



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# Modelação Numérica de Tensões Residuais de Origem Térmica

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

**Autor**

**Tiago J. B. Martins Gomes Freire**

**Orientadores**

**Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes**

**Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho**

**Júri**

**Presidente**

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

**Vogais**

**Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa**  
**Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**

**Colaboração Institucional**

---



**Coimbra, Setembro, 2011**

Em memória do meu avô, Joaquim Duarte Martins.

## Agradecimentos

O presente trabalho só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas às quais gostaria de prestar o meu reconhecimento, nomeadamente:

- ✓ Ao meu orientador responsável, Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes, pela sua permanente disponibilidade, acessibilidade, dedicação, apoio, compreensão e, sobretudo, aos conhecimentos e aconselhamentos que me transmitiu, bem como à amizade que me proporcionou;
- ✓ Ao meu orientador da parte experimental, Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho, pelo rigor científico pelo qual se pauta, pela dedicação, apoio, ensinamentos e disponibilidade;
- ✓ Ao Professor Doutor João Paulo Nobre pela disponibilidade prestada na concretização de resultados, ensinamentos e rigor científico;
- ✓ Ao Professor Ricardo Branco pelo apoio ao nível do *software* específico, sem o qual a presente tese ficaria deficitária em termos de quantificação da vida de componentes à fadiga;
- ✓ Aos meus Pais, Avós e Irmão pelas oportunidades que me concederam, por terem acreditado em mim, pelo apoio, dedicação, esforço, sacrifício e, sobretudo, pelo amor e educação com que sempre me brindaram;
- ✓ À Francisca, pelo incansável e duplo apoio, tanto a nível pessoal como académico, sem nunca me deixar desistir;
- ✓ Aos meus amigos e colegas, especialmente ao André Amaral e ao Filipe Tomás pelo apoio, disponibilidade, pelos bons e maus momentos que nos proporcionámos, pela grande amizade e camaradagem que construímos;
- ✓ À Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e ao FEDER (Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional) pelo apoio financeiro (Projecto PTDC/EME-PME/114892/2009; COMPETE: FCOMP-01-0124-FEDER-015171).



---

## Resumo

Esta Tese de Mestrado tem como principais objectivos prever as tensões residuais de origem térmica e relacionar este tipo de tensões com a vida à fadiga das peças onde estas estejam presentes. Como tal, procedeu-se a um ensaio experimental onde duas peças (uma de alumínio e outra de aço), concêntricamente dispostas, com uma diferença de diâmetros mínima, foram aquecidas desde a temperatura ambiente até 450°C. Esta temperatura apenas faz variar as propriedades mecânicas e térmicas não se esperando, no entanto, alteração de fase em qualquer uma das peças. Durante o ciclo térmico, a dilatação da amostra de alumínio foi estrangida pelo aço, no qual este está concêntrico. Este estrangimento é devido, como será analisado mais adiante, ao inferior valor do coeficiente de dilatação térmica do aço, relativamente ao alumínio. Finalizado o ciclo térmico, procedeu-se à medição das tensões residuais provocadas no alumínio pelo aquecimento e pelo estrangimento do aço. Para a medição das tensões residuais recorreu-se à técnica do furo incremental que, apesar de ser uma técnica em parte destrutiva, é das mais utilizadas para o efeito.

Paralelamente a este processo experimental foi também desenvolvido um modelo numérico, recorrendo ao *software* Marc-Mentat 2010, desenvolvido pela MSC Software, ferramenta que recorre ao método dos elementos finitos. Este processo passou por várias fases: o desenho da geometria e malha das peças usadas no ensaio experimental, estabelecimento das condições iniciais e condições de fronteira, assim como das propriedades mecânicas e térmicas dos materiais em questão. Posteriormente, por processo iterativo, obtiveram-se as tensões residuais resultantes da simulação numérica.

Concluídos os processos numérico e experimental procedeu-se a uma análise da sensibilidade relativa às propriedades térmicas e mecânicas das peças. Afinados ambos os processos, de forma coerente, foi feita a comparação dos resultados. Por fim, quantificadas as tensões residuais de origem térmica, estudou-se a influência que estas têm na vida das peças à fadiga. Este estudo foi efectuado com o auxílio do programa de simulação Cosmos 2.0 e a algoritmo previamente desenvolvido pelo Prof. Ricardo Branco.

**Palavras-chave:** Tensões residuais, vida à fadiga, propriedades mecânicas, propriedades térmicas, ciclo térmico, furo incremental, método de elementos finitos.

## Abstract

This work has as main objectives to foresee the residual stresses of thermal origin, as well as to connect these types of stresses to fatigue lives of the parts where these are present. As such, an experimental test went along, in which two parts (an aluminum one and a steel one) were concentrically placed, with a minimum difference of diameters, and both were warmed up starting at the environmental temperature till 450°C. This temperature only varies the thermal and mechanical features, and is not expected to produce phase changes. It should also be noticed that, during the thermal cycle, the dilatation of the sample of aluminum was constrained by the steel, in which this is concentric. This constraint is due, as referred ahead, to the inferior dilatation of the steel, compared to the aluminum. Once the thermal cycle was finished, the residual tensions were measured using the hole incremental technique. This is in a certain way a destructive technique, but it is widely used to this effect.

At the same time of this experimental process it was also developed a numeric model, using the *software* Marc-Mentat 2010, developed by MSC Software, a tool that uses the method of finite elements. This process went through several phases, namely the geometry design and meshing of the tools used along the experiment, the establishment of initial and boundary conditions, as well as the mechanical and thermal features of the materials referred. Afterwards, by an iterative process, the residual tensions were obtained, as a result of the numeric simulation. Completed the numeric and experimental processes, an analysis of the sensibility concerning the thermal and mechanical features went through. Tuned both processes, in a consistent way, the comparison of both results was made.

Lastly, after being quantified the residual tensions of thermal origin, the influence that they have in the life of the parts facing hardship was studied. This study was made with the help of the simulation program Cosmos 2.0 and the algorithm previously developed by Prof. Ricardo Branco.

**Keywords** Residual stresses, life facing hardship, mechanical features, thermal features, thermal cycle, incremental hole, finite method element.

## Índice

Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas .....	ix
Simbologia e Siglas .....	x
Simbologia.....	x
Siglas .....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objectivos .....	2
1.2. Estrutura da Tese .....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1. Tensões Residuais.....	5
2.2. Tensões residuais de origem térmica .....	8
2.3. Medição Experimental de Tensões Residuais .....	10
2.4. Variação das propriedades termo-mecânicas com a temperatura.....	12
2.5. Efeito na vida à fadiga .....	15
3. ANÁLISE EXPERIMENTAL .....	17
3.1. Procedimento experimental .....	17
3.2. Resultados experimentais .....	21
4. ANÁLISE NUMÉRICA.....	27
4.1. Modelo numérico.....	27
4.2. Resultados numéricos .....	30
4.3. Previsões numéricas vs Resultados experimentais .....	37
4.4. Discussão de Resultados .....	39
5. CONCLUSÕES.....	45

---

6.	BIBLIOGRAFIA .....	47
7.	Anexo 1 -efeito da variação das propriedades do aço com a temperatura .....	48
8.	Anexo 2 - efeito da variação das propriedades do alumínio com a temperatura.....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Tensões residuais de origem mecânica a); tensões residuais de origem térmica b) e c). .....	1
Figura 2 - Junta Soldada. Microestrutura típica da Zona de Fusão a) e da Zona Termicamente Afectada b) .....	2
Figura 3 - Origem das tensões residuais. Interdependência entre os diferentes estados do material. ....	6
Figura 4 - Tipos de Tensões Residuais (1ª, 2ª e 3ª ordem).....	7
Figura 5 - Estrutura fixa por meio de parafusos .....	7
Figura 6 - Barras de aço e respectivas bases e barra 2, sujeita a ciclo térmico. ....	8
Figura 7 - Comportamento das tensões que actuam na barra central em função da temperatura durante o ciclo térmico. ....	9
Figura 8 - Detalhes do equipamento de furação ( <i>Vishay-Measurements Group, 2007</i> ). ....	11
Figura 9 - Relação entre as dimensões do extensómetro e as dimensões do furo ( <i>Martins et al, 2004</i> ). .....	11
Figura 10 - Variação do módulo de Young com a temperatura para os aços AISI1524, AISI1010 e para um aço macio. ....	13
Figura 11 - Variação do módulo de Young com a temperatura para as ligas de alumínio AA5754 e AA6111. ....	13
Figura 12 - Variação do coeficiente de dilatação térmica com a temperatura. ....	14
Figura 13 - Variação da tensão de cedência com a temperatura. ....	14
Figura 14 - Simulação da propagação automática da fenda. ....	16
Figura 15 - Evolução da forma da fenda com e sem tensões residuais (Carpinteri, 2010). ....	16
Figura 16 - Forno refractário, <i>Severn Furnaces Limited</i> . ....	17
Figura 17 - Ciclo térmico ao qual ambas as peças foram sujeitas. ....	18
Figura 18 - Provete de alumínio a); cavilhão de aço b); alumínio e aço dispostos concêntricamente c); forno refractário aquecido em três pontos d); variador de temperatura e). ....	19



Figura 19 - Extensómetro tipo roseta utilizado no ensaio experimental, <i>Vishay Micro-Measurement</i> a); Disposição dos extensómetros no provete de alumínio b); Mecanismo para realização da furação c); Fresas de furação d); Alinhamento da fresa com o centro do extensómetro e); Processo de furação do provete de alumínio f).....	20
Figura 20 Gráfico representativo da componente da tensão $\sigma_z$ medida pelo extensómetro 1 e pelo extensómetro 3. ....	24
Figura 21 - Gráfico representativo da componente da tensão $\sigma_\theta$ medida pelo extensómetro 1 e pelo extensómetro 3. ....	24
Figura 22 - Gráfico representativo da componente da tensão $\tau_{xy}$ medida pelo extensómetro 1 e pelo extensómetro 3. ....	25
Figura 23 - Gráfico representativo das tensões residuais $\sigma_z$ , $\sigma_\theta$ e $\tau_{xy}$ provocadas pelo ciclo-térmico. ....	25
Figura 24 - Modelo axissimétrico.....	27
Figura 25 - Carregamento térmico.....	28
Figura 26 - Malha de elementos finitos. ....	28
Figura 27 - Curvas tensão-deformação.....	29
Figura 28 - Tensões residuais na direcção longitudinal a), radial b) e circunferencial c). ..	30
Figura 29 - Componentes da tensão residual considerando as propriedades termo-mecânicas à temperatura ambiente. ....	31
Figura 30 - Componente $\sigma_z$ das tensões residuais fazendo variar as propriedades do aço com a temperatura. ....	32
Figura 31 - Componente $\sigma_r$ das tensões residuais fazendo variar as propriedades do aço com a temperatura. ....	33
Figura 32 - Componente $\sigma_\theta$ das tensões residuais fazendo variar as propriedades do aço com a temperatura. ....	33
Figura 33 - Componente $\sigma_z$ das tensões residuais fazendo variar as propriedades do alumínio com a temperatura. ....	35
Figura 34 - Componente $\sigma_r$ das tensões residuais fazendo variar as propriedades do alumínio com a temperatura. ....	35
Figura 35 - Componente $\sigma_\theta$ das tensões residuais fazendo variar as propriedades do alumínio com a temperatura. ....	36

---

Figura 36 - Efeito de considerar um furo no disco de alumínio. Deformação plástica residual a); diferença entre a peça em aço e a peça em alumínio após arrefecimento (gap) b).....	37
Figura 37 - Gráfico representativo das tensões residuais $\sigma_z$ , $\sigma_\theta$ e $\tau_{xy}$ resultantes do ensaio experimental, induzidas pelo ciclo-térmico.....	38
Figura 38 Gráfico representativo das tensões residuais $\sigma_z$ , $\sigma_r$ e $\sigma_\theta$ resultantes do ensaio numérico em função da profundidade. ....	38
Figura 39 Gráfico representativo das tensões residuais $\sigma_z$ , $\sigma_r$ resultantes do ensaio numérico em função do comprimento. ....	39
Figura 40 – Tensões de contacto na interface aço-alumínio. ....	41
Figura 41 – Alumínio estrangido lateralmente. ....	41
Figura 42 – Tensões residuais na extremidade direita do provete de alumínio.....	42
Figura 43 – Dilatação do alumínio nas direcções x e y. ....	42

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes das tensões residuais medidas pelo extensómetro 1.....	22
Tabela 2 - Componentes das tensões residuais medidas pelo extensómetro 2.....	22
Tabela 3 - Componentes das tensões residuais medidas pelo extensómetro 3.....	22
Tabela 4 - Diferença de valores medidos pelo extensómetro 1 e o extensómetro 3.....	26
Tabela 5 Aço base.....	48
Tabela 6 Variação da tensão residual com o coeficiente de dilatação térmica.....	49
Tabela 7 Variação da tensão residual com o coeficiente de Poisson.....	50
Tabela 8 Variação da tensão residual com o módulo de Young. ....	51
Tabela 9 Variação da tensão residual considerando o efeito das propriedades termo- mecânicas.....	52
Tabela 10 Alumínio base.....	53
Tabela 11 Variação da tensão residual com o coeficiente de dilatação térmica.....	54
Tabela 12 Variação da tensão residual com a curva tensão-deformação .....	55
Tabela 13 Variação da tensão residual considerando o efeito das propriedades termo- mecânicas a variar com a temperatura.....	56

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\sigma_z$  – componente longitudinal da tensão normal

$\sigma_r$  – componente radial da tensão normal

$\sigma_\theta$  – componente circunferencial da tensão normal

$\tau_{xy}$  – tensão de corte no plano xOy

$\Delta T$  – variação da temperatura

$\Delta l$  – variação do comprimento

$l$  – comprimento

$l_0$  – comprimento inicial

$A$  – área

$E$  – módulo de Young

$\nu$  – coeficiente de Poisson

$\epsilon$  – deformação

### Siglas

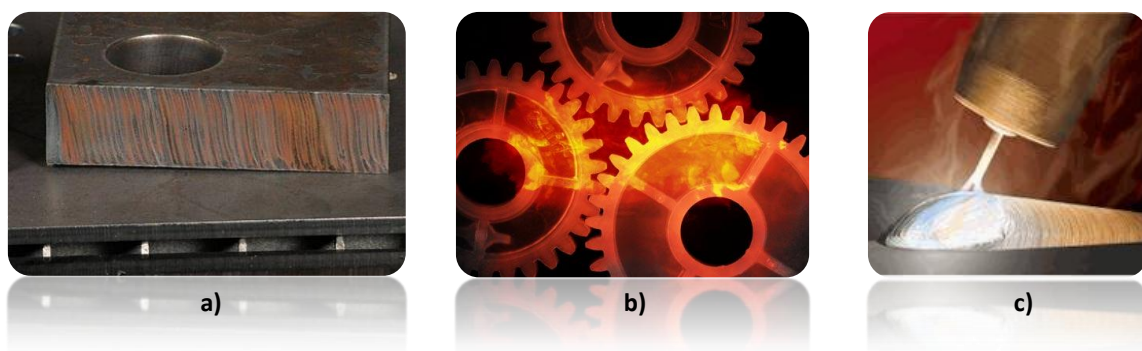
A.S.T.M. – American Society for Testing and Materials

D.E.M. – Departamento de Engenharia Mecânica

## 1. INTRODUÇÃO

Nos dias que correm, devido ao crescente rigor exigido na fase de projecto, com o objectivo de obter uma qualidade e longevidade superiores de qualquer componente, é de interesse fulcral poder prever as falhas dos componentes, estudando para isso as causas que lhes dão origem. As tensões residuais afectam a vida dos componentes, pelo que é necessário estudá-las em pormenor de modo a prever o seu efeito, nomeadamente na vida à fadiga. Tensões residuais de compressão têm um efeito protector relativamente ao dano por fadiga, uma vez que tendem a fechar as fendas. Pelo contrário, as tensões de tracção promovem a propagação das fendas. O tratamento de grenalhagem, por exemplo, é feito para introduzir tensões residuais de compressão e assim aumentar a resistência à fadiga.

Existem vários tipos de tensões residuais, sendo denominadas em função do que as origina. Assim, existem tensões residuais de origem mecânica (Figura 1a) e de origem térmica (Figura 1b e 1c). As segundas podem formar-se devido a processos de fundição, soldadura, ou tratamentos térmicos a que as peças são sujeitas. Podem ainda classificar-se pela ocorrência ou não de mudança de fase, dependendo da temperatura a que os materiais são expostos. Por seu lado, as tensões residuais de origem mecânica são formadas devido a processos de maquinagem, tais como fresagem, torneamento, rectificação, electro-erosão ou corte, grenalhagem, laminagem ou trefilagem.



**Figura 1** - Tensões residuais de origem mecânica **a)**; tensões residuais de origem térmica **b)** e **c)**.

As juntas soldadas são particularmente afectadas por tensões residuais de origem térmica (Figura 2). Uma previsão fiável de vida à fadiga das juntas soldadas

implica a inclusão das tensões residuais. Porém, o desenvolvimento de modelos de previsão de tensões residuais é dificultado pelas complexidades envolvidas, nomeadamente as transformações de fase sólida, as alterações de volume, a variação de propriedades mecânicas e térmicas com a temperatura e a heterogeneidade do material. Assim, no sentido de isolar fenómenos e partir do simples para o complexo, optou-se por uma abordagem mais simples, em que se pretende somente estudar a deformação plástica produzida por dilatação térmica.

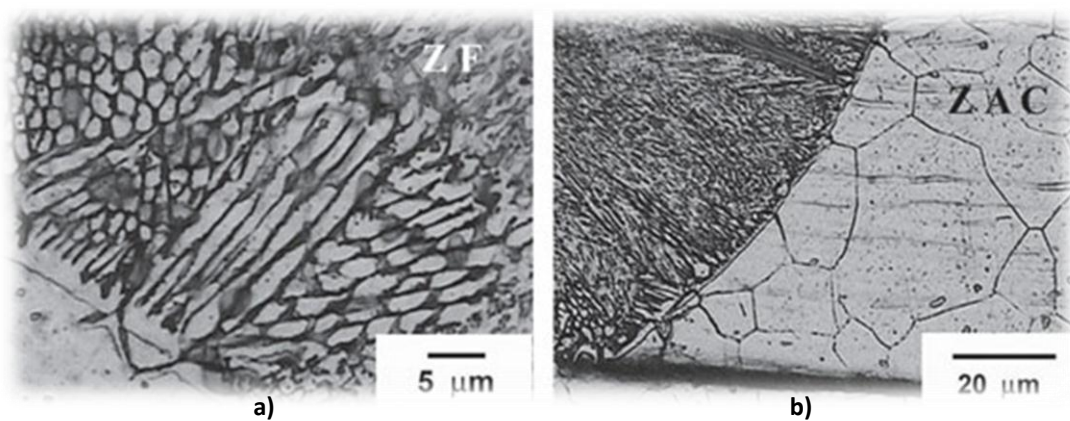


Figura 2 - Junta Soldada. Microestrutura típica da Zona de Fusão a) e da Zona Termicamente Afectada b)

### 1.1. Objectivos

O presente estudo diz pois respeito à formação de tensões residuais de origem térmica, sem ocorrência de mudança de fase nos materiais utilizados na experiência, aquando do ciclo térmico. O principal objectivo é desenvolver um modelo numérico que permita prever as tensões residuais numa amostra de alumínio, previamente maquinada, após ser solicitada termicamente. Por seu lado, os restantes objectivos passaram por:

- Realizar pesquisa bibliográfica;
- Adquirir os materiais necessários, tentando aliar as características pretendidas a um preço razoável;
- Recolher as propriedades mecânicas que variam com a temperatura;
- Montar todo o procedimento experimental para gerar, intencionalmente, tensões residuais, tendo o cuidado de as medições, antes e depois do ciclo térmico, serem o mais precisas possível;

- Medir as tensões residuais geradas experimentalmente, recorrendo ao método do furo incremental;
- Desenvolver o modelo numérico, para determinação das tensões residuais, e realizar o estudo da sensibilidade relativamente às principais propriedades térmicas e mecânicas;
- Afinar ambos os processos de modo a que estes estejam o mais coerentes possível;
- Validar o modelo numérico;
- Prever a vida à fadiga das peças, recorrendo a *software* de simulação numérica (Cosmos 2.0), tendo como base os valores das tensões residuais determinados anteriormente.

