico da figura 3.10, possibilitando a comparação entre ambos.

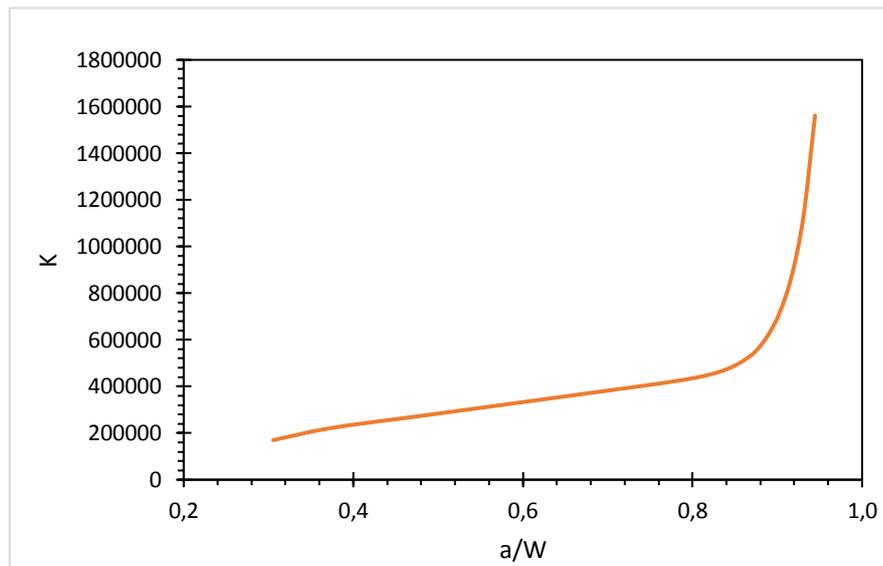


Figura 3.9 Fator de intensidade de tensões (K) em função da relação a/W.

Os valores de K foram determinados para relações a/W entre 0,306 e 0,944 com incrementos constantes de 0,0139.

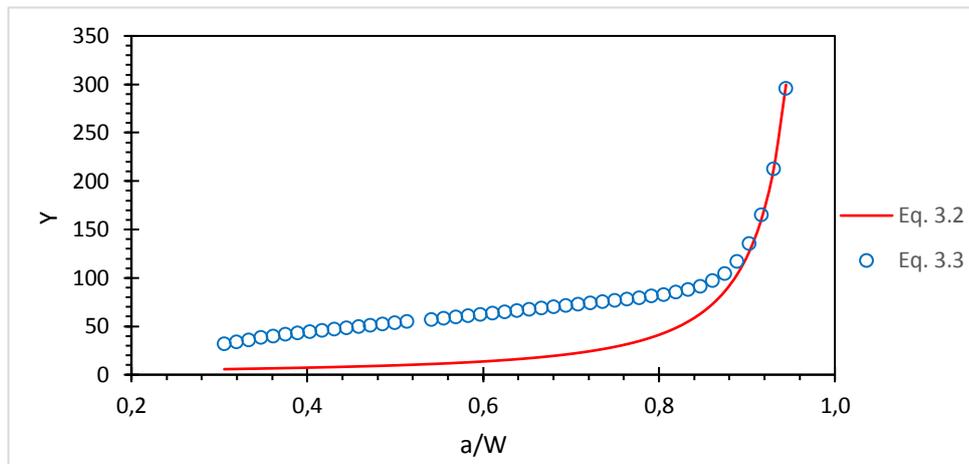


Figura 3.10 Fator geométrico calculado pelas equações 3.2 e 3.3.

Analisando o gráfico pode-se concluir que os valores do fator geométrico do provete adaptado, calculados pela equação 3.3, para valores de a/W até aproximadamente 0,9 são muito superiores aos valores do provete normalizado. No entanto, a partir desse valor da relação a/W , os valores do fator geométrico são semelhantes para ambos os provetes.

Foi também registado e analisado o valor do Integral-J, que permite uma análise energética do problema em questão, isto é, através do seu valor é possível observar de que modo aumenta a taxa de libertação de energia de deformação na zona próxima do entalhe e através da qual se propaga a fenda. O gráfico da figura 3.11 apresenta os valores deste parâmetro em função do comprimento da fenda.

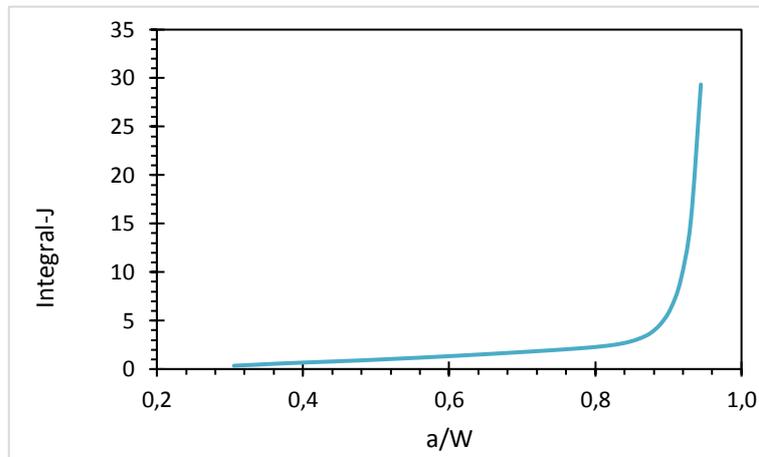


Figura 3.11 Integral – J.

Por fim, recorreu-se à equação 3.4, que resulta da soma da equação 3.2 da norma com um polinómio de grau 6, havendo assim um ajustamento dos valores do fator geométrico de modo a calcular novamente Y e fazer a respetiva comparação com os resultados anteriores.

$$\begin{aligned}
 Y(a/W) = & \frac{[2 + (a/W)(0.8666 + 4.64(a/W) - 13.32(a/W)^2 + 14.72(a/W)^3 - 5.6(a/W)^4]}{(1 - a/W)^{3/2}} \\
 & + (2.780536 * 10^4(a/W)^6 - 9.708531 * 10^4(a/W)^5 + 1.356213 * 10^5(a/W)^4) \\
 & - 9.719311 * 10^4(a/W)^3 + 3.758268 * 10^4(a/W)^2 - 7.322075 * 10^3(a/W) \\
 & + 5.818133 * 10^2
 \end{aligned} \quad (3.4)$$

No gráfico da figura 3.12 apresenta-se a comparação entre os valores do fator geométrico calculados pelas equações 3.3 e 3.4. Apesar de se registarem pequenas diferenças, estas são mínimas, sendo os valores muito próximos.

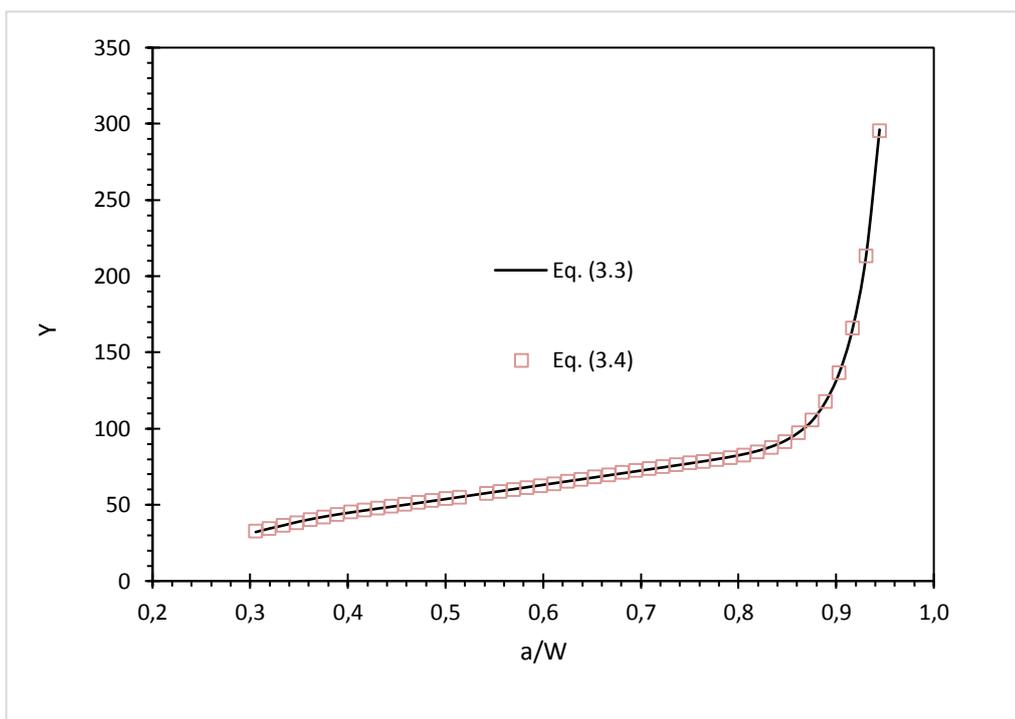


Figura 3.12 Fator geométrico calculado pelas equações 3.3 e 3.4.

3.2.4. Ensaio de fadiga de propagação de fendas

O provete devidamente preparado para ser submetido ao ensaio de propagação de fendas, é colocado na máquina e completa-se a montagem do ensaio com os aparelhos necessários para medir as propriedades elétricas. Para o feito foi utilizada uma fonte de corrente a fornecer 1A ao fio e simultaneamente foi feita a medição da diferença de potencial no fio com recurso a um multímetro. Para obter os valores de resistência aplica-se a lei de Ohm, equação 3.5, que relaciona o valor da resistência elétrica (R) com a intensidade de corrente (I) e a diferença de potencial (V) medida.

$$V=RI \tag{3.5}$$

Considerando que se aplicou uma corrente de 1 A e que a diferença de potencial medida no início do ensaio era de 0,14 V, foi determinada a resistência. A resistividade do

NiTi foi então calculada sabendo o diâmetro e o comprimento do fio. O valor de aproximadamente $90 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ está de acordo com os valores reportados na literatura para a fase austenítica (ver tabela 1.1). Na figura 3.13 estão representados a fonte de corrente e o multímetro utilizado neste trabalho. A montagem total do ensaio pode ser observada na figura 3.14.