Para os ensaios foi utilizado um cavilhão de um pistão do motor de um camião, dado que o tipo de aço que o constitui mantém as propriedades térmicas e mecânicas praticamente inalteradas para a temperatura máxima pretendida no ciclo térmico, 450°C. Foi também usado um provete de alumínio dúctil, maquinado de modo a ficar concêntrico com o cavilhão e o mais “justo” possível a este. O facto de ser um alumínio dúctil faz com que a dilatação (constrangida pela praticamente nula dilatação do cavilhão) provoque deformação plástica que resulta na formação de tensões residuais.

Na gama de temperaturas em estudo espera-se que o alumínio sofra deformação plástica, isto é, que a sua tensão limite de elasticidade seja ultrapassada. A temperatura máxima foi limitada de modo a evitar a ocorrência de mudanças na fase sólida. No procedimento experimental, foram registados, antes e depois do ciclo térmico, os diâmetros do provete de alumínio e medidas as consequentes tensões residuais pelo método do furo incremental. Foi escolhido este método dado que é um dos processos mais usados neste tipo de medições, apesar de ser semi-destrutivo. Paralelamente desenvolveu-se um modelo numérico, replicando o procedimento experimental, de previsão das tensões residuais. As tensões previstas numericamente foram comparadas com os resultados experimentais. De referir ainda que o modelo numérico foi também utilizado para uma análise de sensibilidade, fazendo variar as principais propriedades térmicas e mecânicas envolvidas, com o objectivo de prever o seu efeito nas tensões residuais. Foi ainda utilizado um modelo de previsão da vida à fadiga em veios, para perceber a importância das tensões residuais na vida à fadiga.

## 1.2. Estrutura da Tese

A tese está dividida nos seguintes capítulos:

- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Este capítulo é relativo a pesquisas bibliográficas efectuadas no âmbito das tensões residuais, bem como às principais leis pelas quais este estudo se rege, assim como uma breve introdução no que diz respeito à influência das tensões residuais na vida das peças à fadiga;

- Capítulo 3 - Análise Experimental

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados na parte experimental e também as suas propriedades. É feita também uma breve descrição dos equipamentos utilizados e respectivas funções. É neste capítulo que se apresentam todos os resultados obtidos provenientes dos ensaios efectuados. São apresentados valores de diâmetro dos provetes, antes e depois do ciclo térmico, bem como as tensões residuais medidas nestes, recorrendo ao método do furo incremental.

- Capítulo 4 - Análise Numérica

Neste capítulo é apresentado o modelo numérico desenvolvido e também os passos percorridos para o seu desenvolvimento. O modelo numérico, desenvolvido no programa de simulação numérica Marc-Mentat 2010, permite prever as tensões residuais no provete de alumínio e, para além disso, é utilizado para fazer uma análise de sensibilidade relativamente aos parâmetros térmicos.

- Capítulo 5 - Conclusões

Por fim, são apresentadas as conclusões relativas aos resultados numéricos e experimentais, bem como algumas sugestões de melhoria deste trabalho e propostas de trabalhos futuros.



---

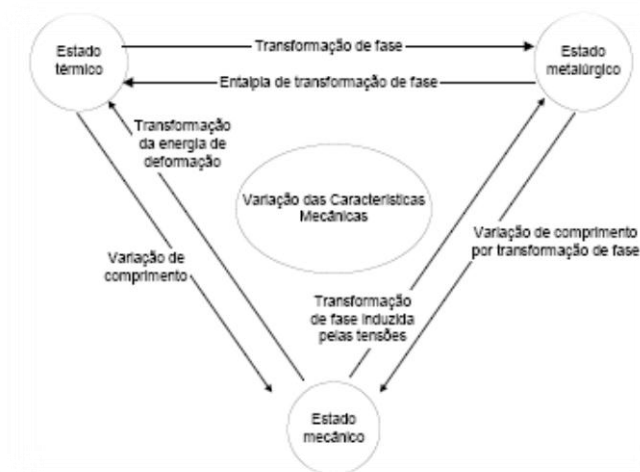
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Tensões Residuais

Um dado componente pode estar sujeito a dois tipos de tensões: tensões aplicadas e tensões residuais. A tensão aplicada é gerada por forças externas aplicadas no corpo. As tensões residuais são aquelas que se mantêm, mesmo depois de todas as forças ou momentos terem sido retirados. São tensões multiaxiais estáticas que existem num componente, quando este se encontra em equilíbrio mecânico e resultam da heterogeneidade das deformações introduzidas a qualquer escala (macroscópica, microscópica e sub-microscópica) do componente ou da estrutura. Traduzem a história mecânica e metalúrgica do componente, ao longo da sua elaboração, dos tratamentos superficiais que sofreu e das solicitações em serviço. A génese das tensões residuais está relacionada com a deformação plástica não homogénea, de origem mecânica, térmica ou estrutural, ocorrida durante:

- o fabrico de componentes, como consequência das operações de maquinagem e dos acabamentos finais a que a peça é submetida;
- operações de manufactura, nomeadamente os processos de fundição, laminação, estampagem, maquinagem, tratamentos térmicos e termo-químicos, soldadura, trefilagem e dobramento;
- tratamentos superficiais voluntários de pré-tensão, como por exemplo: cementação, nitruração, grenalhagem de pré-tensão, têmpera superficial entre outros;
- solicitações a que cada componente é submetido durante os períodos de rodagem e de serviço. (De facto, em alguns casos, as tensões residuais são introduzidas durante a vida do material, devido a procedimentos de instalação, montagem, eventuais sobrecargas, ou ainda, por reparações e modificações em serviço).

Estas deformações podem ser criadas por efeitos térmicos, metalúrgicos ou mecânicos (Figura 3), que são em geral interdependentes e actuam de forma combinada. Deste modo, a previsão das tensões residuais é extremamente complexa.



**Figura 3** - Origem das tensões residuais. Interdependência entre os diferentes estados do material.

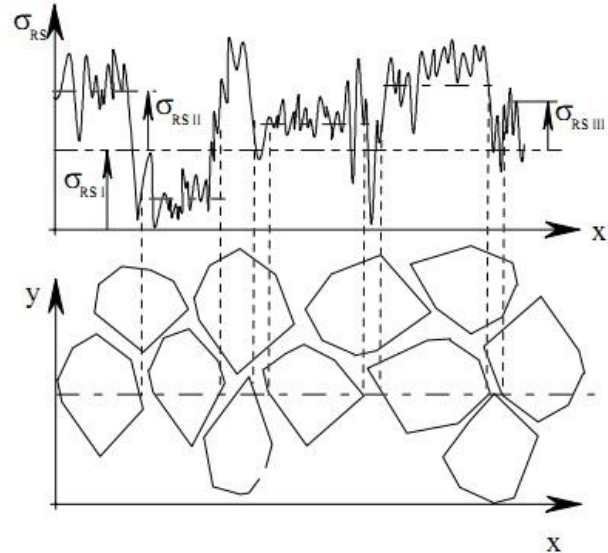
Devido à forma policristalina e heterogénea dos materiais metálicos, a origem das tensões residuais pode resultar de deformações à escala macroscópica, microscópica ou sub-microscópica. Existem pois três tipos de tensões residuais, sendo que estas se classificam em primeira, segunda e terceira ordem. As de **primeira ordem** são tensões residuais aproximadamente homogéneas ao longo de áreas relativamente extensas (a uma escala pluri-granular), estando em equilíbrio quando estendidas à globalidade do material. Caso haja uma perturbação no equilíbrio, em termos de forças e momentos, num dado volume de amostra, na qual predominam tensões deste tipo, a sua dimensão será alterada. Exemplos onde este tipo de tensões se forma são, por exemplo, barras cujo limite elástico é ultrapassado, a existência de gradientes térmicos, processos de têmpera em aços, entre outros.

No que às **tensões residuais de segunda ordem** diz respeito, estas são também aproximadamente homogéneas, tal como as de primeira ordem, com a diferença de o serem apenas ao longo de um grão, ou parte deste. Este tipo de tensões está em equilíbrio para uma zona do material, abrangendo vários grãos. Variações macroscópicas ao nível de dimensão, num dado volume, contendo tensões residuais de segunda ordem, são apenas detectáveis caso ocorram várias interferências elementares ao nível de forças e momentos, em diferentes regiões do material. Estas desenvolvem-se essencialmente durante a deformação de um material policristalino no regime elasto-plástico e com os grãos orientados aleatoriamente.

As **tensões residuais de terceira ordem** são, ao contrário das anteriores, heterogéneas, numa escala interatómica. Verifica-se equilíbrio de forças e momentos

apenas em secções muito reduzidas de um só grão. Caso haja perturbações no equilíbrio deste tipo de tensões, não se verificarão alterações de dimensão a nível macroscópico. Este tipo de tensões desenvolve-se em materiais metálicos quando sujeitos a processos que produzam falhas na rede cristalina, tais como vazios e impurezas.

Grosso modo, diz-se que os três tipos de tensões residuais (Figura 4) enunciados acima podem agrupar-se em macro e microtensões, sendo a abrangência o critério principal de classificação. As macrotensões são as tensões residuais de primeira ordem. De salientar que estas são, habitualmente, o objecto de estudo do ponto de vista da engenharia. Por outro lado, as



**Figura 4** - Tipos de Tensões Residuais (1ª, 2ª e 3ª ordem)

microtensões englobam as tensões residuais de segunda e terceira ordem

sendo, portanto, uma combinação de ambas. A título de exemplo, um caso de tensões residuais é o de duas estruturas fixas uma à outra por meio de parafusos (Figura 5). Após o aperto dos parafusos, as estruturas ficam igualmente sujeitas a tensões, que não dependem de solicitações externas, daí poderem ser, igualmente, consideradas tensões residuais. Em muitos casos são as tensões residuais a principal causa de falha de equipamentos dado que permanecem imperceptíveis desde o processo de fabrico até à falha. No entanto, em certas circunstâncias, podem também ser benéficas.



**Figura 5** - Estrutura fixa por meio de parafusos

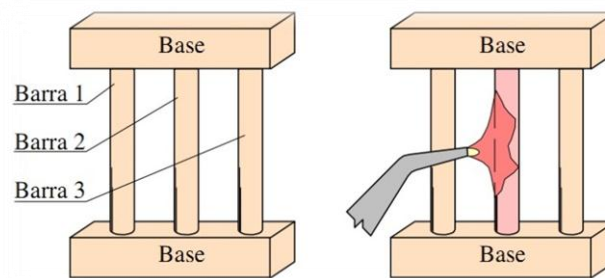
## 2.2. Tensões residuais de origem térmica

Com o intuito de melhor dar a entender o que são, na verdade, as tensões residuais, considere-se o seguinte exemplo relativo a tensões residuais de origem térmica, com ocorrência de deformação plástica não uniforme. Aquando do aquecimento de uma amostra de material, ocorre um aumento das suas dimensões, proporcional ao aumento da temperatura. Devido ao aumento de temperatura ocorre um aumento de volume, dado pela equação (1) (equação da dilatação térmica):

$$\Delta l = l - l_0 = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (1)$$

em que  $l_0$  é o comprimento da amostra antes do aquecimento,  $l$  é o comprimento da amostra após o aquecimento,  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica e  $\Delta T$  é a variação da temperatura, antes e depois do aquecimento. Caso não existam impedimentos no material quanto a variações dimensionais, durante o ciclo uniforme de aquecimento-arrefecimento, não surgirão alterações de maior na amostra, ou seja, não haverá formação de tensões residuais ou de distorções. No entanto, caso uma das situações anteriores se verifique (variação de temperatura não uniforme ao longo da peça ou restrições durante a dilatação ou contracção aquando do ciclo térmico aquecimento-arrefecimento) é grande a probabilidade de formação de tensões residuais e/ou distorções.

Considere-se o exemplo de três barras de aço, com os mesmos comprimento e diâmetro, unidas nas extremidades por duas placas metálicas, também elas de iguais dimensões (Figura 6).



**Figura 6** - Barras de aço e respectivas bases e barra 2, sujeita a ciclo térmico.

Posto isto, é fácil perceber que nenhuma das barras se pode alongar ou contrair independentemente. Procedendo ao aquecimento da barra central e mantendo as restantes à temperatura ambiente, a tendência é para que esta se dilate, mas é impedida pelas restantes dado que estão acopladas à base. Como resultado deste impedimento, formar-se-ão tensões

de compressão na barra central e tensões de tracção nas restantes barras. Cada uma das restantes barras ficará sujeita a uma tensão dada pela seguinte demonstração:

Designando as barras das extremidades como sendo as de índice 1 e 3 e a central de índice 2, temos:

$$\sigma_1 A_1 + \sigma_2 A_2 + \sigma_3 A_3 = 0, \quad (2)$$

em que  $\sigma$  e  $A$  são, respectivamente, a tensão e a área da secção transversal de cada uma das barras circulares. Dado que a área da secção das três barras é igual, assim como a tensão das barras das extremidades, temos que:

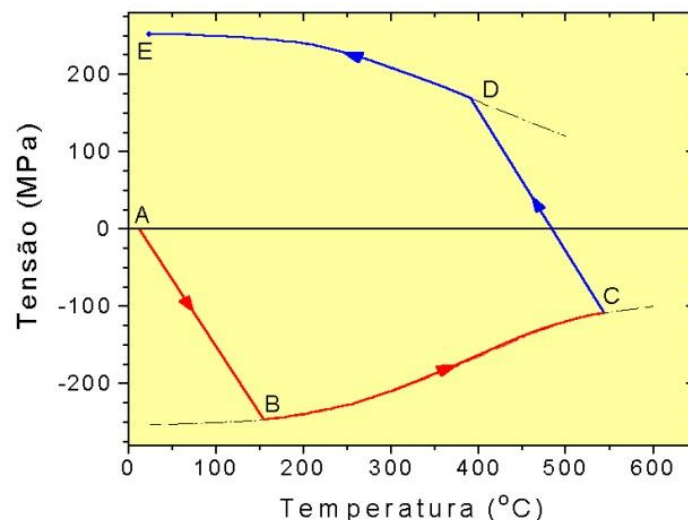
$$\sigma_1 A_1 + \sigma_2 A_2 + \sigma_3 A_3 = 0 \Leftrightarrow, \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow 2 \cdot \sigma_1 A_1 = -\sigma_2 A_1 \Leftrightarrow, \quad (4)$$

$$\Leftrightarrow \sigma_1 = -\frac{\sigma_2}{2}, \quad (5)$$

Posto isto, as barras 1 e 3 não se deformam plasticamente.

Procede-se agora, com auxílio do gráfico da Figura 7, à análise das tensões na barra central durante o ciclo térmico de aquecimento-arrefecimento, isto é, comportamento das tensões que actuam nestas, em função da temperatura.



**Figura 7** - Comportamento das tensões que actuam na barra central em função da temperatura durante o ciclo térmico.

Numa primeira fase, dada a dilatação da barra central, as deformações são elásticas. Seguidamente, quando a barra atinge a tensão limite de elasticidade,  $\sigma_C$ , passa a deformar-se plasticamente. Visto que a tensão limite de elasticidade diminui com a

temperatura, o valor da tensão na barra central irá diminuir à medida que a sua temperatura aumenta, sofrendo assim uma maior deformação plástica. Cessado o aquecimento, a barra central começa a contrair-se com o abaixamento da temperatura. Devido ao facto de as barras das extremidades restringirem a barra central, as tensões de compressão na barra central vão diminuindo até à temperatura ambiente, tornando-se nulas acima desta. Após esta fase, a barra passa a estar sujeita a tensões de tracção, acompanhadas pela diminuição de temperatura.

Quando a barra central volta a atingir novamente a sua tensão limite de elasticidade, começa a deformar-se plasticamente até atingir a temperatura ambiente. Na fase final, já à temperatura ambiente, a barra tem um comprimento menor devido à deformação plástica. De salientar que as tensões de tracção têm agora um valor próximo da tensão limite de elasticidade. Visto que as barras estão unidas pelas bases, e como têm dimensões diferentes, estão sujeitas a deformações plásticas, deformações essas que dão origem às tensões residuais. As barras externas estão, nesta fase, sujeitas a tensões de compressão, cada uma com metade da tensão da barra central, para se manter o equilíbrio das forças.

### **2.3. Medição Experimental de Tensões Residuais**

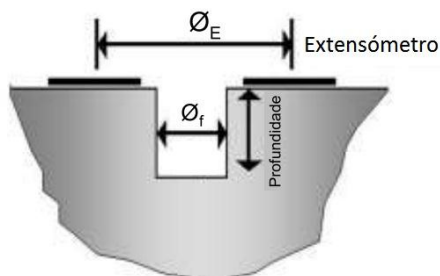
A medição das tensões residuais provocadas no provete de alumínio pelo ciclo térmico e pelo processo de maquinagem foi, como se disse anteriormente, realizada no laboratório de tensões residuais do Departamento de Física recorrendo ao conhecido método do furo incremental.

A técnica do furo incremental para alívio de tensões é, hoje em dia, uma das técnicas mais usadas na determinação de tensões residuais. É um método relativamente simples em termos físicos e rege-se pela norma A.S.T.M. E837. Este método é considerado semi-destrutivo, dado que o furo realizado na direcção do centro do extensómetro não põe em causa a integridade estrutural do objecto em análise.



**Figura 8** - Detalhes do equipamento de furação (*Vishay-Measurements Group, 2007*).

O furo, efectuado com recurso ao equipamento da Figura 8, possui habitualmente diâmetros que variam entre 0.8 e 4mm, profundidade 20% superior a este para campos de tensão uniforme e 50% superior para campos de tensão não uniformes. Esta relação é ilustrada na Figura 9.



**Figura 9** - Relação entre as dimensões do extensómetro e as dimensões do furo (*Martins et al, 2004*).

Mesmo que de diâmetro pequeno, o furo provoca no corpo uma relaxação de tensões (desde que este possua tensões residuais). Este furo raramente atravessa a totalidade do objecto e tem uma profundidade aproximadamente igual ao diâmetro, profundidade esta muito pequena relativamente à espessura da amostra em estudo.

Este método, quando comparado com outros métodos, apresenta um excelente desempenho. A sua incerteza de medição situa-se entre 10 e 20% (em campos de tensão uniformes e técnicas adequadas) do valor medido ou 10% da tensão de escoamento.

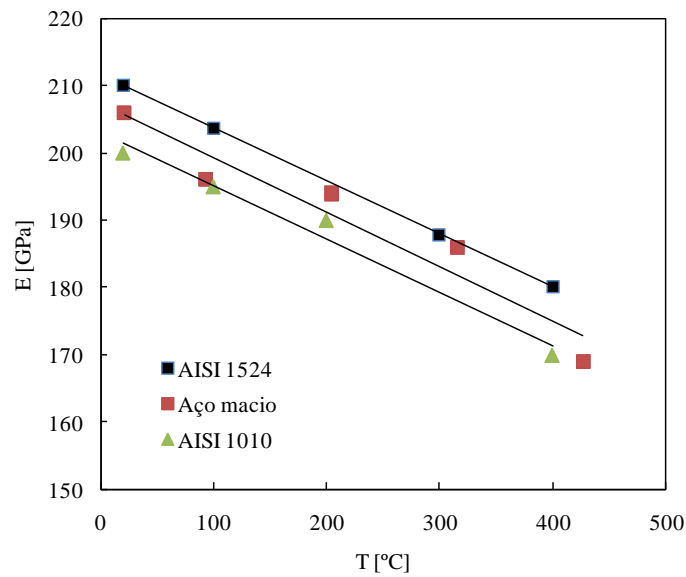
De referir ainda que a furação deve ser feita de forma incremental, tal como o próprio nome indica. Isto permite avaliar a uniformidade da tensão ao longo da espessura e garantir o correcto uso dos coeficientes de calibração. À medida que o processo decorre devem também registar-se as deformações, assim como as respectivas profundidades.

O método experimental radiocristalográfico, ou de **difracção de raios-X**, é porém o mais utilizado no domínio da análise das tensões residuais em materiais cristalinos. A fraca penetração dos raios X na matéria torna esta técnica especialmente atractiva para a caracterização mecânica de superfícies. É um método considerado não-destrutivo em medições superficiais e pode ser aplicado a peças com qualquer forma estando apenas limitado pela acessibilidade do ponto de incidência e difracção dos raios X. Permite efectuar medidas muito localizadas ( $<1 \text{ mm}^2$ ). A caracterização de um material em profundidade é possível removendo sucessivas camadas do material através de polimento electrolítico ou químico, sendo considerado, neste caso, um método destrutivo. Uma das maiores limitações do método é o facto de apenas poder ser aplicado a materiais cristalinos. O método do furo, para além de permitir uma medição em profundidade, pode ser aplicado a todos os materiais.