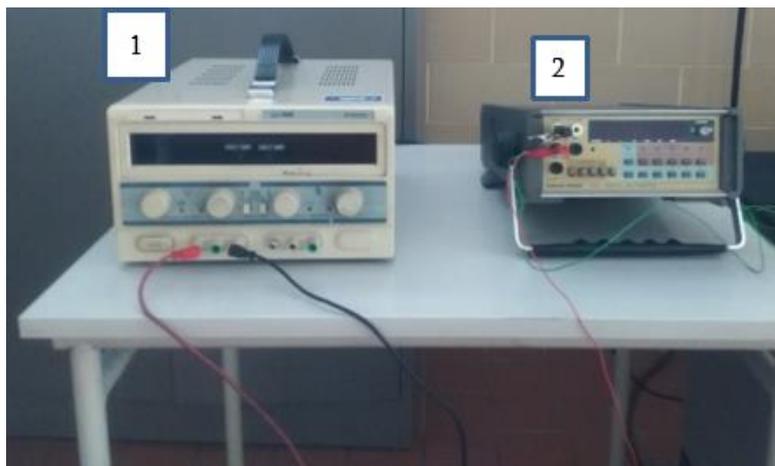


Figura 3.13 Fonte de corrente (1) e multímetro (2) utilizados.

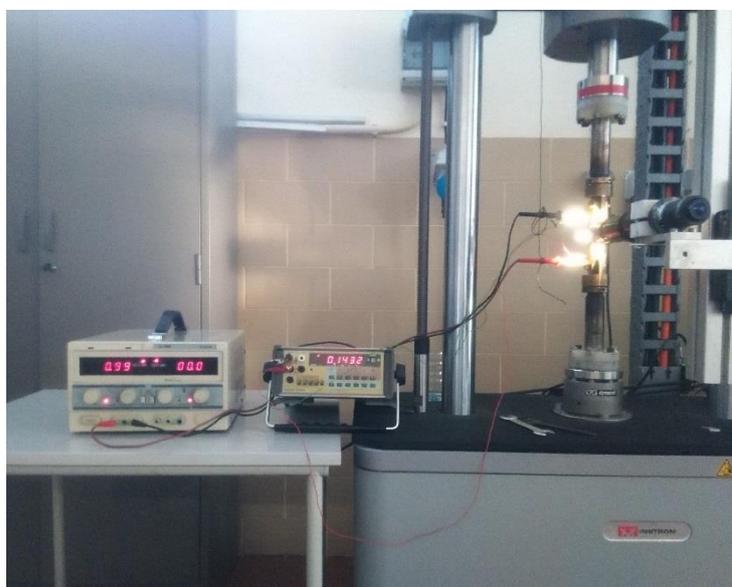


Figura 3.14 Montagem do ensaio de fadiga de propagação de fendas.

Uma vez iniciado o ensaio utilizando os parâmetros definidos com base na simulação numérica, e após um período de tempo até à abertura da fenda, foi possível

acompanhar a sua propagação. A abertura de fenda com o provete adaptado, não ocorria de acordo com o observado para provetes normalizados, o que obrigou a ajustes de ΔP e frequência. A partir desta etapa, surgiram alguns entraves ao sucesso do ensaio. Devido à forma do provete, especialmente a partir da zona do entalhe, a fenda propagou-se numa direção de tal forma inclinada (representada na figura 3.15) que, com a continuação da sua propagação, levaria o provete à rotura antes de atingir o fio, levando assim ao insucesso do ensaio uma vez que para funcionar como sensor de fissuras, a fenda teria que no seu percurso “encontrar” o fio de NiTi.

Assim, o ensaio foi interrompido e, na tentativa de resolução do problema, foi ajustada a medida do entalhe, prolongando-o até uma zona mais próxima do fio e, numa nova tentativa foi realizado um segundo ensaio. Neste caso, a direção de propagação de fenda também tomou uma direção desfavorável e, portanto, não foi possível medir os valores de diferença de potencial do fio de nitinol na presença da fissura, pois esta não chegou ao local onde se encontrava o fio. Face ao exposto, o entalhe foi novamente aumentado até ao limite permitido pela ferramenta utilizada; após o que o ensaio foi repetido. Mais uma vez, foi necessário interromper o ensaio de modo a evitar a rotura do provete antes de, como pretendido, atingir o fio.

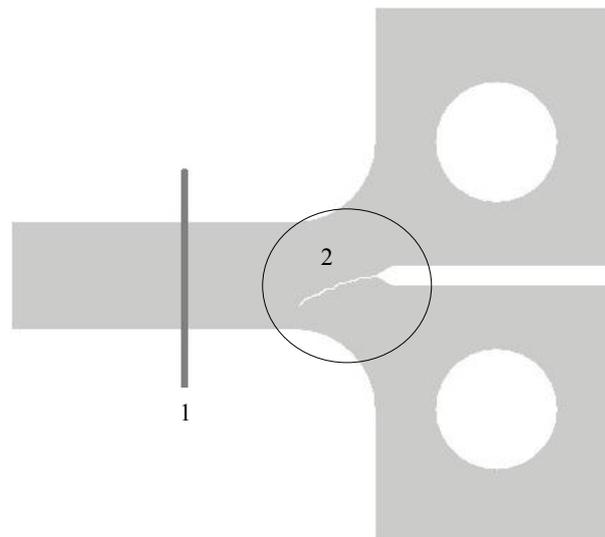


Figura 3.15 Representação da direção de propagação da fenda. (fio (1) e fenda (2))

Com base nos ensaios de fadiga de propagação de fendas pode-se concluir que o provete adotado neste trabalho é inapropriado para esta aplicação. A sua reduzida secção na zona de propagação da fenda, sujeita as secções transversais do provete, acima e abaixo do entalhe, a elevados esforços de flexão, tornando favorável a propagação da fenda em direção às fronteiras superior e inferior que se encontram apenas a 4 mm de distância. A solução passa por desenvolver um novo provete com ajustamento das medidas nessa zona crítica, ou seja, incrementar a altura do provete, atualmente de 8 mm até ao limite permitido pela realização do furo com uma broca de diâmetro 0,70 mm para a introdução do fio de nitinol. Na primeira solução de fixação do fio por ajustamento mecânico esta dimensão estava limitada pela dificuldade de introdução do fio, mas com a nova abordagem de fixação do fio por colagem, a limitação passou a ser a operação de abertura do furo.

4. CONCLUSÕES

Depois de analisados os resultados de todo o trabalho aqui apresentado e tendo em consideração os objetivos enunciados, é possível retirar as seguintes conclusões:

- Os fios de nitinol apresentam-se na fase austenítica à temperatura ambiente cumprindo uma das condições necessárias para a realização do sensor de fissuras;
- A técnica de introdução do fio de nitinol na liga de alumínio da série 5000 prevista através das variações dimensionais do nitinol e da liga de alumínio por efeito da temperatura revelou-se de difícil execução e inapropriada para o trabalho em questão;
- A introdução do fio de nitinol tornou-se mais eficaz através de um furo onde o fio é introduzido livremente e fixado com cola cianoacrilato;
- Com a realização dos ensaios de tração percebeu-se que quanto maior o comprimento de colagem maior será o valor de tensão para a qual ocorre escorregamento do fio, ou seja, um maior comprimento de colagem é mais favorável para que os materiais apresentem comportamento solidário.
- Com ensaio de fadiga de propagação de fendas, realizado utilizando os parâmetros provenientes da simulação numérica, conclui-se que o provete utilizado não possibilita que a fenda se propague no plano perpendicular à direção de carga até alcançar o fio e por isso é inapropriado para esta aplicação. A solução passa por ajustar a secção do provete na zona de propagação da fenda.

Como trabalho futuro, será necessário otimizar a introdução dos fios NiTi nos provetes de ligas de alumínio, bem como o registo da resistência elétrica durante os ensaios mecânicos, para além de redimensionar o provete desenvolvido para o ensaio de propagação de fendas, por forma a detetar a propagação de fendas através da variação de resistência

elétrica do nitinol provocada pela transformação martensítica. No entanto, o trabalho realizado no âmbito desta dissertação permitiu alcançar resultados relevantes com vista ao desenvolvimento de um sensor de fissuras, contribuindo para a possibilidade de autorreparação em materiais metálicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J.M. Jani, M. Leary, A. Subic e M.A. Gibson, “A review of shape memory alloy research, applications and opportunities”, *Materials and Design*, vol. 56, pp. 1078-1113, 2014.
- [2] H. Yu e M.L. Young, “Three-dimensional modeling deformation of austenitic shape memory alloys under high strain rate”, *Smart Materials Structure*, vol. 27, 01503 (14 pp.), 2017.
- [3] K. Otsuka e X. Ren, “Physical metallurgy of Ti-Ni based shape memory alloys”, *Progress in Materials Science*, vol. 50, pp. 511-678, 2005.
- [4] M.D. Hager, P. Greil, C. Leyens, S. van der Zwaag e U.S. Schubert, “Self- Healing Materials”, *Advanced Materials*, vol. 22, pp. 5424–5430, 2010.
- [5] J.T. Kim, H.J. Kim, S.H. Hong, H.J. Park, Y.S. Kim, Y.J. Hwang, Y.B. Jeong, J.Y. Park, J.M. Park, B. Sarac, W.M. Wang, J. Eckert e K.B. Kim, “Thermally-triggered Dual In-Situ Self-healing Metallic Materials”, *Scientific Reports*, vol. 8, 2120 (10 pp.), 2018.
- [6] A. Gurley, T.R. Lambert, D. Beale e R. Broughton, “Dual measurement self-sensing technique of NiTi actuators for use in robust control”, *Smart Materials Structure* vol. 26, 105050 (10 pp.), 2017.
- [7] J. Uchil, “Shape memory alloys - characterization techniques”, *PRAMANA - Journal of Physics*, vol. 58, pp. 1131-1139, 2002.
- [8] S.J. Furst e S. Seelecke, “Modeling and experimental characterization of the stress, strain, and resistance of shape memory alloy actuator wires with controlled power input”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 23, pp. 1233-1247, 2012.
- [9] V. Novák, P. Sittner, G.N. Dayananda, F.M. Braz-Fernandes e K.K. Mahesh, “Electrical resistance variation of NiTi shape memory alloy wires in thermomechanical tests: Experiments and Simulation”, *Materials Science and Engineering A*, vol. 481-482, pp. 127-133, 2008.
- [10] H.N. Bhargaw, M. Ahmed e P. Sinha, “Thermo-electric behaviour of NiTi shape memory alloy”, *Transformations of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 23, pp. 2329-2335, 2013.