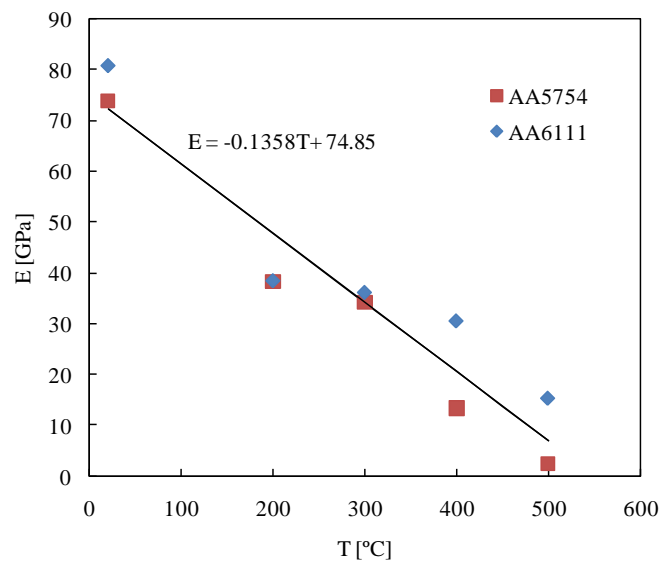
## **2.4. Variação das propriedades termo-mecânicas com a temperatura**

A variação das propriedades termo-mecânicas com a temperatura foi retirada de várias referências bibliográficas. Nas Figuras 10 e 11 pode ver-se, respectivamente a variação do módulo de Young para alguns aços e ligas de alumínio. O aumento de temperatura reduz a rigidez dos materiais, o que seria de esperar. A variação é linear, dentro da gama de temperaturas em estudo, sendo a tendência semelhante para os aços estudados. A  $450^\circ\text{C}$  o módulo de Young é cerca de 70% do valor à temperatura ambiente. Na figura pode ver-se a variação do módulo de Young para duas ligas de alumínio. Pode também observar-se um decréscimo linear com o aumento de temperatura, porém a variação é bastante mais significativa do que nos aços. A rigidez a  $450^\circ\text{C}$  é somente 19% da rigidez à temperatura ambiente.





**Figura 10** - Variação do módulo de Young com a temperatura para os aços AISI1524, AISI1010 e para um aço macio.



**Figura 11** - Variação do módulo de Young com a temperatura para as ligas de alumínio AA5754 e AA6111.

Na Figura 12 pode ver-se a variação do coeficiente de dilatação térmica para alguns aços e ligas de alumínio. O aumento de temperatura aumenta o coeficiente de dilatação térmica, sendo a variação linear dentro da gama de temperaturas em estudo (0-500°C). A dilatação do alumínio é cerca de duas vezes superior à do aço. Além disso, a variação com a temperatura é maior para as ligas de alumínio do que para o aço.

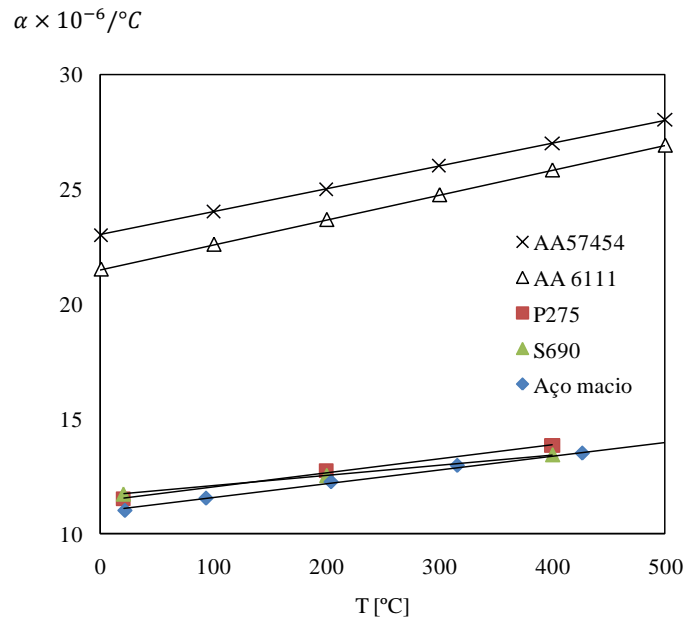


Figura 12 - Variação do coeficiente de dilatação térmica com a temperatura.

A Figura 13 ilustra a variação da tensão de cedência com a temperatura para as duas ligas de alumínio. O aumento de temperatura reduz significativamente a tensão de cedência.

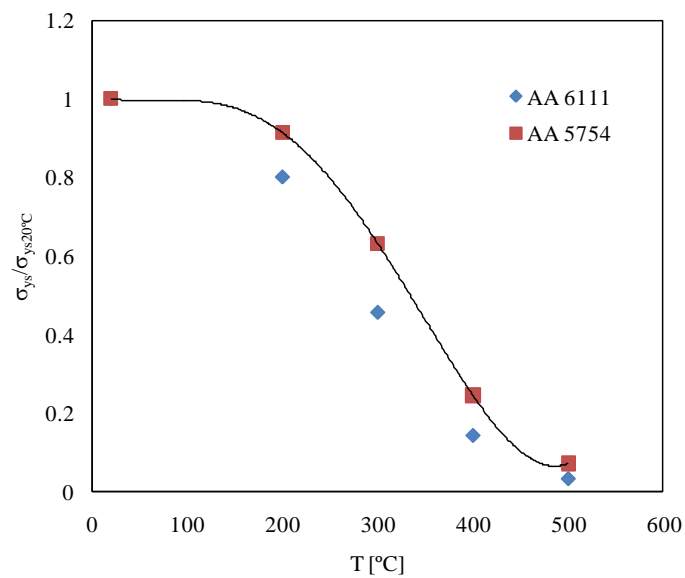


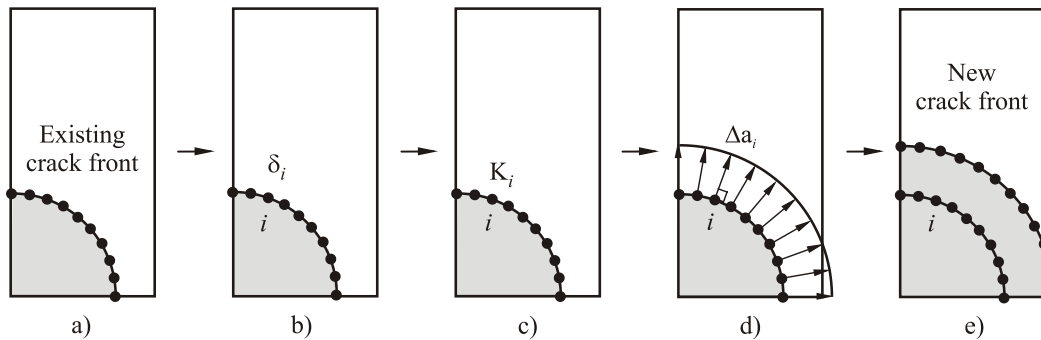
Figura 13 - Variação da tensão de cedência com a temperatura.

## 2.5. Efeito na vida à fadiga

As tensões residuais afectam significativamente a vida à fadiga dos componentes. As tensões de compressão tendem a aumentar a vida à fadiga, sendo por isso benéficas. De fato, a tensão média resultante das cargas aplicadas exteriormente é reduzida na presença de tensões médias de compressão. A redução da tensão média aumenta a vida à fadiga, nomeadamente se o ciclo de carga entrar na zona de compressão. É usual utilizarem-se tratamentos para introduzir tensões residuais de compressão na superfície das peças, onde normalmente se iniciam as fendas de fadiga. Os tratamentos mais usuais são grenalhagem e a laminagem superficial. A grenalhagem consiste em projectar a alta velocidade pequenas esferas sobre a superfície, sendo normalmente utilizada em peças relativamente pequenas. Os tratamentos de nitruração ou de têmpera permitem também introduzir tensões de compressão. A laminagem superficial é utilizada em peças relativamente grandes. Em sentido contrário, tensões residuais superficiais de tracção são prejudiciais para a vida à fadiga. Os tratamentos de rectificação e polimento podem causar tensões de tracção. Um polimento severo pode criar tensões de tracção suficientemente elevadas para eliminar o benefício resultante do melhor acabamento superficial. A têmpera total cria também tensões superficiais de tracção que podem ser eliminadas por revenido.

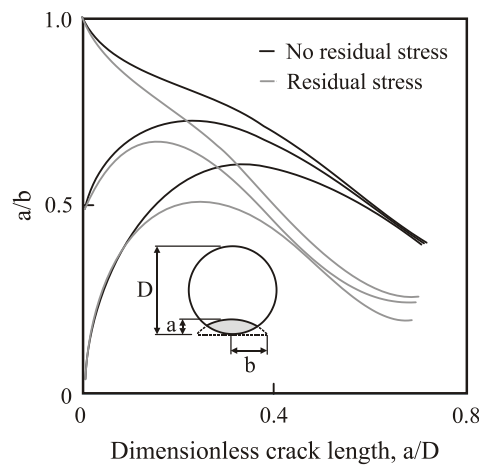
Em relação à propagação de fendas, as tensões de compressão tendem a fechar as faces da fenda, impedindo a sua progressão. O efeito na vida de propagação à fadiga foi estudado utilizando programas de propagação automática de fenda. A simulação da propagação compreende os 5 passos ilustrados na Figura 14. Primeiro cria-se um modelo de elementos finitos da peça fissurada, que é utilizado para calcular o campo de deslocamentos (Figura 14b). Os deslocamentos são utilizados para calcular o factor de intensidade de tensões ao longo da frente de fenda (Figura 14c). A lei de Paris, juntamente com os valores de  $K$  permite definir uma nova frente de fenda, tal como se ilustra nas figuras 14d) e 14e). Este procedimento é repetido até que se atinja a tenacidade à fractura do material. Este procedimento foi utilizado por Carpinteri *et al.* (2010) para estudar o efeito das tensões residuais devido a processos de trabalho a frio em barras metálicas de seção circular com entalhe lateral em V. Gardin *et al.* (2007) investigou a influência de tensões residuais de compressão na propagação de fendas em varões entalhados com uma pequena fenda semi-elíptica. Branco (2011) estudou a evolução da forma da fenda em

provetes com furo central e com duplo-U com fendas de canto, representativas de discos de turbina, com e sem tensões residuais.



**Figura 14** - Simulação da propagação automática da fenda.

Na Figura 15 pode ver-se o efeito de tensões residuais de tração à superfície, na evolução da forma da fenda em barras circulares à tração (Carpinteri, 2010). São apresentados resultados para 3 configurações iniciais de fenda ( $a/b=0$ ,  $a/b=0.5$ ,  $a/b=1$ ). As tensões residuais aceleram a propagação à superfície, reduzindo a razão  $a/b$ .



**Figura 15** - Evolução da forma da fenda com e sem tensões residuais (Carpinteri, 2010).

### 3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

#### 3.1. Procedimento experimental

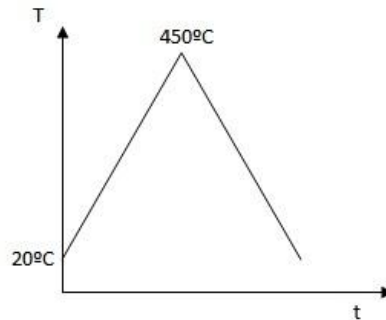
O ensaio experimental é o ponto de partida deste trabalho e, como tal, é de extrema importância descrevê-lo pormenorizadamente, assim como explicar o seu propósito. Dada a natureza dos ensaios, foi necessário dividi-los em duas partes. A primeira parte foi feita no Laboratório de Construções Mecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica (D.E.M.) da Universidade de Coimbra, tendo por objectivo a geração de tensões residuais de origem térmica. A segunda parte foi feita no Departamento de Física da Universidade de Coimbra, no Laboratório de Tensões Residuais, consistindo na medição das tensões residuais.

As tensões residuais foram geradas aquecendo um cilindro de alumínio comercialmente puro de 120mm de comprimento e 25.8mm de diâmetro, (Figura 18a) dentro de um forno e inibindo a sua dilatação. Para inibir o aumento de volume utilizou-se o cavilhão de um pistão do motor de um camião da marca Volvo (Figura 18b) com 108.4mm de comprimento e 25.8mm de diâmetro interno. A dilatação do aço é substancialmente menor do que a do alumínio, e além disso não se esperam alterações microestruturais à temperatura do ensaio. Por seu lado, a peça de alumínio foi maquinada nas oficinas do D.E.M. de maneira a que ficasse concêntrica com o cavilhão de aço (Figura 18c). De referir que à peça de alumínio foi acoplado um arame e uma barra de ferro para que as amostras ficassem colocadas a meio do forno. Nas Figuras 16 e 18d pode ver-se o forno utilizado nos ensaios para a realização do ciclo térmico. O modelo do equipamento é *Severn Furnaces Limited, SF1089*, cuja temperatura máxima pode ascender a cerca de 1200°C. Foi também utilizado um controlador de temperatura do modelo *Severn Furnaces Limited, CUI089* (Figura 18e) com a particularidade de monitorizar e controlar a temperatura em três zonas diferentes do forno, no topo, no centro e na base (Figura 18d). O ensaio consistiu basicamente na colocação das peças no forno e aplicação de um



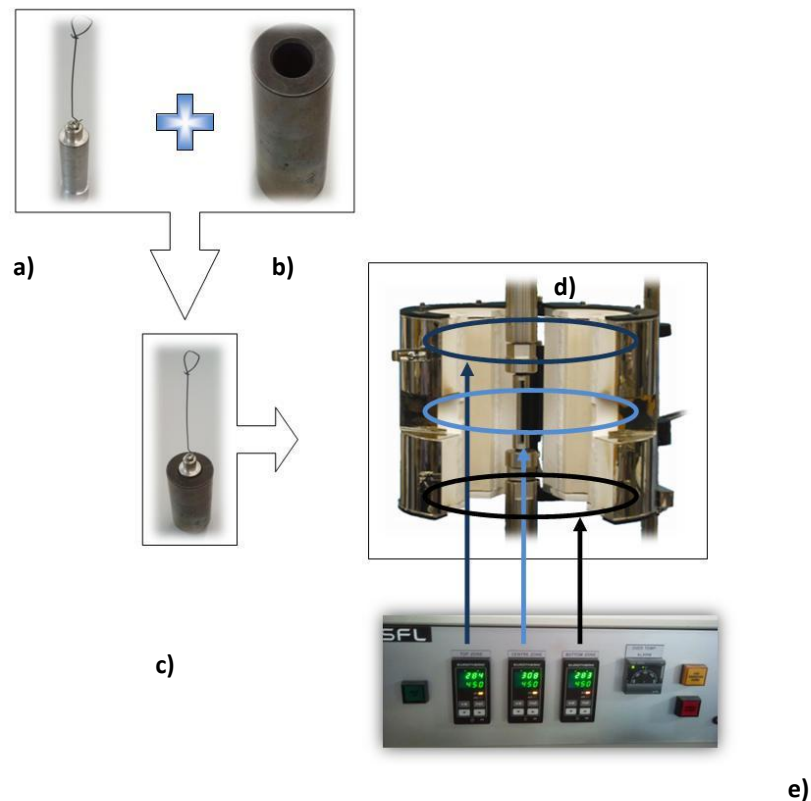
Figura 16 - Forno refractário, *Severn Furnaces Limited*.

ciclo térmico. O ciclo térmico consistiu no aquecimento das duas peças (dispostas concêntricamente) a uma temperatura inferior à temperatura de fusão do alumínio (cerca de  $660^{\circ}\text{C}$ ), dado que o presente estudo apenas diz respeito a tensões residuais sem mudança de fase. As amostras foram então aquecidas até à temperatura de  $450^{\circ}\text{C}$  (Figura 17).



**Figura 17** - Ciclo térmico ao qual ambas as peças foram sujeitas.

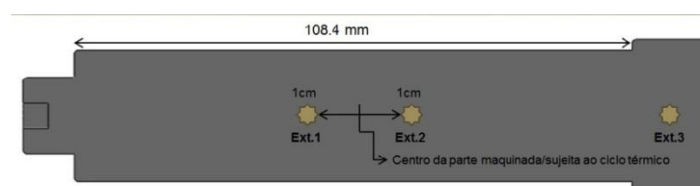
Esta temperatura foi medida em três pontos diferentes do forno. Terminado o aquecimento, as peças foram arrefecendo lentamente até à temperatura ambiente. Terminado o ciclo térmico, era de esperar a formação de tensões residuais na amostra de alumínio, devido ao seu superior coeficiente de dilatação térmica face ao cavilhão de aço, impedindo portanto, a dilatação do alumínio, formando tensões residuais neste.



**Figura 18** - Provete de alumínio **a)**; cavilhão de aço **b)**; alumínio e aço dispostos concentricamente **c)**; forno refractário aquecido em três pontos **d)**; variador de temperatura **e)**.

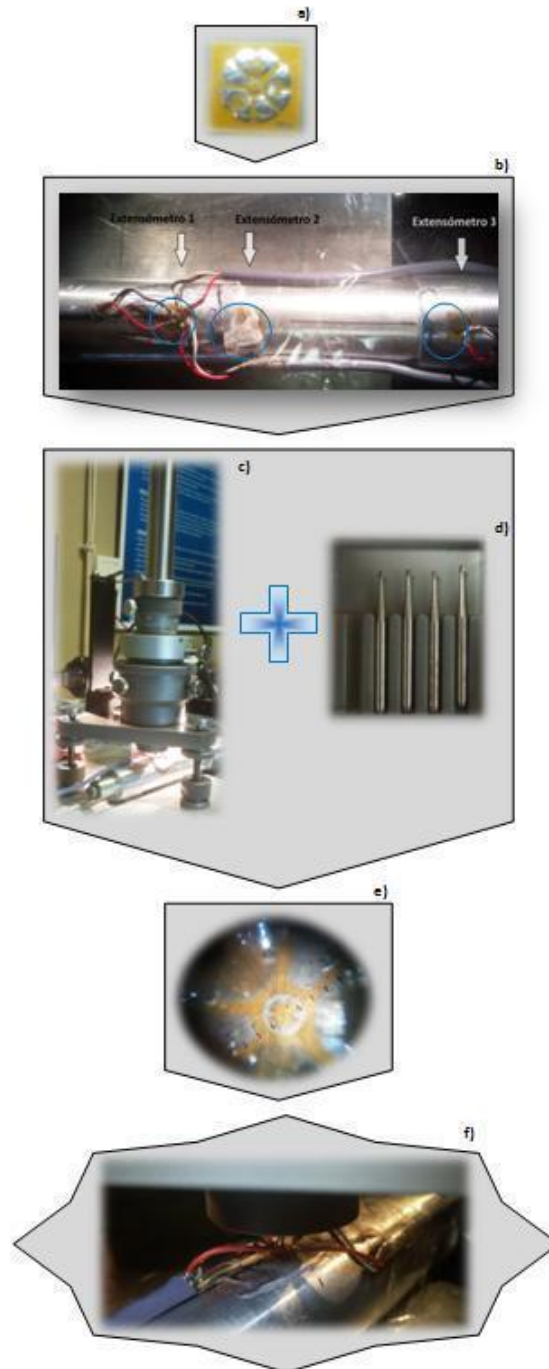
A segunda parte do ensaio, realizada no Departamento de Física, consistiu na determinação das tensões residuais induzidas na peça de alumínio, resultantes do ciclo térmico ao qual foi submetida e também do processo de maquinagem prévio. Para o efeito recorreu-se ao método do furo incremental ou “*Hole-Drilling*”. Grosso modo este método consiste na colocação de extensómetros, neste caso do tipo roseta (Figura 19a), na superfície da peça e realizar um furo, com diâmetro de acordo com o tamanho do extensómetro, furo esse que vai provocar um alívio de tensões na peça.