-
- [11] Z. He, K.R. Gall e L.C. Brinson, “Use of Electrical Resistance Testing to Redefine the Transformation Kinetics and Phase Diagram for Shape-Memory Alloys”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 37A, pp. 579-587, 2006.
- [12] V. Antonucci, G. Faiella, M. Giordano, F. Mennella e L. Nicolais, “Electrical resistivity study and characterization during NiTi phase transformations”, *Thermochimica Acta*, vol. 462, pp. 64-69, 2007.
- [13] S.J. Furst, J.H. Crews e S. Seelecke, “Stress, Strain, and Resistance Behavior of Two Opposing SMA Actuator Wires for Resistance-Based Self-Sensing Applications”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 24, pp. 1951-1968, 2013.
- [14] X.D. Wu, Y.Z. Fan, J.S. Wu, “A study on the variations of the electrical resistance for NiTi shape memory alloys wires during the thermo-mechanical loading”, *Materials and Design*, vol. 21, pp. 511-515, 2000.
- [15] N. Ma, G. Song e H-J Lee, “Position control of shape memory alloy actuators with internal electrical resistance feedback using neural networks”, *Smart Materials Structure*, vol 13, pp. 777-783, 2004.
- [16] J.B. Ferguson, B.F. Schultz e P.K. Rohatgi, “Self-Healing Metals and Metal Matrix Composites”, *JOM*, vol. 66, pp. 866-871, 2014.
- [17] J.R. Davis, “Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys”, ASM International, Chapter 1, 1999.
- [18] J.R. Davis, “Alloying: Understanding the Basics”, ASM International, pp. 351-416, 2001.
- [19] M.M.M. Martins (2008), “Estudo do comportamento das ligas de alumínio 6061 e 6082”, Tese de Mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade de Aveiro.
- [20] W.F. Smith, “Princípio de Ciência e Engenharia dos Materiais”, MC Graw-Hill, 3ª Edição, cap. 9, 1998.
- [21] C.M. Branco, “Mecânica dos Materiais”, Fundação Calouste Gulbenkian, 3ª Edição, 1998.
- [22] T. P. A Serra Nunes (2015), “Análise da Influência do Fenómeno do Fecho de Fenda na Propagação de Fendas por Fadiga na Liga de Alumínio AA 7050-T6”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto. Universidade de Coimbra.
-

- [23] L.F.P. Borrego (2001), “Propagação de Fendas de Fadiga a Amplitude de Carga Variável em Ligas de Alumínio AlMgSi”, Tese de Doutoramento na Área de Engenharia Mecânica e na Especialidade de Construções Mecânicas, Universidade de Coimbra.
- [24] Aalco, “Aluminium Alloy- Commercial Alloy – 5083 – ‘O’ – H111 sheet and plate”, Available: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-5083-0-H111-Sheet-and-Plate_149.ashx (acedido em 6 de março de 2018)
- [25] Aalco, “Aluminium Alloy-Commercial Alloy – 6082 – T6 – T651 Plate”, Available: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6082-T6T651-Plate_148.ashx (acedido em 21 de fevereiro de 2018)
- [26] C.M. Branco, J.A.M. Ferreira, J.D.M. Costa e A. Ribeiro, “Projeto de Órgãos de Máquinas”, Fundação Calouste Gulbenkian, 3ª Edição, 2012.

ANEXO A – FICHAS ICDD

→ Fase austenítica do NiTi

18-0899		Wavelength= 1.54184				
NiTi		2 θ	Int	h	k	l
Nickel Titanium		42.839	100	1	1	0
		62.038	40	2	0	0
		78.238	60	2	1	1
		93.433	10	2	2	0
		108.821	30	3	1	0
		126.058	20	2	2	2
		148.395	70	3	2	1
Rad.: CuKa1	λ : 1.54050	Filter: Ni	Beta	d-sp: Debye-S.	114.6	
Cut off:	Int.:	I/leor.:				
Ref: Dwight, Private Communication, (1965)						
Sys.: Cubic	S.G.: Pm3m (221)					
a: 2.998	b:	c:	A:	C:		
α :	β :	γ :	Z: 1	mp:		
Ref: Dwight, Trans. Am. Inst. Min. Eng., 215, 283 (1959)						
Dx: 6.569	Dm:	SS/FOM: F γ = 5(0.104 , 13)				
Suprattice lines were not detected. Cl Cs type. PSC: cP2. Mwt: 106.60. Volume[CD]: 26.95.						