Esse alívio de tensões traduz-se em pequenas deformações na estrutura do material que vão ser medidas pelos extensómetros. A colocação dos extensómetros (Ilustração 1) foi feita em três posições diferentes do provete.



**Ilustração 1** – Disposição dos extensómetros no provete de alumínio.

Dois deles foram colocados a um centímetro do centro da parte sujeita ao ciclo térmico e ao processo de maquinagem, um à esquerda (extensómetro 1) e outro à direita (extensómetro 2). O extensómetro 3 foi colocado na parte do provete que foi apenas sujeito a maquinagem (Figura 19b).



**Figura 19** - Extensómetro tipo roseta utilizado no ensaio experimental, *Vishay Micro-Measurement* **a)**; Disposição dos extensómetros no provete de alumínio **b)**; Mecanismo para realização da furação **c)**; Fresas de furação **d)**; Alinhamento da fresa com o centro do extensómetro **e)**; Processo de furação do provete de alumínio **f)**.



O processo passou por diversas etapas, nomeadamente a escolha dos extensómetros adequados, a limpeza e fixação do provete, a colagem dos extensómetros ao provete e a soldadura dos fios aos extensómetros. Estes fios fazem a ligação desde os extensómetros até à unidade de aquisição de dados. Terminado este processo procedeu-se à fixação do suporte do berbequim de modo a que, aquando a furação, este não oscilasse (Figura 19c). Posteriormente e com recurso a uma imagem ampliada ajustou-se a fresa (Figura 19d) de maneira a que esta furasse o extensómetro exactamente no seu centro (Figura 19e). Ligou-se a unidade de aquisição de dados ao computador e, com a ajuda de um programa desenvolvido para este processo, fez-se a furação do provete (Figura 19f), registando os deslocamentos do material assim como os incrementos da fresa correspondentes.

A furação é feita inicialmente com incrementos de um micrómetro e, com o aumento da profundidade, o incremento aumenta para dois e finalmente para quatro micrómetros. O incremento vai aumentando dado que a sensibilidade do extensómetro diminui com a profundidade. Em cada incremento, o computador regista os respectivos deslocamentos em três direcções, longitudinal, radial e circunferencial. O processo é bastante demorado dado que se está a lidar com equipamentos extremamente precisos e pequenos e, para além disso, a furação tem de ser efectuada muito lentamente para evitar o calor excessivo por fricção, calor este que pode induzir no material tensões residuais não desejadas. Todo o material utilizado na medição das tensões residuais era da marca *Vishay Micro-Measurements*.

### 3.2. Resultados experimentais

Apresentam-se de seguida nas Tabelas 1, 2 e 3 os valores das três componentes das tensões residuais  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\tau_{xy}$  obtidos no ensaio experimental no provete de alumínio. Estes valores são também apresentados sob a forma de gráfico nas Figuras 20, 21 e 22. Os valores obtidos dizem respeito aos três extensómetros instalados no provete de alumínio, dois deles na parte maquinada e sujeita ao ciclo térmico e o terceiro na parte que apenas sofreu maquinagem. Este último permite-nos saber as tensões provocadas apenas pelo processo de maquinagem e, conseqüentemente, as tensões provocadas apenas pelo ciclo térmico. Os extensómetros 1 e 2 colocaram-se a um centímetro do centro da parte

maquinada, sujeita ao ciclo térmico e constringida pelo aço, à esquerda e à direita, respectivamente. O terceiro instalou-se no centro da parte maquinada e sujeita ao ciclo térmico.

**Tabela 1** - Componentes das tensões residuais medidas pelo extensómetro 1.

Profundidade [mm]	$\sigma_z$ [MPa]	$\sigma_\theta$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]
0.013	-87	-39	-32
0.038	-35	-38	-20
0.064	-22	-28	-17
0.114	-22	-16	-12
0.140	-16	-7	-6
0.165	-16	-6	-5
0.191	-15	-1	-2
0.229	-14	-1	0
0.279	-16	-4	0
0.330	-19	-12	-2
0.381	-23	-20	-5

**Tabela 2** - Componentes das tensões residuais medidas pelo extensómetro 2.

Profundidade [mm]	$\sigma_z$ [MPa]	$\sigma_\theta$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]
0.013	-5	26	18
0.038	-33	-33	-9
0.064	-25	-6	5
0.114	-4	46	25
0.140	2	70	30
0.165	0	81	32
0.191	3	103	35
0.229	9	116	39
0.279	31	131	46
0.330	62	129	52
0.381	82	106	47

**Tabela 3** - Componentes das tensões residuais medidas pelo extensómetro 3.

Profundidade [mm]	$\sigma_z$ [MPa]	$\sigma_\theta$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]
0.013	-44	-37	-8
0.038	-40	-17	-16
0.064	-10	-3	0
0.114	-4	-2	18
0.140	-12	-6	-19
0.165	-20	-13	38
0.191	-29	-23	-47
0.229	-22	-22	-1
0.279	5	-1	19
0.330	34	36	20
0.381	20	28	-35

É importante referir que, aquando das medições adquiridas pelo extensómetro 2, por vezes surgia o erro *Overflow*, daí os valores obtidos pelos extensómetros 1 e 2 sejam significativamente diferentes quando, na verdade, deveriam ser semelhantes dado que se encontram na mesma superfície que sofreu exactamente as mesmas solicitações. Este erro deve-se, provavelmente, a alguma falha na instalação e é irreversível no caso deste método de medição pelo que, daqui para a frente, apenas se consideram viáveis as medições obtidas pelos extensómetros 1 e 3.

Da observação das Tabelas 1 e 3 observa-se que as tensões residuais obtidas são tensões de compressão, tanto pelo extensómetro 1 como pelo extensómetro 3. O extensómetro 1 registou à superfície valores de -87, -39 e -32MPa, respectivamente para as tensões  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\tau_{xy}$ . De notar também que as três componentes da tensão aumentam até valores próximos de zero para uma profundidade de cerca de 0.2mm. Passada esta profundidade as tensões diminuem ligeiramente até valores na ordem de -26, -25 e -7MPa para as tensões  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\tau_{xy}$ , respectivamente.

Relativamente ao extensómetro 3, verifica-se que à superfície apresenta valores de -44, -37 e -8MPa, respectivamente tensões  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\tau_{xy}$ . As tensões  $\sigma_z$  e  $\sigma_\theta$  diminuem até valores próximos de zero para uma profundidade de cerca de 0.11mm, enquanto que as tensões  $\tau_{xy}$  apresentam um comportamento oscilatório ao longo da profundidade. Para profundidades superiores a 0.11mm, as tensões  $\sigma_z$  e  $\sigma_\theta$  diminuem para valores de cerca de -22MPa e, a partir daqui, o material passa a estar sujeito a tensões de tracção, terminando em valores de 20 e 28 MPa respectivamente.

Nas Figuras 20, 21 e 22 ilustra-se graficamente o comportamento das tensões residuais de forma comparativa para as componentes  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\tau_{xy}$ , medidas pelos extensómetros 1 e 3.

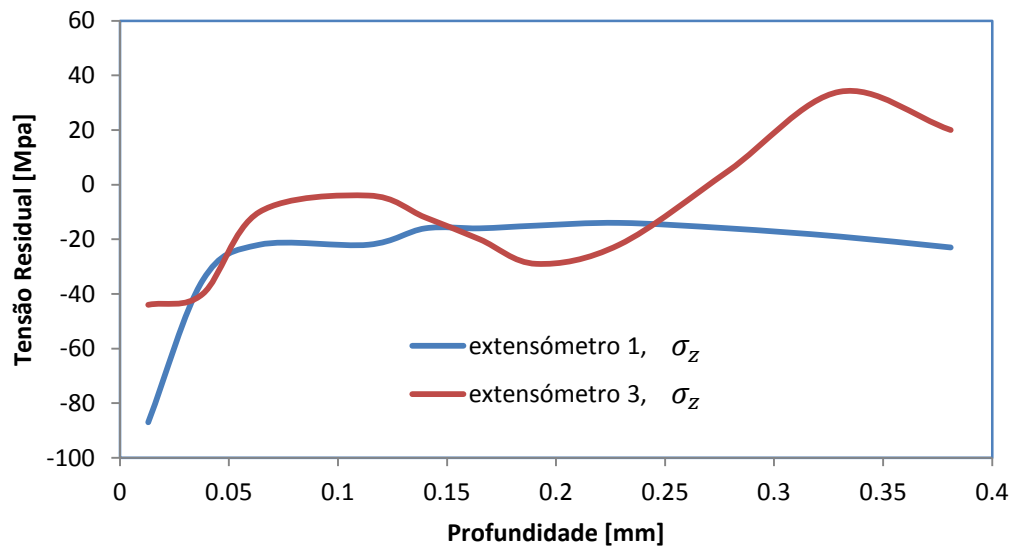


Figura 20 Gráfico representativo da componente da tensão  $\sigma_z$  medida pelo extensômetro 1 e pelo extensômetro 3.

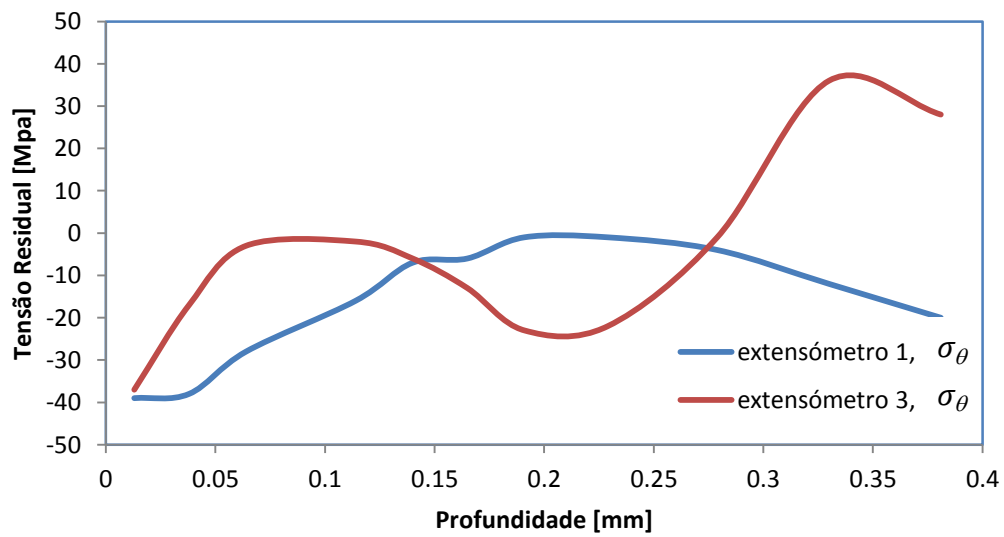
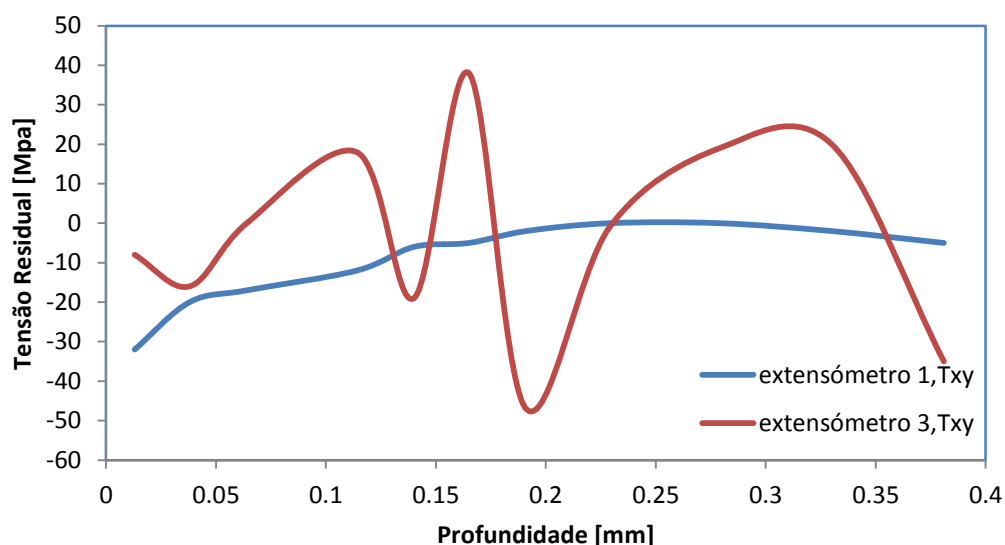
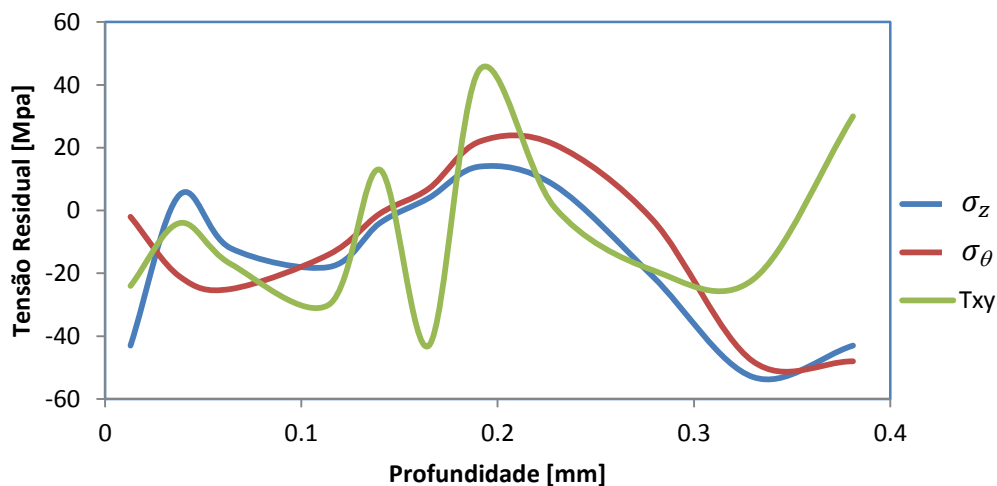


Figura 21 - Gráfico representativo da componente da tensão  $\sigma_\theta$  medida pelo extensômetro 1 e pelo extensômetro 3.



**Figura 22** - Gráfico representativo da componente da tensão  $\tau_{xy}$  medida pelo extensômetro 1 e pelo extensômetro 3.

Na Figura 23 representam-se graficamente as diferenças entre as tensões residuais no extensômetro 1 e o extensômetro 3. Estas diferenças traduzem-se nas tensões residuais formadas apenas pelo ciclo térmico.



**Figura 23** - Gráfico representativo das tensões residuais  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\tau_{xy}$  provocadas pelo ciclo-térmico.

Pela análise da Tabela 4 verifica-se que à superfície as componentes da tensão apresentam valores dos -43 -2 e -24,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\tau_{xy}$ , respectivamente. Com o aumento da profundidade observa-se que as três componentes apresentam comportamento oscilatório, sendo de notar uma maior oscilação na componente  $\tau_{xy}$ . Essa oscilação é explicada pela oscilação das tensões medidas pelo extensômetro 3. À profundidade máxima medida, cerca

de 0.38mm, as componentes  $\sigma_z$  e  $\sigma_\theta$  registam tensões de compressão com valores de -43 e -48 respectivamente, enquanto que a componente  $\tau_{xy}$  apresenta tensões de tracção de 30 MPa. A maioria das tensões residuais medidas é de compressão, o que indica deformações de tracção à superfície induzidas pelos processos de maquinagem e ciclo-térmico.

**Tabela 4** - Diferença de valores medidos pelo extensómetro 1 e o extensómetro 3.

Profundidade [mm]	$\sigma_z$ [MPa]	$\sigma_\theta$ [MPa]	$\tau_{xy}$ [MPa]
0.013	-43	-2	-24
0.038	5	-21	-4
0.064	-12	-25	-17
0.114	-18	-14	-30
0.140	-4	-1	13
0.165	4	7	-43
0.191	14	22	45
0.229	8	21	1
0.279	-21	-3	-19
0.330	-53	-48	-22
0.381	-43	-48	30

## 4. ANÁLISE NUMÉRICA

### 4.1. Modelo numérico

O modelo numérico procurou replicar o ensaio experimental em termos de geometria, condições de fronteira, carregamento e comportamento termo-mecânico dos materiais. A ferramenta numérica utilizada na análise foi o programa de elementos finitos comercial Marc-Mentat 2010, desenvolvido pela MSC Software.

Na figura pode ver-se a geometria considerada no modelo numérico. Tendo em conta a simetria do problema relativamente ao eixo central, desenvolveu-se um modelo axissimétrico (bidimensional). Na Figura 24 podem ver-se as condições de fronteira aplicadas. Analisou-se somente meio provete na direcção longitudinal (direcção  $x$ ), tendo em conta a simetria existente. O movimento segundo  $x$  foi pois restringido no plano de simetria (i.e., em  $x=0$ ). No eixo de axissimetria (eixo  $x$ ) restringiu-se o movimento segundo  $y$ .

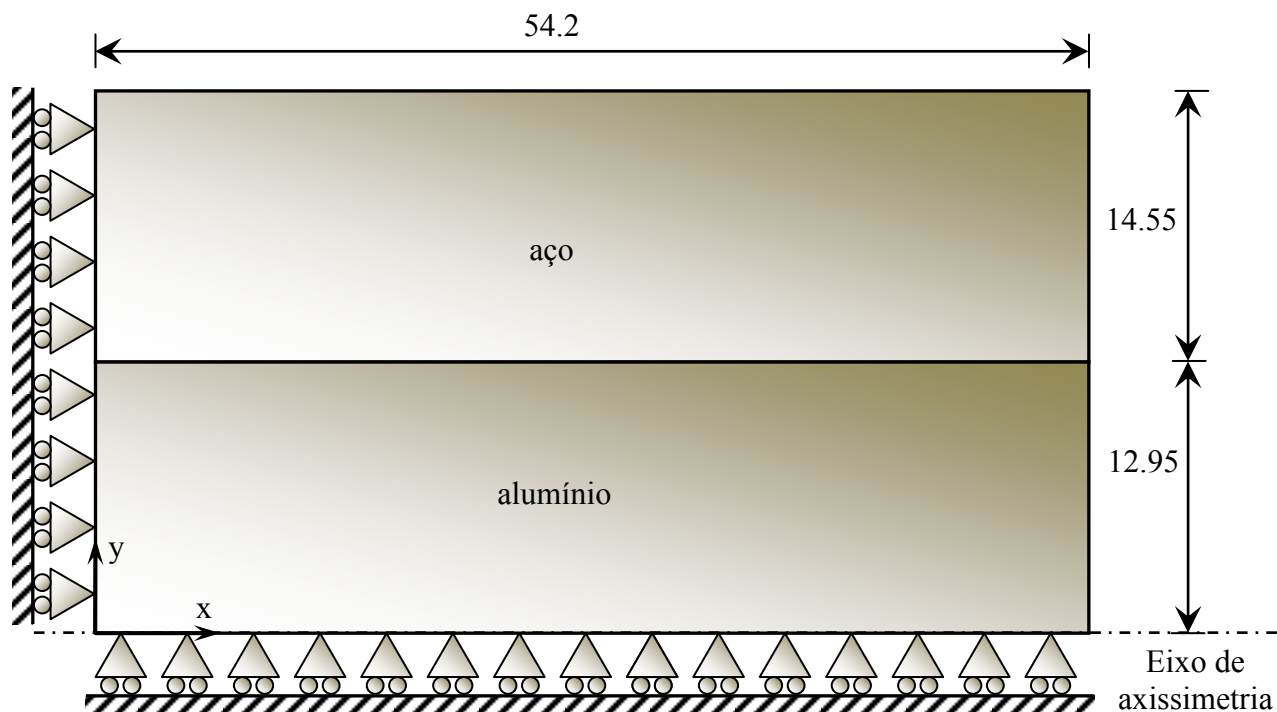


Figura 24 - Modelo axissimétrico.

A geometria foi sujeita a um carregamento térmico a variar de 20 a 450°C (Figura 25), tal como aconteceu no ensaio experimental. Considerou-se como condição inicial uma temperatura uniforme de 20°C. Assumiu-se ainda um regime estacionário, em que a temperatura varia ao mesmo tempo em todo o volume de ambos os corpos.

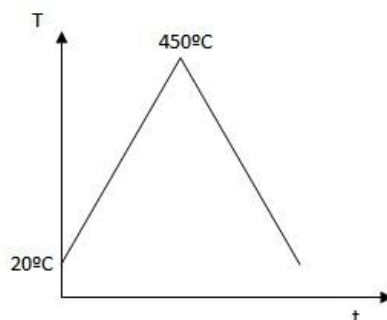


Figura 25 - Carregamento térmico.

Na Figura 26 pode ver-se a malha de elementos finitos considerada. As superfícies foram divididas em elementos axissimétricos de 4 nós (lineares). No *software* utilizado estes elementos designam-se do tipo 10, tendo integração completa. Os elementos são quase quadrados, o que é vantajoso em termos numéricos, tendo uma dimensão de cerca de  $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ . A malha total tem 5782 elementos e 6047 nós. Para a interface alumínio-aço considerou-se um contacto com atrito.

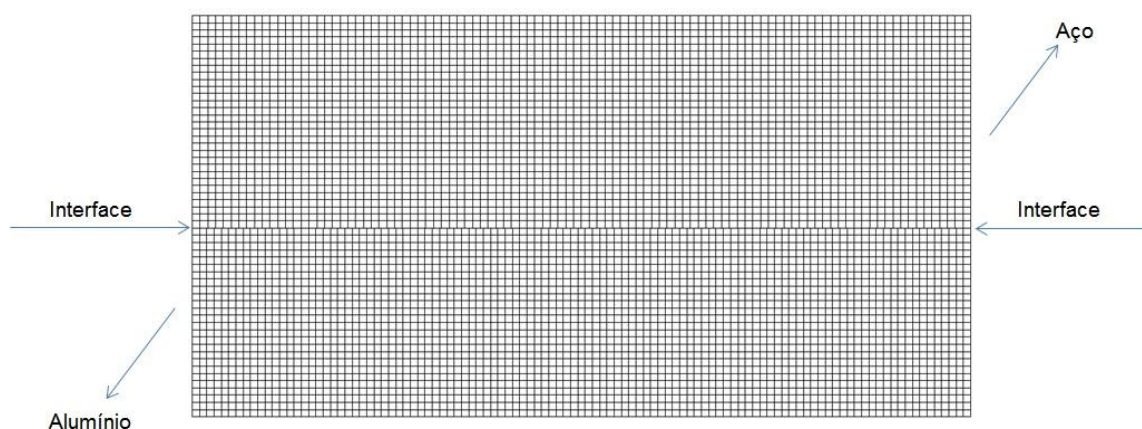


Figura 26 - Malha de elementos finitos.

A principal dificuldade do modelo numérico reside na definição das propriedades termo-mecânicas. De facto, é necessário ter as diferentes propriedades a variar com a temperatura, o que não é fácil de obter. As propriedades relevantes são as



constantes elásticas (módulo de Young e coeficiente de Poisson), a curva tensão-deformação (que descreve o comportamento elasto-plástico) e o coeficiente de dilatação.

As propriedades elásticas consideradas à temperatura ambiente e constantes foram:  $E_{AL}=70000\text{MPa}$ ,  $\nu_{Al}=0.345$ ;  $E_{aço}=210000\text{MPa}$ ,  $\nu_{aço}=0.3$ . Os coeficientes de dilatação considerados foram:  $\alpha_{Al}=2.4\times 10^{-5}\text{°C}^{-1}$ ;  $\alpha_{aço}=1.26\times 10^{-5}\text{°C}^{-1}$ . As curvas tensão-deformação utilizadas à temperatura ambiente estão representadas na figura, seguindo a lei de Swift. Considerou-se um encruamento cinemático não linear (lei de Prager).

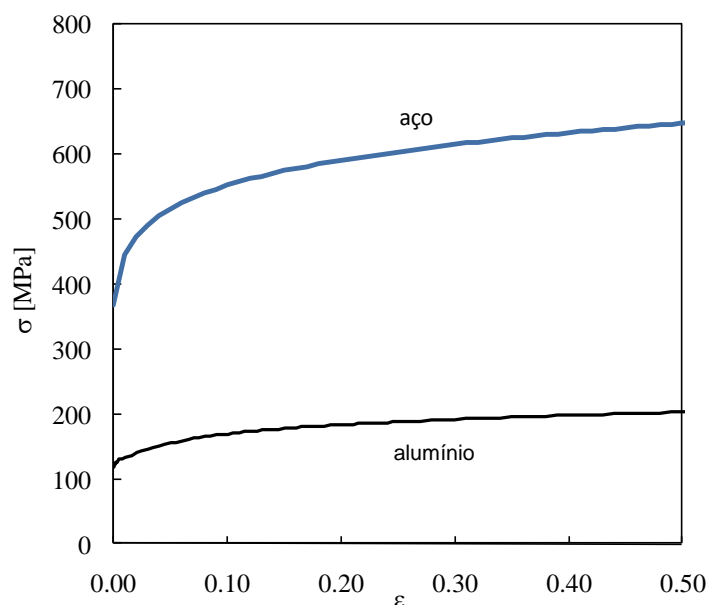


Figura 27 - Curvas tensão-deformação.

O modelo numérico tem algumas limitações, que importa salientar. Assim, a rugosidade das superfícies em contacto não é considerada, assumindo-se superfícies perfeitas. Considerou-se que as superfícies das duas peças estão em contacto, isto é, que o *gap* entre elas era nulo na situação inicial. As propriedades, e em particular a variação com a temperatura, são questionáveis. Finalmente, durante o processo de aquecimento a temperatura não é uniforme em todo o volume de ambas as peças. O aquecimento faz-se de fora para dentro, de um modo que depende da condutividade dos materiais.

## 4.2. Resultados numéricos

Na Figura 28 podem ver-se as tensões residuais obtidas nas direcções longitudinal ( $\sigma_z$ ), radial ( $\sigma_r$ ) e circunferencial ( $\sigma_\theta$ ). Pode notar-se que as tensões são em geral relativamente baixas. É junto ao bordo que se localizam as maiores tensões residuais, devido ao menor constrangimento à deformação.

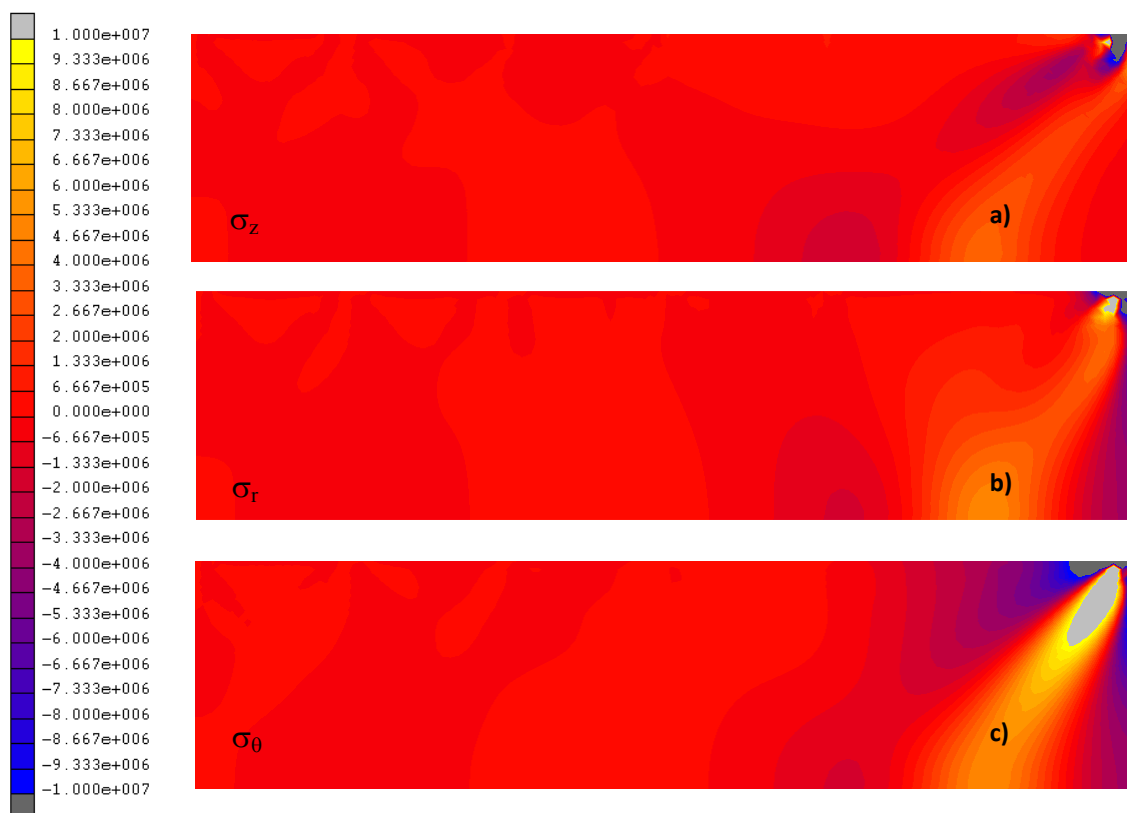
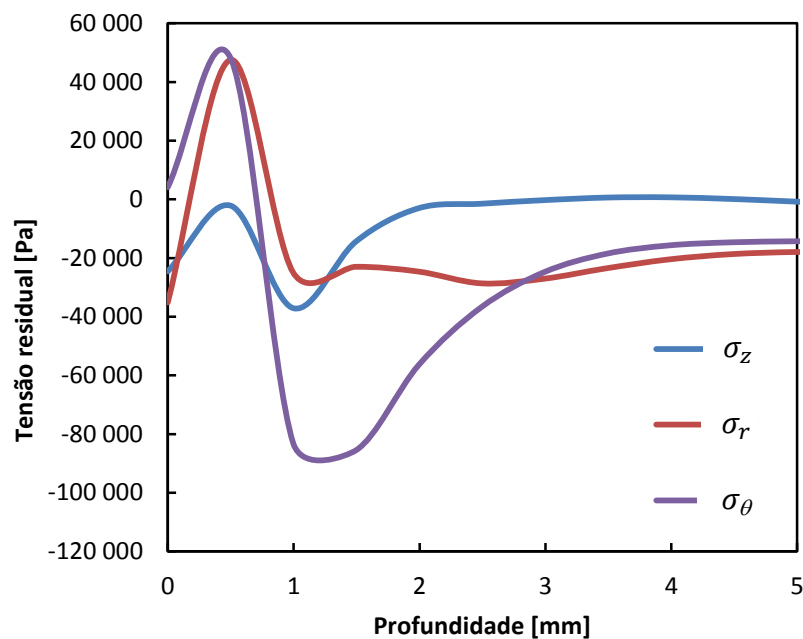


Figura 28 - Tensões residuais na direcção longitudinal a), radial b) e circunferencial c).

Na Figura 29 estão representadas graficamente as componentes  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  das tensões residuais presentes no provete de alumínio em função da profundidade para a distância onde, no ensaio experimental, se instalou o extensómetro 1. Estas tensões foram determinadas tendo em consideração as propriedades termo-mecânicas do aço e do alumínio à temperatura ambiente (e invariantes com a temperatura). Pela análise do gráfico verifica-se que as tensões residuais são de baixa magnitude e, para além disso, as três componentes são da mesma ordem de grandeza. A componente  $\sigma_z$  é de compressão e anula-se para uma profundidade de cerca de 2mm. A componente  $\sigma_r$  é inicialmente de compressão passando depois a ser de tracção, atingindo o seu máximo para uma profundidade de cerca de 0.5mm. A partir desta profundidade a tensão desce, volta novamente a ser de compressão para a profundidade de 1mm, sendo sempre desta

magnitude daqui para a frente. Por fim, observa-se que a componente  $\sigma_\theta$  apresenta um comportamento semelhante à componente  $\sigma_r$  até à profundidade de cerca de 1mm, anulando-se para este valor. A partir desta profundidade, a componente  $\sigma_\theta$  é de compressão, apresentando mesmo o valor máximo das quatro tensões. De referir ainda que a partir sensivelmente dos 3mm as três componentes das tensões tendem para zero. A análise das tensões não é relevante para valores acima de 1mm dado que no procedimento experimental apenas se mediram tensões até 0.5mm de profundidade.



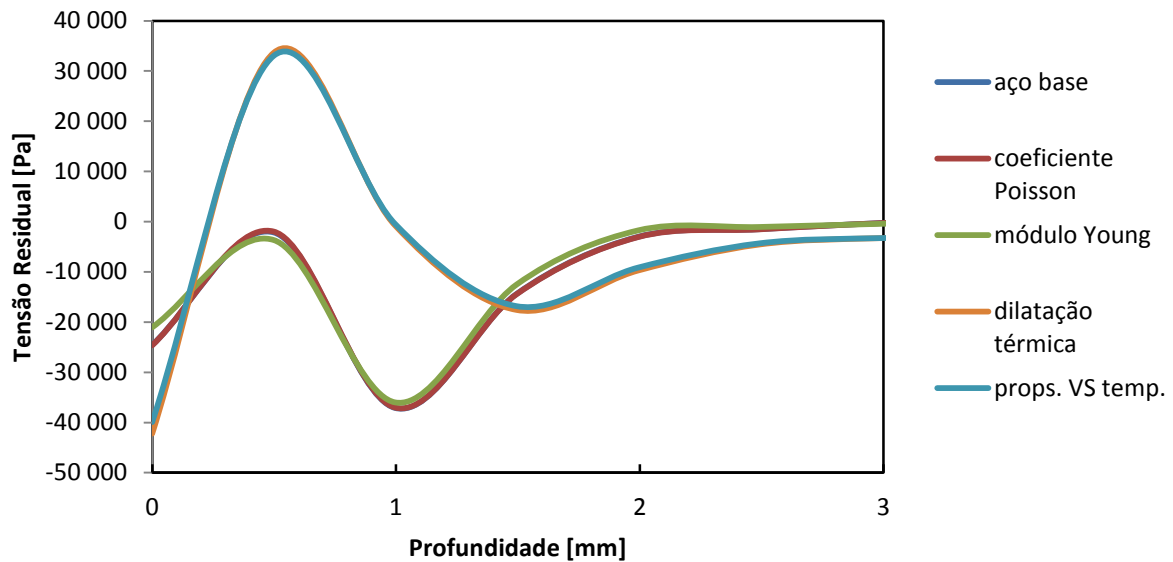
**Figura 29** - Componentes da tensão residual considerando as propriedades termo-mecânicas à temperatura ambiente.

De seguida estudou-se o efeito da alteração das propriedades termo-mecânicas no aço, fazendo-as variar com a temperatura. As propriedades que se fizeram variar com a temperatura foram o módulo de Young, os coeficientes de Poisson e de dilatação térmica. Estas propriedades, no caso do aço, foram gentilmente facultadas por investigadores espanhóis. A influência da variação das propriedades termo-mecânicas do aço com a temperatura é ilustrada graficamente nas Figuras 30, 31 e 32 para três componentes das tensões residuais,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$ . Os valores de tensão e profundidade resultantes das simulações do programa de métodos de elementos finitos encontra-se no Anexo 1. Nesta fase as propriedades consideradas para o alumínio foram fixadas em:

$$E = 70000MPa \quad (6)$$

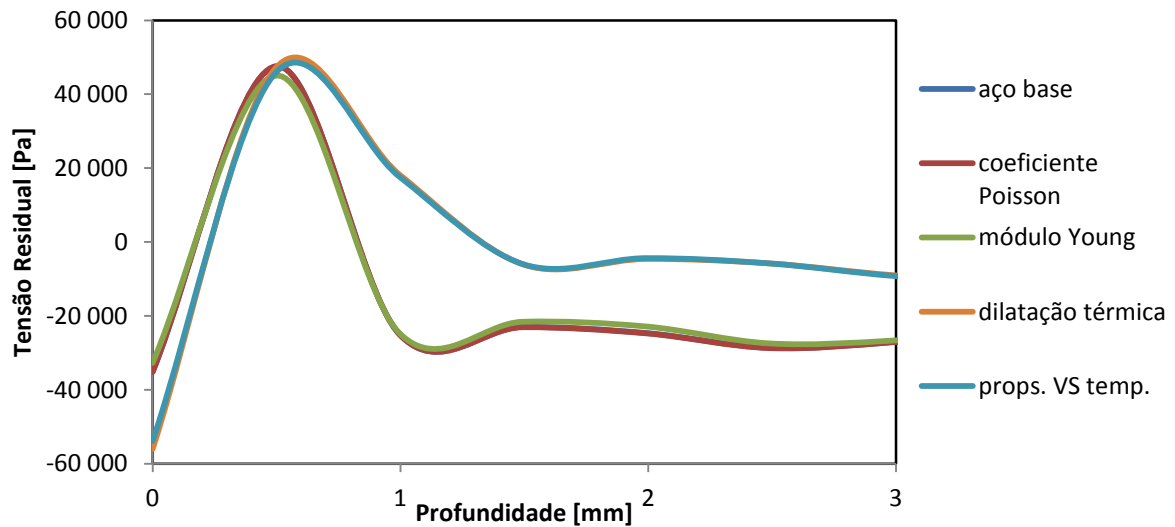
$$\alpha = 2,4 \times 10^{-5}/^{\circ}C \quad (7)$$

$$\nu = 0,345 \quad (8)$$



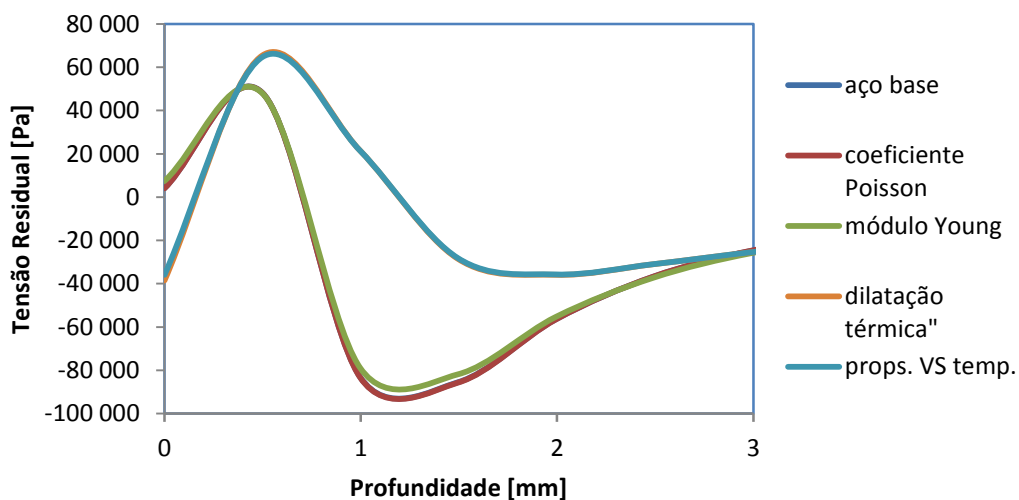
**Figura 30** - Componente  $\sigma_z$  das tensões residuais fazendo variar as propriedades do aço com a temperatura.

O gráfico da Figura 30 permite-nos tirar algumas conclusões importantes. É possível verificar que a propriedade que mais influencia a componente  $\sigma_z$  das tensões residuais no alumínio é o coeficiente de dilatação térmica,  $\alpha$ . De fato, a curva com a conjugação de todas as variações com a temperatura é próxima da resultante da variação com  $\alpha$ . Com  $\alpha$  a variar com a temperatura, obtêm-se tensões de compressão à superfície, tendendo com o aumento de profundidade para tração até cerca de 1mm. A inclusão de variações com a temperatura no módulo de Young e o coeficiente de Poisson tem um impacto reduzido.



**Figura 31** - Componente  $\sigma_r$  das tensões residuais fazendo variar as propriedades do aço com a temperatura.

Na figura 31 pode ver-se a variação das tensões radiais,  $\sigma_r$ . Pela análise deste gráfico conclui-se que o módulo de Young e os coeficientes de Poisson e de dilatação térmica induzem no material tensões de compressão até à profundidade de cerca de 0.3mm, aumentando posteriormente e passando a tensões de tracção. A conjugação das três propriedades atrás mencionadas induz na peça um comportamento muito semelhante ao descrito anteriormente.



**Figura 32** - Componente  $\sigma_\theta$  das tensões residuais fazendo variar as propriedades do aço com a temperatura.