© 2000 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved
PCPDFWIN v. 2.1

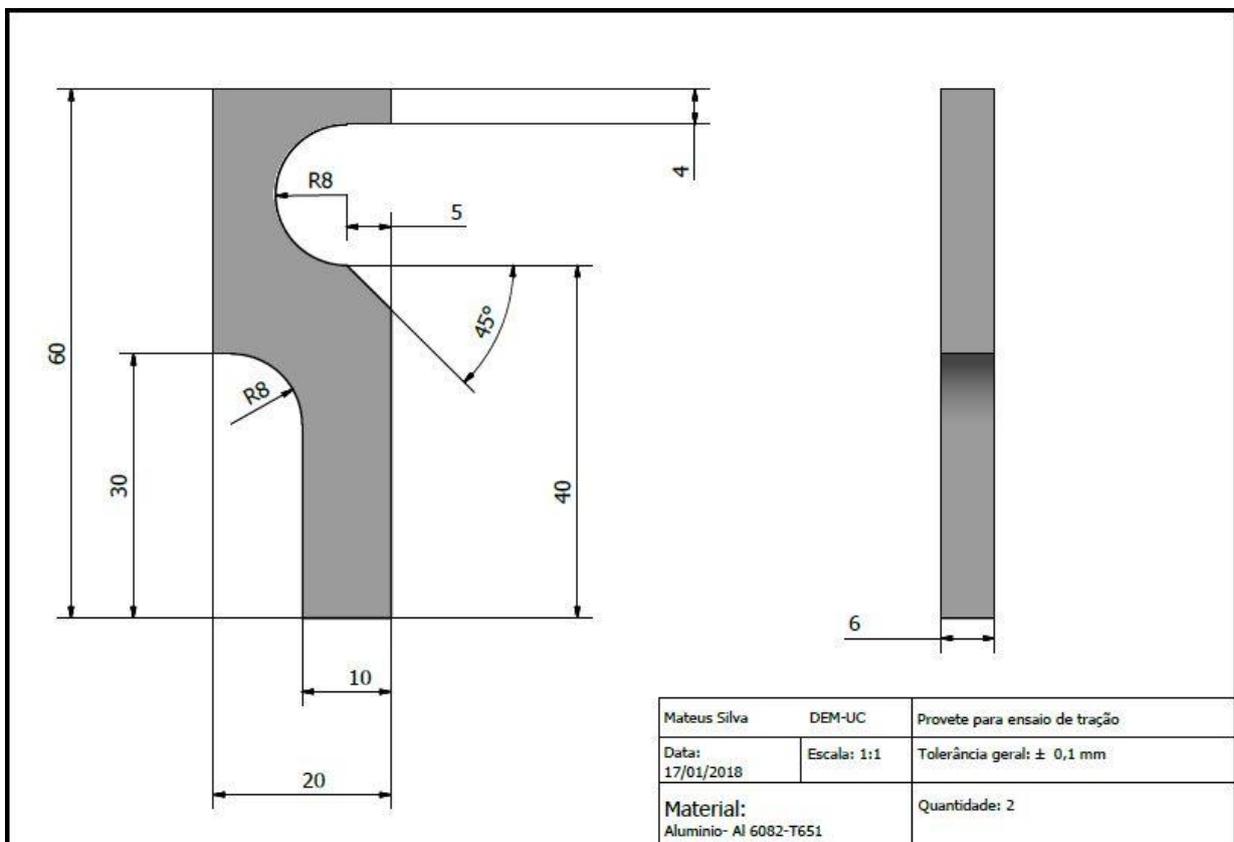
→ Fase martensítica do NiTi

35-1281		Wavelength= 1.54184					i
NiTi		2 θ	Int	h	k	l	
Nickel Titanium		19.338	6	0	1	0	
		29.126	1	0	1	1	
		31.219	<1	1	0	0	
		34.911	13	1	1	0	
		38.267	11	1	0	1	
		38.973	2	1	1	0	
		39.256	54	0	2	0	
		41.400	100	1	1	1	
		43.954	54	0	0	2	
		44.965	94	1	1	1	
		45.225	26	0	2	1	
		47.769	1	1	2	0	
		48.445	<1	0	1	2	
		52.992	8	1	2	1	
		54.072	<1	1	2	0	
		54.878	<1	1	0	2	
		57.335	5	1	1	2	
		58.899	<1	1	2	1	
		60.165	1	1	1	2	
		60.382	26	0	2	2	
		60.513	1	0	3	0	
Rad.: CuKa	λ : 1.54178	Filter:	d-sp: Diff.				
Cut off:	Int.: Diffract.	I/leor.:					
Ref: Michal, G., Sinclair, Acta Crystallogr., Sec. B, 37, 1803 (1981)							
Sys.: Monoclinic	S.G.: P2 ₁ /m (11)						
a: 2.885(4)	b: 4.622(5)	c: 4.120(5)	A: 0.6242	C: 0.8914			
α :	β :	γ : 96.8(1)	Z: 2	mp:			
Ref: Ibid.							
Dx: 6.490	Dm:	SS/FOM: F ₂₁ = 115(.0087 , 21)					
Obtained from alloy of composition 50.0(1) atomic % Ni balance Ti, hot rolled and annealed at 973 K for 41 hours. Ni Ti type. C.D. Cell: a=4.622, b=4.120, c=2.885, β =96.80, a/b=1.1218, c/b=0.7002, S.G.=P2 ₁ /m(11). PSC: mP4. Mwt: 106.60. Volume[CD]: 54.55.							