Relativamente à componente  $\sigma_\theta$ , pela observação do gráfico da Figura 32, percebe-se facilmente que até à profundidade de cerca de 0.6mm as três propriedades ( $\nu, \alpha$  e  $E$ ) são responsáveis pela formação de tensões residuais de tracção. Para valores superiores de profundidade, até cerca de 1,5mm, o módulo de Young e o coeficiente de Poisson induzem na peça tensões de compressão. Acontece o mesmo com o coeficiente de dilatação térmica mas para valores mais baixos de tensão. Verifica-se que a conjugação das três propriedades tem uma influência semelhante à do coeficiente de dilatação térmica. Para profundidades superiores a 2mm todas as curvas tendem para tensões residuais nulas. Os valores das tensões residuais representados graficamente nesta fase encontram-se tabelados no Anexo 1.

Numa segunda fase estudou-se o efeito das propriedades do alumínio, considerando, para o aço, propriedades mais aferidas que no caso anterior, propriedades estas que foram retiradas da literatura de acordo com o capítulo 2.4 e mantidas fixas ao longo das análises numéricas. As propriedades consideradas para o aço foram, respectivamente, o coeficiente de Poisson, o coeficiente de dilatação térmica e o módulo de Young:

$$\nu = 0,3 \quad (9)$$

$$\alpha = (0,0060424 \times T + 11,418) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

$$E = (-0,0789 \times T + 211,58) \times 10^9 \quad (11)$$

Nesta fase considerou-se que o aço não tinha qualquer deformação plástica. No caso do alumínio fixou-se o coeficiente de Poisson e fizeram-se variar o coeficiente de dilatação térmica e o módulo de Young. Para além disso estudou-se o comportamento da sua curva tensão-deformação com a variação da temperatura. Para o efeito consideraram-se os seguintes valores e as seguintes expressões:

$$\nu = 0,345 \quad (12)$$

$$\alpha = 10^{-8} \times T + 2,4 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C} \quad (13)$$

$$E = 70000 \times 10^6 \times (-0,0018 \times T + 0,9697) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sigma = & 0,5 \times 436,41 \times 10^6 \times (0,003379 + T)^{0,11} \times (9,48011 \times \\ & 10^{-11} \times T^4) - (7,928137 \times 10^{-8} \times T^3) + (1,390199 \times \\ & \times 10^{-5} \times T^2) - (8,652393 \times 10^{-4} \times T) + \\ & 1,01236, \end{aligned} \quad (15)$$

A influência da variação das propriedades termo-mecânicas do alumínio com a temperatura é ilustrada graficamente nas Figuras 33, 34 e 35 para as mesmas três componentes das tensões residuais,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$ .

Numa primeira análise do gráfico da Figura 33 verifica-se que a variação da curva tensão-deformação com a temperatura, assim como o coeficiente de dilatação térmica, induzem tensões residuais de compressão à superfície, sendo a última a propriedade que mais tensões induz na peça.

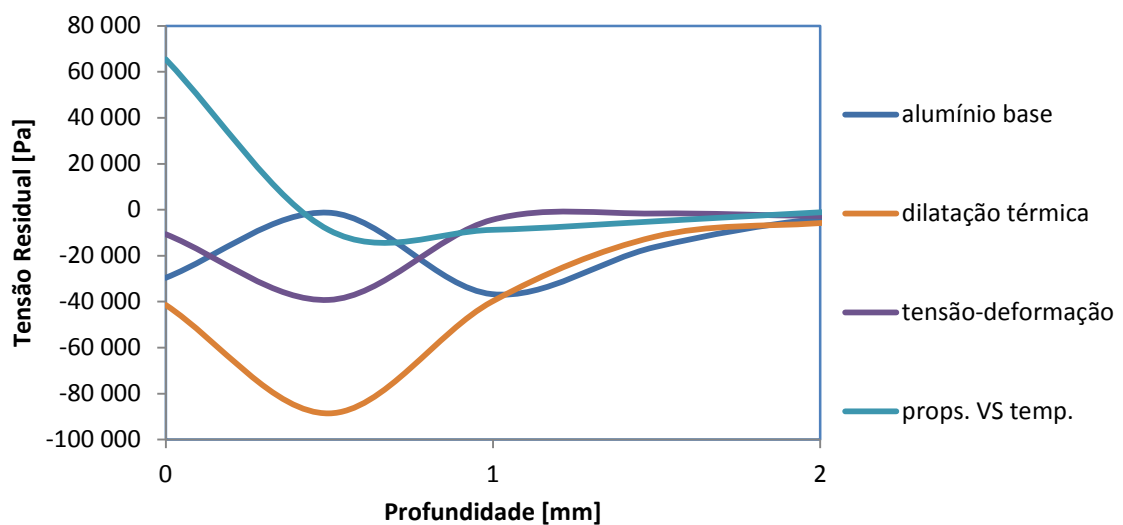


Figura 33 - Componente  $\sigma_z$  das tensões residuais fazendo variar as propriedades do alumínio com a temperatura.

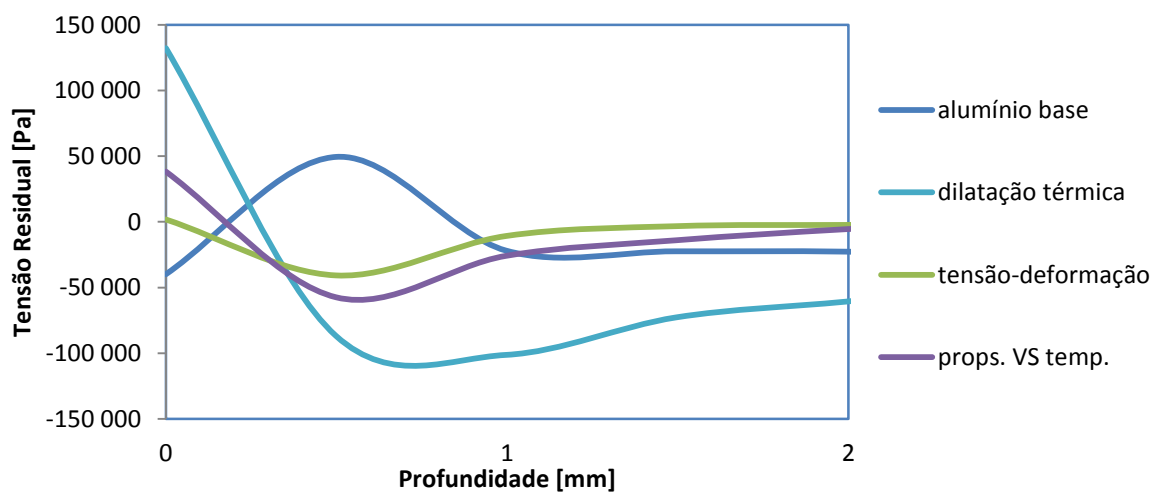
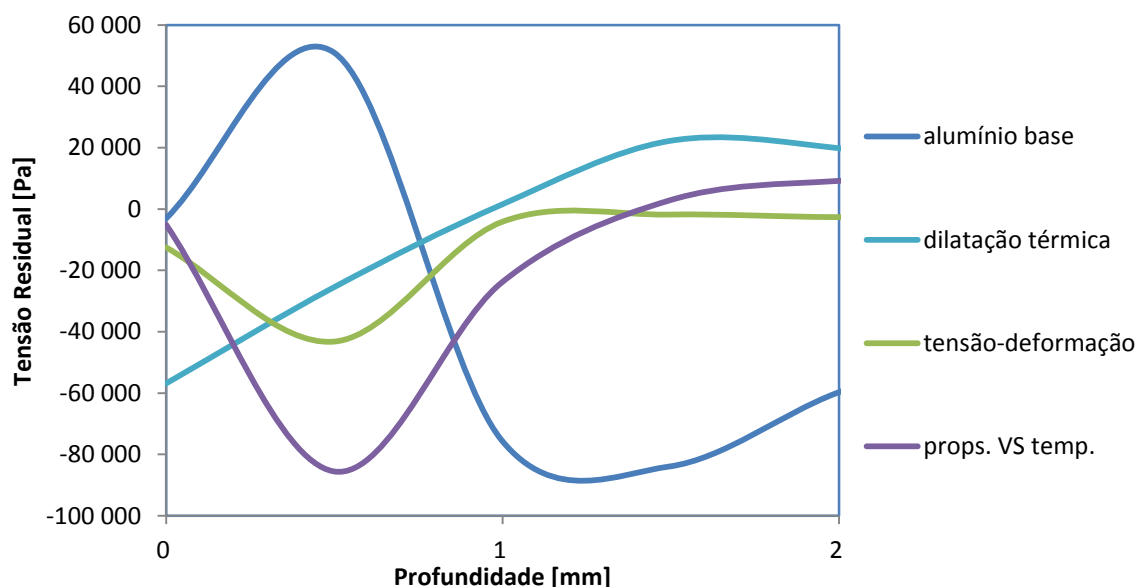


Figura 34 - Componente  $\sigma_r$  das tensões residuais fazendo variar as propriedades do alumínio com a temperatura.

O gráfico da Figura 34 mostra que o coeficiente de dilatação térmica, ao variar com a temperatura, é a propriedade que maiores tensões residuais provoca (tensões de compressão). Quando se fazem variar a curva tensão-deformação e o coeficiente de dilatação térmica, formam-se igualmente tensões de compressão.



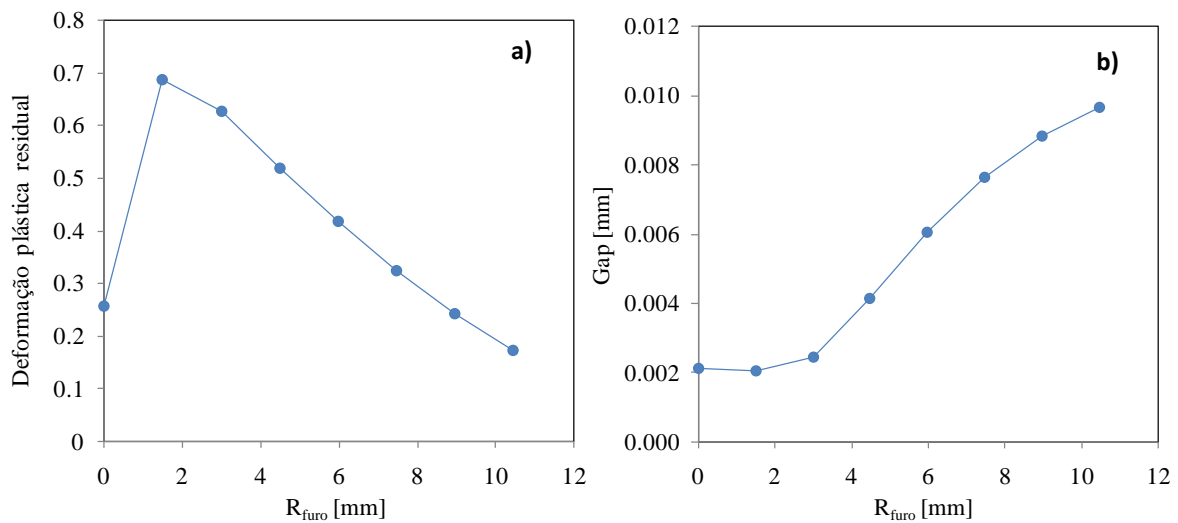
**Figura 35** - Componente  $\sigma_\theta$  das tensões residuais fazendo variar as propriedades do alumínio com a temperatura.

A componente  $\sigma_\theta$  é a que apresenta, das três analisadas até agora, resultados mais díspares. Verifica-se a formação de tensões residuais de compressão de maior magnitude. A variação da curva tensão-deformação com a temperatura provoca também tensões de compressão. O coeficiente de dilatação térmica induz tensões residuais de compressão à superfície anulando-se, no entanto, para a profundidade de cerca de 0,9mm. Os valores da tensão residual representados graficamente nesta fase encontram-se tabelados no Anexo 2.

Para além desta análise, foi também feito um estudo para averiguar o efeito de considerar um furo central no cilindro de alumínio. O objectivo era tentar perceber se o furo permitiria uma maior dilatação do alumínio e, assim, uma maior geração de tensões residuais. Fez-se variar o raio do furo desde zero até 10.5mm, sendo os resultados apresentados na Figura 36. Na figura da esquerda (Figura 36.a) podem ver-se as deformações plásticas máximas. Um furo não muito grande é vantajoso em termos de



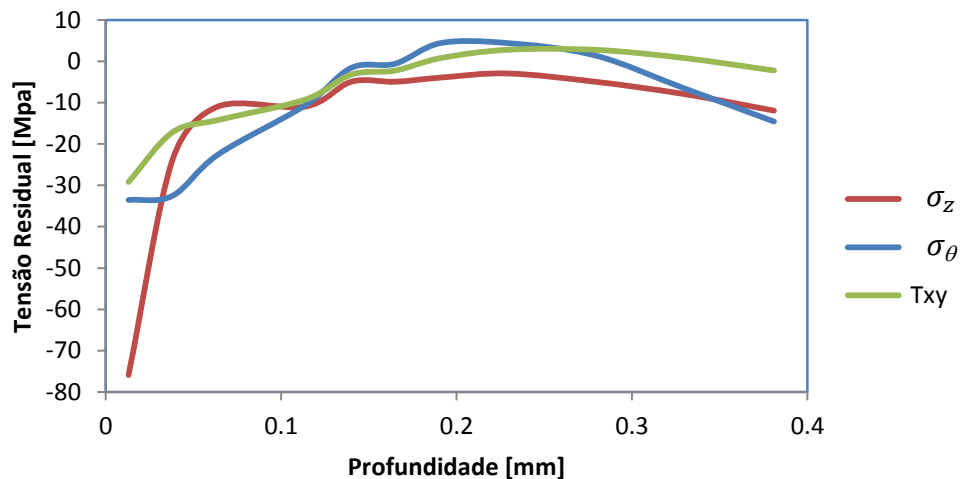
geração de tensões residuais. O *gap*, isto é, a diferença entre a peça em aço e a peça em alumínio após arrefecimento, aumenta com o diâmetro do furo (Figura 36.b).



**Figura 36** - Efeito de considerar um furo no disco de alumínio. Deformação plástica residual **a)**; diferença entre a peça em aço e a peça em alumínio após arrefecimento (*gap*) **b)**.

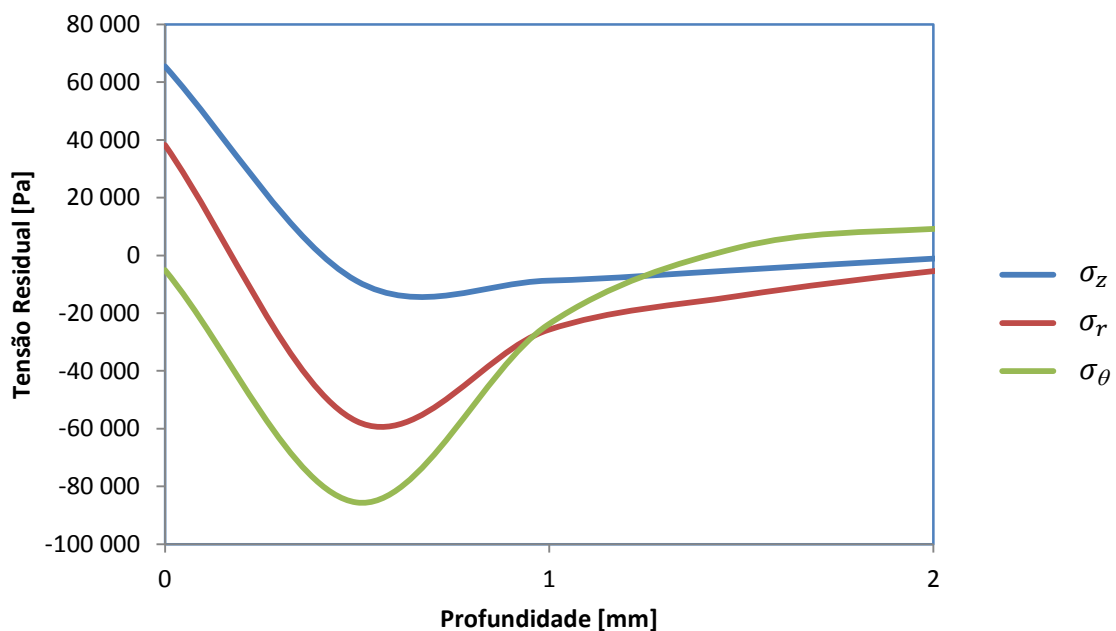
### 4.3. Previsões numéricas vs Resultados experimentais

Neste capítulo é feita a comparação dos resultados numéricos e dos resultados experimentais para as componentes  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\tau_{xy}$  induzidas pelo ciclo térmico. As comparações são feitas para a mesma profundidade. Para além disso mostra-se a distribuição das três componentes das tensões residuais ao longo do provete de alumínio (Figura 39).



**Figura 37** - Gráfico representativo das tensões residuais  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\tau_{xy}$  resultantes do ensaio experimental, induzidas pelo ciclo-térmico.

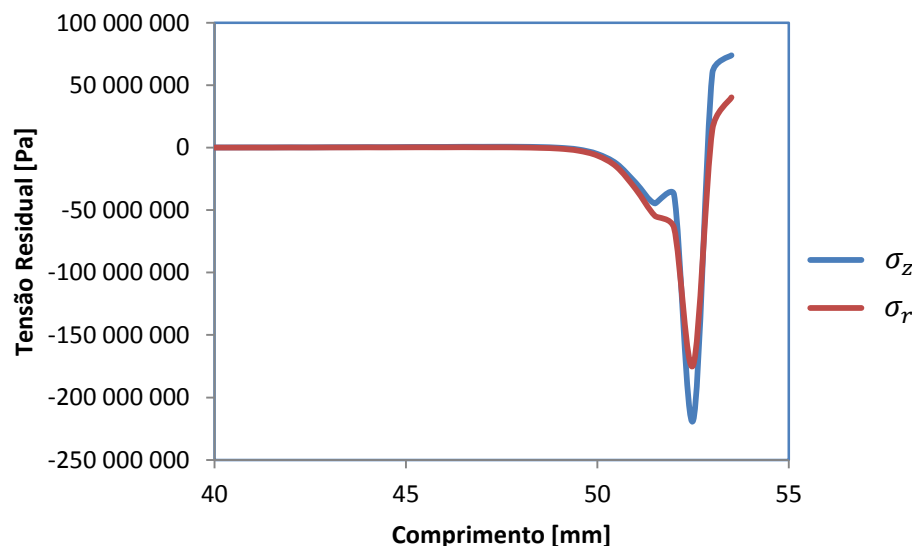
Da análise do gráfico da Figura 37 é possível observar que as três componentes das tensões residuais obtidas no ensaio experimental são de compressão à superfície e, para uma profundidade de aproximadamente 0.2mm, têm valores próximos de zero. Notar que se considerou um valor médio para as tensões de referência, obtidas no extensómetro 3.



**Figura 38** Gráfico representativo das tensões residuais  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  resultantes do ensaio numérico em função da profundidade.

No caso das tensões residuais resultantes da simulação numérica (Figura 38), verifica-se que as componentes  $\sigma_z$  e  $\sigma_r$  são de tracção à superfície, passando a tensões de

compressão para valores de 0.2mm e 0.4mm, respectivamente. No caso da componente  $\sigma_\theta$ , é sempre de compressão.



**Figura 39** Gráfico representativo das tensões residuais  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  resultantes do ensaio numérico em função do comprimento.

Pelo gráfico da Figura 39, concluímos que as tensões residuais obtidas no ensaio numérico são bastante elevadas na extremidade direita deste. Estas tensões formam-se precisamente na zona do provete que não foi restringida no modelo numérico.

Terminada a análise gráfica dos resultados numéricos e experimentais, verifica-se que, fazendo variar as propriedades do alumínio com a temperatura e para a mesma profundidade, os modelos numérico e experimental revelam na sua maioria tensões residuais de compressão abaixo da superfície do material, embora este último apresente valores de ordem superior, não permitindo assim a total validação do modelo numérico. Posto isto, discutem-se de seguida os dois processos com o objectivo de melhor clarificar os resultados obtidos.