© 2000 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved
PCPDFWIN v. 2.1

APÊNDICE A – DESENHO 2D COTADO DAS PEÇAS DO PROVETE PARA ENSAIO DE TRAÇÃO



APÊNDICE B – RELAÇÃO DA TENSÃO LIMITE DE ELASTICIDADE DA LIGA DE ALUMÍNIO COM A TENSÃO DE INÍCIO DA TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

É necessário garantir que a tensão no fio é suficiente para induzir a transformação martensítica ($\sigma > \sigma^{Ms}$), antes de atingir a tensão limite de elasticidade da liga de alumínio ($\sigma_{y,Al}$).

Para tal, considera-se que o fio está sujeito a uma força de atrito F_p à medida que a fenda se aproxima e calcula-se a relação de tensões necessária para o objetivo desejado utilizando as relações apresentadas considerando a geometria do provete e um diâmetro do fio $d = 0,70$ mm o fio, e admitindo um coeficiente de atrito de 0,2 e um comprimento de interação fio/furo de $6d$ (aproximadamente metade da espessura do provete na zona onde é introduzido o fio).

$$F_p = A_{lateral\ cilindro} * \sigma_{y,Al} * 0,2 \quad (B1)$$

$$A_{lateral\ cilindro} = \pi d * 6d = 6\pi d^2 \quad (B2)$$

Resulta:

$$F_p = 6\pi d^2 * \sigma_{y,Al} * 0,2 = 1,2\pi d^2 * \sigma_{y,Al} \quad (B3)$$

A força resistente do fio será:

$$F_R = \sigma_{NiTi} * \frac{\pi d^2}{4} \quad (B4)$$

Então:

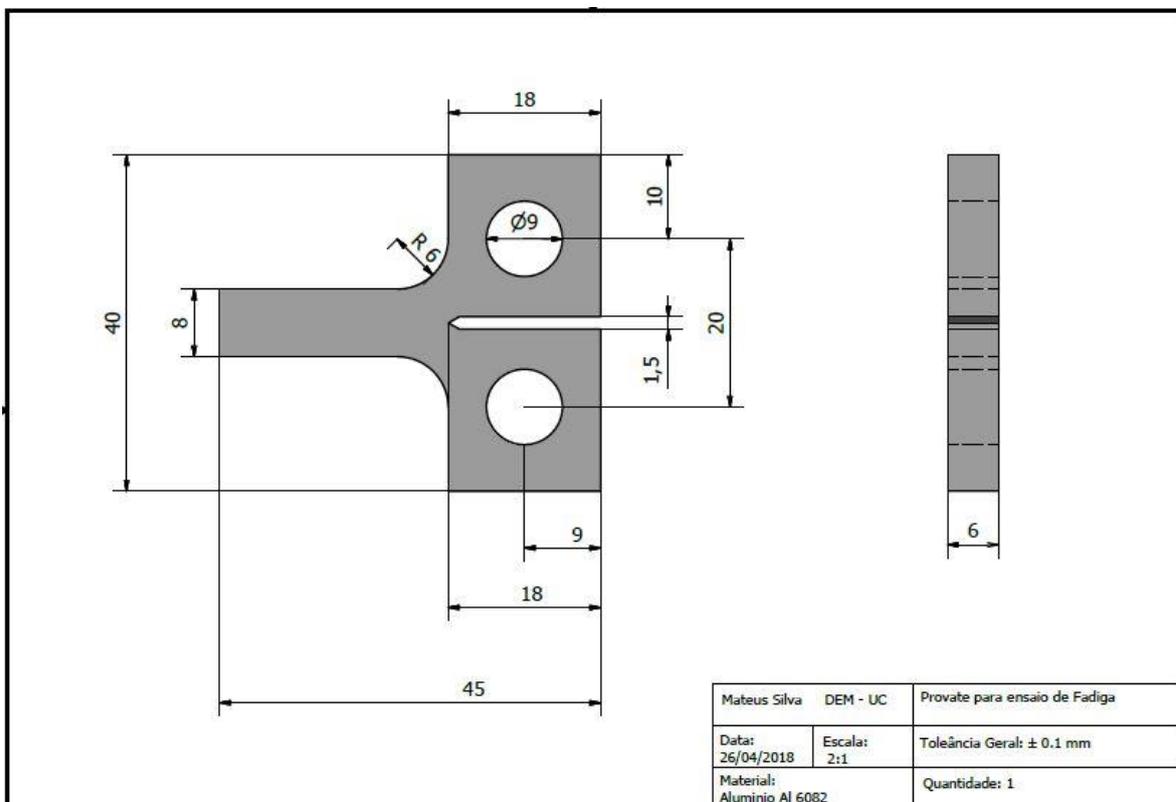
$$\frac{F_p}{F_R} = \frac{1,2\pi d^2 * \sigma_{y,Al}}{\frac{\pi d^2}{4} * \sigma_{NiTi}} = 4,8 \frac{\sigma_{y,Al}}{\sigma_{NiTi}} \quad (B5)$$

Há transformação induzida por tensão se $\sigma_{NiTi} > \sigma_{Ms}$ ou seja:

$$4,8 \sigma_{y,Al} > \sigma_{Ms} \Leftrightarrow \sigma_{y,Al} > \frac{\sigma_{Ms}}{4,8} \quad (B6)$$

Para a liga Al 6082 – T651 esta condição é cumprida, pois a tensão limite de elasticidade é 255 MPa e para os fios em estudo a tensão de início da transformação martensítica é da ordem de 500-600 MPa.

APÊNDICE C – DESENHO 2D COTADO DO PROVETE PARA ENSAIO DE FADIGA



APÊNDICE D – CÁLCULO DA VARIAÇÃO DE DIMENSÕES DO FURO E DO FIO, POR EFEITO DE TEMPERATURA

Admitindo:

- Fio: $d = 0,702 \text{ mm}$
- Furo: $D = 0,68 \text{ mm}$

Apesar da broca utilizada ser de $0,65 \text{ mm}$ o diâmetro dos furos medido por microscopia ótica é cerca de $0,68 \text{ mm}$.

A variação de diâmetros é de:

$$d - D = 0,702 - 0,68 = 0,022 \text{ mm} = 22 \mu\text{m}$$

Os valores do coeficiente de dilatação dos materiais são:

- Liga de alumínio: $\alpha = 24 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- Nitinol: $\alpha_A = 11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Assim, recorrendo à equação D1, através das variações de temperatura aplicadas a cada material é possível o cálculo da variação de diâmetros que irá ocorrer:

$$\Delta T = \frac{\Delta R}{Ri * \alpha} \tag{D1}$$

Liga de alumínio: $\Delta T \approx 300 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow \Delta R \approx 2,5 \mu\text{m} \Rightarrow \Delta D \approx 5 \mu\text{m}$

NiTi: $\Delta T \approx -218 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow \Delta R \approx 0,8 \mu\text{m} \Rightarrow \Delta D \approx 1,6 \mu\text{m}$

Variação de diâmetros: $6,6 \mu\text{m} < 22 \mu\text{m}$.

Conclui-se assim que as variações de temperatura aplicadas não são suficientes para obter as variações de diâmetros pretendidas.

APÊNDICE E – CÁLCULO DA PRESSÃO DE APERTO COM AS VARIAÇÕES DE DIÂMETRO DESEJADAS

Considerando:

$$\text{Fio: } d = 0,7 \left[\begin{array}{c} +0,002 \\ -0 \end{array} \right] \text{ mm}$$

$$\text{Furo: } D = 0,7 \left[\begin{array}{c} -0,015 \\ -0,02 \end{array} \right] \text{ mm}$$

Interferência de montagem:

$$\delta = ds - Di = 0,002 - (-0,02) = 0,022 \text{ mm} \quad (\text{E1})$$

Para o cálculo da pressão de aperto (p_a) na presença de dois materiais diferentes recorre-se à equação E2 [26]:

$$p_a = \frac{\delta}{2 * r_a * \left[\left(\frac{1}{E_{Al}} * \left(\frac{r_e^2 + r_a^2}{r_e^2 - r_a^2} \right) + \nu_{al} \right) + \left(\frac{1}{E_{NiTi}} * (1 - \nu_{NiTi}) \right) \right]} \quad (\text{E2})$$

Considerando:

- Módulo de elasticidade da liga AA 6082: $E_{Al} = 70 \text{ GPa}$
- Módulo de elasticidade do nitinol (fase austenítica): $E_{NiTi} = 75 \text{ GPa}$
- $r_a = 0,35 \text{ mm}$ (raio do fio)
- $r_e = 3 \text{ mm}$ (raio exterior da “manga” - considerando que se trata de um aperto “manga-veio”)
- Coeficiente de poisson do alumínio e do NiTi: $\nu_{Al} = 0,33$ e $\nu_{NiTi} \approx 0,3$

Por substituição destes valores na equação E2 o valor da pressão de aperto é de 1125 MPa, sendo muito superior ao valor da tensão limite de elasticidade da liga de alumínio

da série 6000, por isso o valor da pressão de aperto toma o valor da tensão limite de elasticidade que é 255 MPa.

Conclui-se, portanto, que, com as variações de diâmetro previstas, seria possível obter um aperto suficiente para os objetivos que se querem alcançar.

APÊNDICE F – CÁLCULO DA FORÇA DE RESISTÊNCIA AO CORTE DA JUNTA COLADA

Os valores encontrados de tensão de corte da cola (τ) variam entre 10,3 e 20,7 MPa (1500 a 3000 psi).

Através do cálculo da área de colagem e com o valor da tensão de corte da cola é possível calcular o valor da força de resistência ao corte da junta colada. A área de colagem é a área lateral de um cilindro correspondente ao furo feito com broca de 0,7 mm num material com 4 mm de espessura (t):

$$A = \pi d * t = \pi * 0,7 * 4 = 8,8 \text{ mm}^2 \quad (\text{F1})$$

A força de resistência ao corte da junta colada calcula-se pela seguinte equação:

$$F = \tau * A \quad (\text{F2})$$

$$F = 10,3 * 8,8 \approx 91 \text{ N}$$

$$F = 20,7 * 8,8 \approx 182 \text{ N}$$

A força de resistência ao corte da junta colada varia entre 91 e 182 N.