#### 4.4. Discussão de Resultados

O trabalho apresentado assenta numa componente teórica e prática e, como tal, é importante que se confronte com a parte experimental de modo a que a componente

teórica seja validada. O ideal seria portanto que, em qualquer trabalho deste cariz, os resultados experimentais fossem de encontro aos resultados numéricos, o que nem sempre é possível. No caso presente, expectava-se que os resultados numéricos e experimentais fossem semelhantes e coerentes o que não aconteceu. Obtiveram-se resultados coerentes nas duas componentes, prática e numérica, embora essa coerência não se tivesse verificado totalmente entre eles, tendo-se efectuado porém, todos os esforços no sentido de replicar o mais fielmente possível o processo experimental. A incoerência entre os dois processos verifica-se, essencialmente, na ordem de grandeza das tensões residuais. Verifica-se que no modelo numérico estas são substancialmente inferiores às obtidas no modelo experimental. Porém, em ambos os casos resultam maioritariamente tensões residuais de compressão, o que resulta de deformações de tracção à superfície induzidas pelos processos de maquinagem e ciclo-térmico. Caso as tensões à superfície fossem de compressão, aconselha-se que se sujeitem as peças a tratamento para alívio de tensões residuais. Nos casos em que as peças são sujeitas a carregamentos elevados, aconselha-se o tratamento térmico para indução de tensões residuais de compressão à superfície. As tensões de compressão induzidas por este tratamento térmico nas peças são benéficas para estas dado que propiciam o fecho das fendas, o que se traduz num prolongamento da vida da peça à fadiga. O aparecimento de tensões de corte nos resultados experimentais levanta algumas dúvidas, isto porque o ciclo térmico não induz tensões de corte.

A análise das tensões de contacto (Figura 40) revela tensões de contacto máximas (100MPa) para uma temperatura de cerca de 220°C. Para a temperatura máxima, 450°C, onde a tensão de cedência do alumínio é mais baixa, as tensões de contacto são relativamente baixas, cerca de 13MPa. Para esta temperatura, o módulo de Young e a tensão de cedência são mínimos, enquanto  $\alpha$  é máximo, devido ao seu aumento com a temperatura. Caso as tensões de contacto máximas coincidissem com a temperatura máxima (isto é, com a tensão de cedência mínima), seria de esperar a formação de mais tensões residuais. Isto não acontece devido à variação das curvas tensão-deformação com a temperatura.

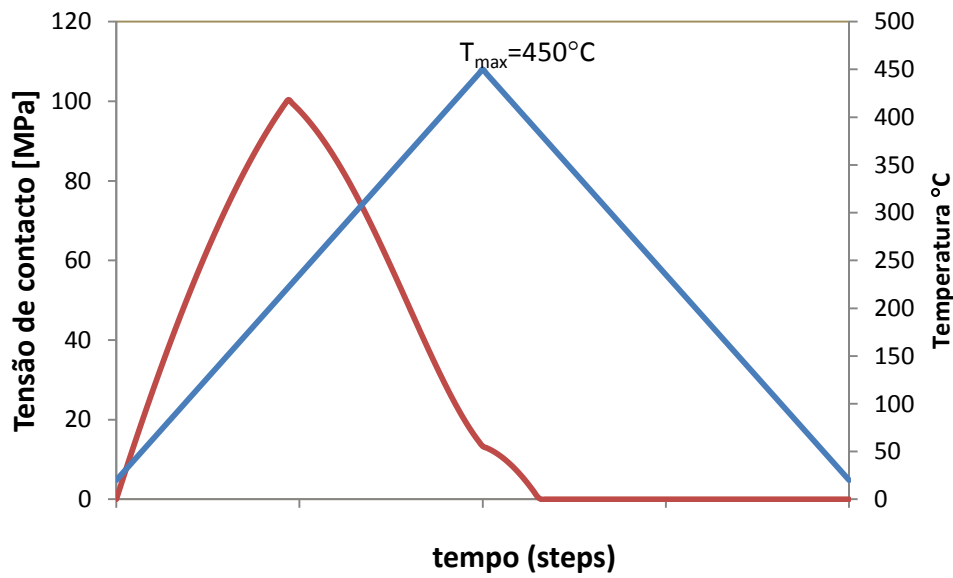


Figura 40 – Tensões de contacto na interface aço-alumínio.

O constrangimento lateral hipotético do alumínio revela formação de tensões residuais da ordem de 1MPa (Figura 41).

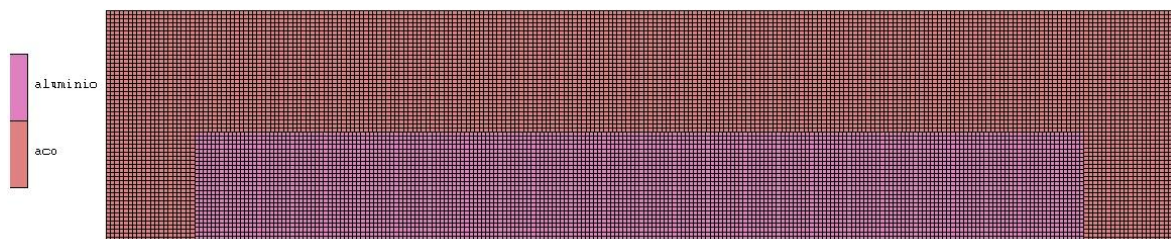


Figura 41 – Alumínio constrangido lateralmente.

Relativamente à formação de tensões residuais elevadas na extremidade direita do provete de alumínio, estas formam-se precisamente na zona do provete que não foi restringida (Figura 42), tal como referido anteriormente.

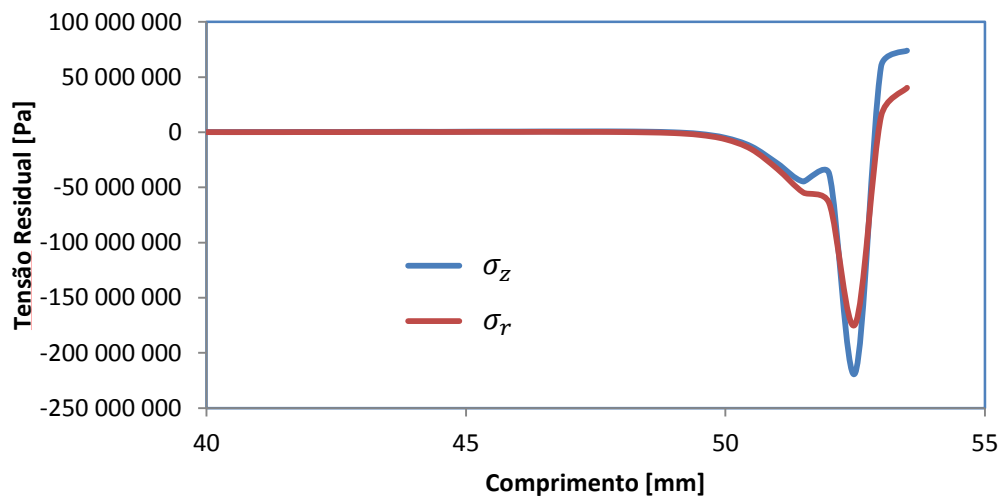


Figura 42 – Tensões residuais na extremidade direita do provete de alumínio.

Existe, porém, dilatação nas duas direcções,  $x$  e  $y$ , por parte do alumínio mas, no entanto, esta é impedida pelo bordo de aço segundo a direcção  $y$  (Figura 43), daí a formação de tensões residuais.

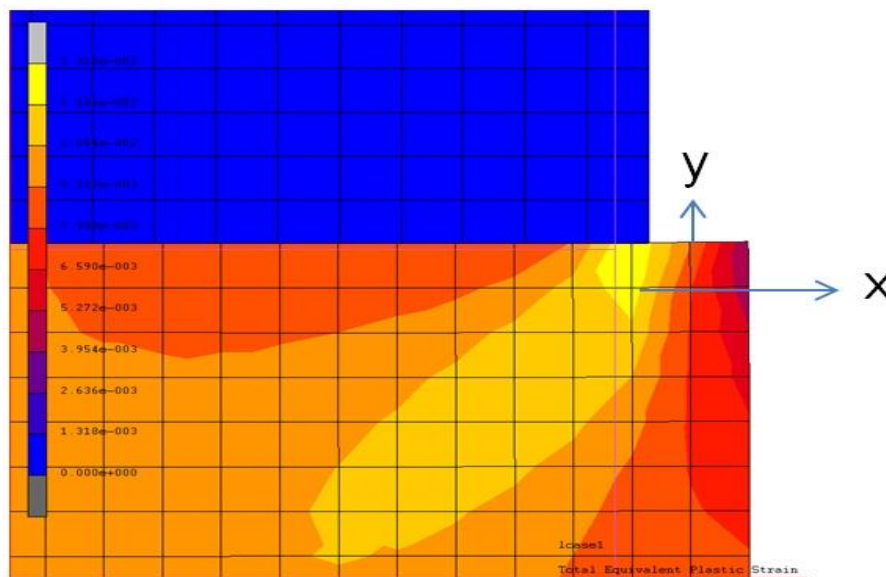


Figura 43 – Dilatação do alumínio nas direcções  $x$  e  $y$ .

É também de referir a grande complexidade do programa de elementos finitos Marc-Mentat 2010, não obstante as suas enormes potencialidades, o que resultou nalgumas dificuldades sentidas durante o processo de aprendizagem, nomeadamente o desenho da geometria e malha das peças, a introdução de condições de fronteira, propriedades dos

materiais utilizados sob a forma de valores e de equações, bem como o processo iterativo e obtenção de resultados.

Discutidos os resultados, seguem-se possíveis justificações para a incoerência entre ambos os modelos bem como propostas para trabalhos futuros.

A componente experimental é um processo bastante meticuloso e rigoroso dado que se trabalha com componentes muito pequenos que requerem grande precisão aquando da sua instalação. Posto isto, é possível que os extensómetros possam ter sido danificados (pela elevada temperatura do ferro de soldar, por exemplo), causando danos imperceptíveis a uma escala macroscópica. É também possível que o equipamento de furação não estivesse 100% calibrado de modo a realizar a furação exactamente no centro dos extensómetros, embora a escala do monóculo estivesse perfeitamente alinhada com o seu centro, antes da furação. Outra hipótese a equacionar é a influência da rugosidade do material, causada pelo processo de maquinagem, na colagem dos extensómetros, dado que estes são extremamente pequenos e, para além disso, colaram-se numa superfície curva. O ideal seria terem sido colados numa superfície plana, hipótese descartada logo à partida dado que o provete de alumínio possui a forma cilíndrica. Por fim, pode considerar-se a hipótese de o processo de furação ter induzido no material tensões residuais “extra” dado que a fresa roda a alta rotação e, em contacto com o material a furar, gera bastante calor.

Relativamente à parte numérica são várias as hipóteses a considerar. Em primeiro lugar considerou-se que as peças estavam em perfeito contacto, não se contabilizando a rugosidade dos materiais, logo não se considerando o *gap* entre elas. Considerou-se também que o aquecimento das peças foi feito de modo uniforme, o que na prática não acontece. Para além disso o programa de elementos finitos considera que os materiais possuem uma estrutura homogénea, o que não se verifica na realidade dado que, como analisado inicialmente, processos de fabricação, tratamentos térmicos entre outros factores, induzem heterogeneidades na rede cristalina dos materiais. O modelo numérico de simulação utilizado não tem a capacidade de contabilizar os três factores atrás mencionados.

De forma a melhorar os resultados obtidos em trabalhos futuros sugere-se um cuidado extra aquando da instalação dos extensómetros bem como, sempre que possível, proceder-se à sua instalação em superfícies planas. Recomenda-se também uma rigorosa calibração de todos os equipamentos a usar, assim como uma cuidada manipulação de

todos os equipamentos. É também de extrema importância respeitar as normas relativas ao processo de furação, em especial os incrementos de profundidade visto que, se estes não forem respeitados, podem induzir tensões residuais aquando deste processo.



## 5. CONCLUSÕES

Após a obtenção dos resultados, tanto numéricos como experimentais, é de extrema importância apresentar as principais conclusões:

- ✓ Foi desenvolvido um estudo experimental para obtenção de tensões residuais de origem térmica e de maquinagem num provete cilíndrico em alumínio, tendo as medições sido feitas recorrendo ao método do furo. As tensões de maquinagem apresentaram um comportamento oscilatório em espessura. As tensões residuais de origem térmica são de compressão à superfície, sendo de -75, -33 e -29 MPa, para as componentes  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\tau_{xy}$ , respectivamente.
- ✓ Foi desenvolvido um modelo numérico axissimétrico bidimensional para previsão das tensões residuais de origem térmica;
- ✓ Foi feito um estudo de sensibilidade relativamente às propriedades, tendo-se observado que a propriedade do aço mais relevante para as tensões residuais do alumínio é o coeficiente de dilatação térmica;
- ✓ Os resultados experimentais levantam algumas dúvidas devido ao comportamento oscilatório do extensómetro 3 e também devido ao aparecimento de tensões de corte devidas ao ciclo térmico (estas deveriam ser nulas);
- ✓ Verifica-se incoerência de resultados entre as componentes numérica e experimental;
- ✓ Verifica-se uma inferior ordem de grandeza nos resultados numéricos, relativamente à dos ensaios experimentais;

- ✓ É fundamental incluir nos modelos numéricos as propriedades dependentes da temperatura, uma vez que provocam um grande efeito nas tensões residuais obtidas.
  
- ✓ Foi feita uma breve introdução relativamente à influência das tensões residuais de origem térmica na vida de peças à fadiga. Dado que este tema não foi muito desenvolvido/aprofundado, apresenta-se como uma proposta de trabalhos futuros.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Capítulo 2 – Tensões Residuais.* (s.d.). Fonte: [www.scribd.com/doc/44012680/Métodos-Tens\\_Resid](http://www.scribd.com/doc/44012680/Métodos-Tens_Resid)
- Capítulo 3 - Caracterização do Material a Temperaturas Elevadas.* (s.d.). Fonte: [www.ipb.pt](http://www.ipb.pt)
- Costa, E. M. (s.d.). DEM/PUCRS.
- D.N. Travessa, M. F. (s.d.). Junção por difusão em estado sólido de AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/aço inoxidável AISI 304, com intercadas de alívio de tensões residuais. *Cerâmica - Solid state diffusion bondin...*
- F.V. Antunes, J. C. (Junho 2008). *Projecto Pocti/Eme/55918/2004, “A Soldadura Por Deposição Laser – Uma Ferramenta De Reparação De Moldes”.*
- L-E Lindgren, H. R. (1999). *Simulation of Multipass Welding of a thick plate.*
- Long, X. (2005). *Finite element analysis of residual stress generation during spot welding and its effect on fatigue behaviour of spot welded joints.* University of Missouri, Columbia.
- Modenesil, P. J. (Maio de 2008.). *Efeitos Mecânicos do ciclo Térmico.* Universidade Federal de Minas Gerais, Dep. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.
- Pentti Mäkeläinen, J. O. ( 1998.). Fire design model for structural steel S420M based upon transient-state test. *Journal of Constructional Steel Research 48.*
- Ribeiro, J. C. (2010). *Análise de Tensões Residuais e Deformações em Soldadura, Dissertação / Tese de Mestrado em Engenharia da Soldadura.* Monte da Caparica.
- Schmidt, V. F. (s.d.). *A Influência do Processo de Fabricação na Performance Estrutural de Componentes Fundidos Otimizados.* MAGMA.
- T.B. Brown, T. D.–8. (2006). *Predictions and measurements of residual stress in repair welds in plates.* International Journal of Pressure Vessels and Piping 83.
- Tensões Residuais em Tratamentos Térmicos.* (s.d.). Fonte: [www.bf.no.sapo.pt/ttm/ttool3-1](http://www.bf.no.sapo.pt/ttm/ttool3-1)
- Tetyana Gurova, F. Q. (s.d.). *Monitoramento do Estado das Tensões Residuais Durante a Fabricação de Navios.*
- Z Hou, I.-S. K. (2007). *Finite element analysis for the mechanical features of resistance spot welding process.* Journal of Materials Processing Technology.

## 7. ANEXO 1 -EFEITO DA VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AÇO COM A TEMPERATURA

Tabela 5 Aço base

Profundidade [mm]	$\sigma_z$ [Pa]	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$ [Pa]	$\tau_{xy}$ [Pa]
0.00E+00	-2.46E+04	-3.51E+04	4.14E+03	-2.95E+04
4.98E-01	-2.14E+03	4.75E+04	4.82E+04	-1.92E+04
9.96E-01	-3.71E+04	-2.50E+04	-8.31E+04	-9.27E+03
1.49E+00	-1.44E+04	-2.30E+04	-8.56E+04	6.47E+03
1.99E+00	-3.03E+03	-2.46E+04	-5.65E+04	1.54E+04
2.49E+00	-1.50E+03	-2.86E+04	-3.68E+04	1.35E+04
2.99E+00	-2.85E+02	-2.71E+04	-2.48E+04	8.60E+03
3.49E+00	6.01E+02	-2.35E+04	-1.85E+04	4.42E+03
3.98E+00	6.88E+02	-2.05E+04	-1.57E+04	1.63E+03
4.48E+00	1.13E+02	-1.87E+04	-1.46E+04	-1.33E+02
4.98E+00	-7.63E+02	-1.80E+04	-1.43E+04	-1.23E+03
5.48E+00	-1.65E+03	-1.79E+04	-1.41E+04	-1.85E+03
5.98E+00	-2.41E+03	-1.83E+04	-1.38E+04	-2.08E+03
6.48E+00	-3.02E+03	-1.87E+04	-1.33E+04	-1.96E+03
6.97E+00	-3.53E+03	-1.91E+04	-1.30E+04	-1.52E+03
7.47E+00	-4.00E+03	-1.95E+04	-1.28E+04	-8.66E+02
7.97E+00	-4.49E+03	-1.97E+04	-1.28E+04	-9.63E+01
8.47E+00	-5.06E+03	-1.98E+04	-1.32E+04	6.71E+02
8.97E+00	-5.72E+03	-1.99E+04	-1.39E+04	1.33E+03
9.46E+00	-6.46E+03	-2.00E+04	-1.48E+04	1.83E+03
9.96E+00	-7.24E+03	-2.00E+04	-1.58E+04	2.10E+03
1.05E+01	-8.03E+03	-2.01E+04	-1.69E+04	2.16E+03
1.10E+01	-8.75E+03	-2.01E+04	-1.80E+04	2.02E+03
1.15E+01	-9.36E+03	-2.02E+04	-1.89E+04	1.70E+03
1.20E+01	-9.78E+03	-2.02E+04	-1.95E+04	1.26E+03
1.25E+01	-9.85E+03	-2.00E+04	-1.97E+04	7.96E+02
1.30E+01	-1.04E+04	-2.04E+04	-2.04E+04	9.87E+02

**Tabela 6** Variação da tensão residual com o coeficiente de dilatação térmica.

<b>Profundidade [mm]</b>	<b><math>\sigma_z</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_r</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_\theta</math>[Pa]</b>	<b><math>\tau_{xy}</math>[Pa]</b>
0.00E+00	-4.22E+04	-5.60E+04	-3.85E+04	2.62E+03
4.98E-01	3.36E+04	4.72E+04	6.54E+04	-1.20E+04
9.96E-01	-7.45E+02	1.83E+04	2.15E+04	-1.90E+04
1.49E+00	-1.76E+04	-6.03E+03	-2.85E+04	-1.49E+04
1.99E+00	-9.74E+03	-4.58E+03	-3.59E+04	-5.84E+03
2.49E+00	-4.55E+03	-5.79E+03	-3.10E+04	9.91E+02
2.99E+00	-3.28E+03	-8.98E+03	-2.55E+04	3.54E+03
3.49E+00	-3.05E+03	-1.09E+04	-2.09E+04	3.71E+03
3.98E+00	-3.07E+03	-1.16E+04	-1.74E+04	3.09E+03
4.48E+00	-3.09E+03	-1.17E+04	-1.45E+04	2.41E+03
4.98E+00	-2.98E+03	-1.16E+04	-1.19E+04	1.90E+03
5.48E+00	-2.69E+03	-1.13E+04	-9.44E+03	1.64E+03
5.98E+00	-2.26E+03	-1.10E+04	-7.13E+03	1.58E+03
6.48E+00	-1.80E+03	-1.04E+04	-5.16E+03	1.69E+03
6.97E+00	-1.40E+03	-9.78E+03	-3.65E+03	1.85E+03
7.47E+00	-1.16E+03	-9.09E+03	-2.69E+03	2.00E+03
7.97E+00	-1.13E+03	-8.42E+03	-2.27E+03	2.08E+03
8.47E+00	-1.31E+03	-7.85E+03	-2.32E+03	2.05E+03
8.97E+00	-1.68E+03	-7.42E+03	-2.72E+03	1.92E+03
9.46E+00	-2.18E+03	-7.13E+03	-3.37E+03	1.71E+03
9.96E+00	-2.75E+03	-6.99E+03	-4.13E+03	1.46E+03
1.05E+01	-3.35E+03	-6.95E+03	-4.92E+03	1.20E+03
1.10E+01	-3.90E+03	-6.98E+03	-5.65E+03	9.39E+02
1.15E+01	-4.37E+03	-7.04E+03	-6.26E+03	7.02E+02
1.20E+01	-4.70E+03	-7.08E+03	-6.70E+03	4.93E+02
1.25E+01	-4.82E+03	-7.02E+03	-6.88E+03	3.44E+02
1.30E+01	-5.10E+03	-7.21E+03	-7.21E+03	7.06E+02

**Tabela 7** Variação da tensão residual com o coeficiente de Poisson.

<b>Profundidade [mm]</b>	<b><math>\sigma_z</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_r</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_\theta</math>[Pa]</b>	<b><math>\tau_{xy}</math>[Pa]</b>
0.00E+00	-2.46E+04	-3.52E+04	4.05E+03	-2.95E+04
4.98E-01	-1.97E+03	4.76E+04	4.82E+04	-1.92E+04
9.96E-01	-3.70E+04	-2.49E+04	-8.32E+04	-9.23E+03
1.49E+00	-1.45E+04	-2.31E+04	-8.57E+04	6.54E+03
1.99E+00	-3.08E+03	-2.47E+04	-5.66E+04	1.55E+04
2.49E+00	-1.53E+03	-2.87E+04	-3.67E+04	1.36E+04
2.99E+00	-2.89E+02	-2.71E+04	-2.48E+04	8.63E+03
3.49E+00	6.13E+02	-2.35E+04	-1.84E+04	4.42E+03
3.98E+00	7.08E+02	-2.05E+04	-1.56E+04	1.61E+03
4.48E+00	1.34E+02	-1.87E+04	-1.46E+04	-1.58E+02
4.98E+00	-7.47E+02	-1.79E+04	-1.43E+04	-1.26E+03
5.48E+00	-1.64E+03	-1.79E+04	-1.40E+04	-1.89E+03
5.98E+00	-2.41E+03	-1.82E+04	-1.37E+04	-2.12E+03
6.48E+00	-3.03E+03	-1.87E+04	-1.33E+04	-2.00E+03
6.97E+00	-3.53E+03	-1.91E+04	-1.30E+04	-1.57E+03
7.47E+00	-4.00E+03	-1.95E+04	-1.28E+04	-9.06E+02
7.97E+00	-4.50E+03	-1.97E+04	-1.28E+04	-1.33E+02
8.47E+00	-5.07E+03	-1.98E+04	-1.32E+04	6.39E+02
8.97E+00	-5.73E+03	-1.99E+04	-1.39E+04	1.31E+03
9.46E+00	-6.47E+03	-2.00E+04	-1.48E+04	1.80E+03
9.96E+00	-7.25E+03	-2.00E+04	-1.58E+04	2.09E+03
1.05E+01	-8.04E+03	-2.01E+04	-1.69E+04	2.15E+03
1.10E+01	-8.76E+03	-2.01E+04	-1.80E+04	2.01E+03
1.15E+01	-9.36E+03	-2.02E+04	-1.89E+04	1.70E+03
1.20E+01	-9.79E+03	-2.02E+04	-1.95E+04	1.26E+03
1.25E+01	-9.86E+03	-2.00E+04	-1.97E+04	7.94E+02
1.30E+01	-1.04E+04	-2.04E+04	-2.04E+04	9.87E+02

**Tabela 8** Variação da tensão residual com o módulo de Young.

<b>Profundidade [mm]</b>	<b><math>\sigma_z</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_r</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_\theta</math>[Pa]</b>	<b><math>\tau_{xy}</math>[Pa]</b>
0.00E+00	-2.11E+04	-3.27E+04	7.43E+03	-2.92E+04
4.98E-01	-3.65E+03	4.50E+04	4.80E+04	-1.87E+04
9.96E-01	-3.60E+04	-2.47E+04	-7.88E+04	-9.47E+03
1.49E+00	-1.25E+04	-2.16E+04	-8.19E+04	5.71E+03
1.99E+00	-1.75E+03	-2.29E+04	-5.54E+04	1.44E+04
2.49E+00	-1.06E+03	-2.74E+04	-3.73E+04	1.30E+04
2.99E+00	-4.34E+02	-2.67E+04	-2.59E+04	8.37E+03
3.49E+00	2.13E+02	-2.36E+04	-1.96E+04	4.35E+03
3.98E+00	2.70E+02	-2.08E+04	-1.66E+04	1.59E+03
4.48E+00	-2.60E+02	-1.91E+04	-1.53E+04	-1.68E+02
4.98E+00	-1.08E+03	-1.84E+04	-1.48E+04	-1.26E+03
5.48E+00	-1.92E+03	-1.83E+04	-1.45E+04	-1.86E+03
5.98E+00	-2.63E+03	-1.86E+04	-1.40E+04	-2.06E+03
6.48E+00	-3.20E+03	-1.91E+04	-1.35E+04	-1.89E+03
6.97E+00	-3.67E+03	-1.95E+04	-1.31E+04	-1.41E+03
7.47E+00	-4.11E+03	-1.98E+04	-1.29E+04	-7.16E+02
7.97E+00	-4.59E+03	-2.00E+04	-1.29E+04	8.36E+01
8.47E+00	-5.14E+03	-2.02E+04	-1.33E+04	8.68E+02
8.97E+00	-5.79E+03	-2.02E+04	-1.40E+04	1.54E+03
9.46E+00	-6.52E+03	-2.02E+04	-1.49E+04	2.02E+03
9.96E+00	-7.31E+03	-2.03E+04	-1.60E+04	2.28E+03
1.05E+01	-8.09E+03	-2.03E+04	-1.71E+04	2.32E+03
1.10E+01	-8.82E+03	-2.04E+04	-1.82E+04	2.15E+03
1.15E+01	-9.43E+03	-2.04E+04	-1.91E+04	1.80E+03
1.20E+01	-9.86E+03	-2.04E+04	-1.98E+04	1.33E+03
1.25E+01	-9.93E+03	-2.02E+04	-2.00E+04	8.34E+02
1.30E+01	-1.05E+04	-2.06E+04	-2.06E+04	1.03E+03

**Tabela 9** Variação da tensão residual considerando o efeito das propriedades termo-mecânicas.

<b>Profundidade [mm]</b>	<b><math>\sigma_z</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_r</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_\theta</math>[Pa]</b>	<b><math>\tau_{xy}</math>[Pa]</b>
0.00E+00	-3.99E+04	-5.39E+04	-3.59E+04	2.59E+03
4.98E-01	3.30E+04	4.59E+04	6.47E+04	-1.17E+04
9.96E-01	-4.44E+02	1.77E+04	2.15E+04	-1.86E+04
1.49E+00	-1.68E+04	-5.97E+03	-2.82E+04	-1.44E+04
1.99E+00	-9.16E+03	-4.36E+03	-3.57E+04	-5.41E+03
2.49E+00	-4.32E+03	-5.80E+03	-3.10E+04	1.36E+03
2.99E+00	-3.28E+03	-9.18E+03	-2.55E+04	3.80E+03
3.49E+00	-3.13E+03	-1.11E+04	-2.09E+04	3.84E+03
3.98E+00	-3.18E+03	-1.18E+04	-1.73E+04	3.11E+03
4.48E+00	-3.21E+03	-1.19E+04	-1.44E+04	2.34E+03
4.98E+00	-3.12E+03	-1.17E+04	-1.18E+04	1.78E+03
5.48E+00	-2.84E+03	-1.15E+04	-9.30E+03	1.50E+03
5.98E+00	-2.41E+03	-1.11E+04	-6.97E+03	1.46E+03
6.48E+00	-1.94E+03	-1.05E+04	-4.98E+03	1.61E+03
6.97E+00	-1.53E+03	-9.89E+03	-3.45E+03	1.83E+03
7.47E+00	-1.27E+03	-9.18E+03	-2.48E+03	2.05E+03
7.97E+00	-1.22E+03	-8.49E+03	-2.05E+03	2.19E+03
8.47E+00	-1.39E+03	-7.89E+03	-2.09E+03	2.21E+03
8.97E+00	-1.73E+03	-7.42E+03	-2.50E+03	2.12E+03
9.46E+00	-2.21E+03	-7.10E+03	-3.14E+03	1.94E+03
9.96E+00	-2.77E+03	-6.91E+03	-3.91E+03	1.69E+03
1.05E+01	-3.35E+03	-6.83E+03	-4.69E+03	1.42E+03
1.10E+01	-3.88E+03	-6.83E+03	-5.42E+03	1.13E+03
1.15E+01	-4.33E+03	-6.86E+03	-6.03E+03	8.59E+02
1.20E+01	-4.66E+03	-6.88E+03	-6.47E+03	6.02E+02
1.25E+01	-4.77E+03	-6.80E+03	-6.66E+03	3.99E+02
1.30E+01	-5.05E+03	-6.98E+03	-6.98E+03	6.98E+02



## 8. ANEXO 2 - EFEITO DA VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO ALUMÍNIO COM A TEMPERATURA

Tabela 10 Alumínio base

Profundidade [mm]	$\sigma_z$ [Pa]	$\sigma_r$ [Pa]	$\sigma_\theta$ [Pa]	$\tau_{xy}$ [Pa]
0.00E+00	-2.96E+04	-3.98E+04	-3.10E+03	-2.86E+04
4.98E-01	-1.28E+03	4.95E+04	5.11E+04	-1.99E+04
9.96E-01	-3.67E+04	-2.18E+04	-7.52E+04	-1.26E+04
1.49E+00	-1.63E+04	-2.24E+04	-8.40E+04	1.71E+03
1.99E+00	-4.03E+03	-2.27E+04	-6.00E+04	1.12E+04
2.49E+00	-1.96E+03	-2.62E+04	-4.27E+04	1.13E+04
2.99E+00	-1.13E+03	-2.58E+04	-3.18E+04	7.92E+03
3.49E+00	-6.99E+02	-2.33E+04	-2.55E+04	4.50E+03
3.98E+00	-7.81E+02	-2.10E+04	-2.21E+04	1.90E+03
4.48E+00	-1.26E+03	-1.93E+04	-2.02E+04	5.18E+01
4.98E+00	-1.89E+03	-1.84E+04	-1.89E+04	-1.26E+03
5.48E+00	-2.45E+03	-1.81E+04	-1.78E+04	-2.14E+03
5.98E+00	-2.85E+03	-1.80E+04	-1.65E+04	-2.61E+03
6.48E+00	-3.10E+03	-1.80E+04	-1.52E+04	-2.68E+03
6.97E+00	-3.26E+03	-1.80E+04	-1.40E+04	-2.40E+03
7.47E+00	-3.41E+03	-1.79E+04	-1.30E+04	-1.86E+03
7.97E+00	-3.62E+03	-1.77E+04	-1.23E+04	-1.17E+03
8.47E+00	-3.95E+03	-1.74E+04	-1.20E+04	-4.40E+02
8.97E+00	-4.41E+03	-1.72E+04	-1.21E+04	2.18E+02
9.46E+00	-4.99E+03	-1.69E+04	-1.24E+04	7.38E+02
9.96E+00	-5.65E+03	-1.67E+04	-1.31E+04	1.08E+03
1.05E+01	-6.33E+03	-1.65E+04	-1.38E+04	1.24E+03
1.10E+01	-6.98E+03	-1.64E+04	-1.45E+04	1.24E+03
1.15E+01	-7.53E+03	-1.63E+04	-1.52E+04	1.08E+03
1.20E+01	-7.92E+03	-1.62E+04	-1.56E+04	8.31E+02
1.25E+01	-8.00E+03	-1.60E+04	-1.58E+04	5.57E+02
1.30E+01	-8.47E+03	-1.63E+04	-1.63E+04	8.43E+02

**Tabela 11** Variação da tensão residual com o coeficiente de dilatação térmica.

<b>Profundidade [mm]</b>	<b><math>\sigma_z</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_r</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_\theta</math>[Pa]</b>	<b><math>\tau_{xy}</math>[Pa]</b>
0.00E+00	-4.14E+04	1.32E+05	4.17E+04	-5.69E+04
4.98E-01	-8.86E+04	-8.68E+04	-2.06E+05	-2.56E+04
9.96E-01	-4.01E+04	-1.01E+05	-2.15E+05	1.37E+03
1.49E+00	-1.18E+04	-7.27E+04	-1.22E+05	2.22E+04
1.99E+00	-5.87E+03	-6.07E+04	-6.76E+04	1.99E+04
2.49E+00	-2.28E+03	-4.78E+04	-4.00E+04	1.07E+04
2.99E+00	7.85E+02	-3.57E+04	-2.60E+04	3.58E+03
3.49E+00	2.25E+03	-2.71E+04	-1.96E+04	-6.88E+02
3.98E+00	2.27E+03	-2.17E+04	-1.72E+04	-3.10E+03
4.48E+00	1.40E+03	-1.88E+04	-1.67E+04	-4.51E+03
4.98E+00	1.19E+02	-1.75E+04	-1.70E+04	-5.40E+03
5.48E+00	-1.25E+03	-1.72E+04	-1.75E+04	-5.96E+03
5.98E+00	-2.53E+03	-1.74E+04	-1.79E+04	-6.25E+03
6.48E+00	-3.66E+03	-1.79E+04	-1.81E+04	-6.25E+03
6.97E+00	-4.61E+03	-1.84E+04	-1.81E+04	-5.96E+03
7.47E+00	-5.41E+03	-1.89E+04	-1.79E+04	-5.40E+03
7.97E+00	-6.06E+03	-1.93E+04	-1.76E+04	-4.62E+03
8.47E+00	-6.62E+03	-1.95E+04	-1.74E+04	-3.71E+03
8.97E+00	-7.13E+03	-1.95E+04	-1.72E+04	-2.75E+03
9.46E+00	-7.59E+03	-1.95E+04	-1.72E+04	-1.86E+03
9.96E+00	-8.03E+03	-1.93E+04	-1.72E+04	-1.09E+03
1.05E+01	-8.45E+03	-1.92E+04	-1.74E+04	-4.90E+02
1.10E+01	-8.83E+03	-1.89E+04	-1.77E+04	-8.27E+01
1.15E+01	-9.14E+03	-1.87E+04	-1.79E+04	1.46E+02
1.20E+01	-9.33E+03	-1.85E+04	-1.81E+04	2.30E+02
1.25E+01	-9.24E+03	-1.81E+04	-1.80E+04	2.61E+02
1.30E+01	-9.76E+03	-1.85E+04	-1.85E+04	8.28E+02

**Tabela 12** Variação da tensão residual com a curva tensão-deformação

<b>Profundidade [mm]</b>	<b><math>\sigma_z</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_r</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_\theta</math>[Pa]</b>	<b><math>\tau_{xy}</math>[Pa]</b>
0.00E+00	-1.06E+04	1.80E+03	-1.25E+04	8.90E+03
4.98E-01	-3.92E+04	-4.07E+04	-4.32E+04	8.74E+02
9.96E-01	-4.44E+03	-1.08E+04	-4.29E+03	1.13E+03
1.49E+00	-1.64E+03	-3.26E+03	-1.82E+03	-1.12E+03
1.99E+00	-2.68E+03	-2.31E+03	-2.65E+03	-8.48E+02
2.49E+00	-2.61E+03	-1.82E+03	-2.18E+03	-6.08E+02
2.99E+00	-1.95E+03	-1.10E+03	-1.39E+03	-5.48E+02
3.49E+00	-1.22E+03	-4.03E+02	-6.81E+02	-5.76E+02
3.98E+00	-5.76E+02	1.65E+02	-1.33E+02	-6.32E+02
4.48E+00	-4.40E+01	6.30E+02	2.84E+02	-6.83E+02
4.98E+00	3.71E+02	1.00E+03	5.64E+02	-7.08E+02
5.48E+00	6.56E+02	1.28E+03	7.04E+02	-7.02E+02
5.98E+00	8.16E+02	1.45E+03	7.21E+02	-6.77E+02
6.48E+00	8.77E+02	1.52E+03	6.55E+02	-6.49E+02
6.97E+00	8.74E+02	1.53E+03	5.53E+02	-6.32E+02
7.47E+00	8.40E+02	1.48E+03	4.54E+02	-6.29E+02
7.97E+00	8.02E+02	1.41E+03	3.87E+02	-6.37E+02
8.47E+00	7.76E+02	1.33E+03	3.66E+02	-6.47E+02
8.97E+00	7.73E+02	1.26E+03	3.93E+02	-6.49E+02
9.46E+00	7.94E+02	1.19E+03	4.65E+02	-6.33E+02
9.96E+00	8.37E+02	1.15E+03	5.71E+02	-5.95E+02
1.05E+01	8.96E+02	1.13E+03	6.96E+02	-5.34E+02
1.10E+01	9.62E+02	1.12E+03	8.24E+02	-4.53E+02
1.15E+01	1.02E+03	1.12E+03	9.41E+02	-3.57E+02
1.20E+01	1.07E+03	1.12E+03	1.03E+03	-2.50E+02
1.25E+01	1.10E+03	1.11E+03	1.08E+03	-1.42E+02
1.30E+01	1.06E+03	1.06E+03	1.06E+03	-1.01E+02

**Tabela 13** Variação da tensão residual considerando o efeito das propriedades termo-mecânicas a variar com a temperatura.

<b>Profundidade [mm]</b>	<b><math>\sigma_z</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_r</math>[Pa]</b>	<b><math>\sigma_\theta</math>[Pa]</b>	<b><math>\tau_{xy}</math>[Pa]</b>
0.00E+00	6.55E+04	3.82E+04	-5.10E+03	2.52E+03
4.98E-01	-8.79E+03	-5.74E+04	-8.55E+04	6.03E+03
9.96E-01	-8.75E+03	-2.59E+04	-2.41E+04	1.22E+04
1.49E+00	-5.05E+03	-1.40E+04	2.76E+03	4.99E+03
1.99E+00	-1.18E+03	-5.56E+03	9.13E+03	-1.48E+03
2.49E+00	2.13E+03	6.36E+02	9.76E+03	-3.90E+03
2.99E+00	3.62E+03	3.28E+03	8.31E+03	-4.34E+03
3.49E+00	4.08E+03	3.89E+03	6.36E+03	-4.19E+03
3.98E+00	4.04E+03	3.62E+03	4.42E+03	-4.00E+03
4.48E+00	3.74E+03	3.00E+03	2.55E+03	-3.86E+03
4.98E+00	3.24E+03	2.20E+03	7.70E+02	-3.77E+03
5.48E+00	2.60E+03	1.31E+03	-9.01E+02	-3.69E+03
5.98E+00	1.87E+03	3.54E+02	-2.43E+03	-3.58E+03
6.48E+00	1.10E+03	-6.26E+02	-3.79E+03	-3.43E+03
6.97E+00	3.45E+02	-1.60E+03	-4.94E+03	-3.22E+03
7.47E+00	-3.62E+02	-2.54E+03	-5.87E+03	-2.95E+03
7.97E+00	-9.91E+02	-3.43E+03	-6.57E+03	-2.64E+03
8.47E+00	-1.52E+03	-4.23E+03	-7.05E+03	-2.29E+03
8.97E+00	-1.95E+03	-4.94E+03	-7.35E+03	-1.94E+03
9.46E+00	-2.28E+03	-5.54E+03	-7.49E+03	-1.59E+03
9.96E+00	-2.53E+03	-6.03E+03	-7.52E+03	-1.26E+03
1.05E+01	-2.70E+03	-6.42E+03	-7.49E+03	-9.63E+02
1.10E+01	-2.81E+03	-6.71E+03	-7.41E+03	-7.03E+02
1.15E+01	-2.89E+03	-6.92E+03	-7.33E+03	-4.80E+02
1.20E+01	-2.93E+03	-7.06E+03	-7.26E+03	-2.91E+02
1.25E+01	-2.95E+03	-7.13E+03	-7.20E+03	-1.21E+02
1.30E+01	-3.01E+03	-7.22E+03	-7.22E+03	1.15E+02