



• C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo Experimental e Numérico Sobre a Redistribuição de Tensões Residuais Devida à Remoção de Camadas de Material por Polimento Electroliítico

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

Autor

Cláudio Jorge Pires de Almeida

Orientadores

Professor Doutor António Adriano Castanhola Batista

Professor Doutor João Paulo da Silva Gil Nobre

Júri

Presidente Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor António Adriano Castanhola Batista
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Professor Doutor João Paulo da Silva Gil Nobre
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra
Professora Doutora Maria Augusta Neto
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra
Professor Doutor Luís Manuel de Jesus Coelho
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

Coimbra, Setembro, 2013

*A subtle thought that is in error may yet give rise to fruitful inquiry that can
establish truths of great value.*

ISAAC ASIMOV

Aos meus pais, irmã e avós.

Agradecimentos

Desejo expressar o meu sincero e profundo agradecimento a todos os que possibilitaram a realização deste trabalho e fizeram parte da minha vida ao longo destes anos de Faculdade. A todos vocês, muito obrigado.

Apesar de terem sido todos importantes, sinto a necessidade de salientar o apoio e incentivo daqueles que mais de perto me acompanharam neste trabalho:

Ao Professor Castanhola, orientador e uma das razões pela qual consegui realizar esta dissertação. Agradeço-lhe toda a disponibilidade que demonstrou e o apoio. Sem a sua orientação, o mundo das tensões residuais seria certamente bem mais complexo e não teria sido possível realizar esta dissertação.

Ao Professor Nobre, orientador e também umas das razões pela qual escolhi este tema. Agradeço-lhe especialmente a atenção e disponibilidade que demonstrou desde o início. Sem os seus *scripts*, teria de “ter partido muito mais pedra”. Sem o seu apoio e orientação não teria sido possível realizar esta dissertação.

Ao Professor Luís Coelho, pela disponibilidade que demonstrou e pelo uso incansável do corrector amarelo quando a corrida era contra o tempo, sem a sua ajuda esta dissertação não teria o verbo conjugado na forma impessoal e muitos dos capítulos estariam bem mais confusos.

Aos meus colegas de gabinete: Pedro Ramos, Diana Pita e João Martins.

Aos meus colegas de casa com uma especial referência à Ala Esquerda onde passei alguns dos melhores momentos da minha vida, aprendi e cresci muito.

A todos os meus amigos e em especial ao Miguel Santos e Bruno Quintino por fazerem parte do pequeno núcleo de amigos que levo *prá* vida, aos grandes momentos, jantares e tertúlias.

Last but not least, não podia deixar de expressar a minha mais profunda gratidão perante toda a minha família. Em particular aos meus pais e irmã, pelo apoio e esforço que fizeram. Agradeço também aos meus avós que me apoiaram incondicionalmente a todos os níveis. Este é um dos documentos mais importantes da minha vida e, portanto, gostaria de deixar aqui os vossos nomes: Alberto Almeida, Anabela

Pires, Carina Almeida, José Pires, Maria Olinda, Maria Selene e Alberto Almeida. Dedicamos esta dissertação.

O autor agradece ainda a Bolsa de Investigação concedida no âmbito do projecto PTDC/EME-TME/103845/2008, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do "Programa Operacional Factores de Competitividade (COMPETE)" e por fundos nacionais da "Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT)".

Resumo

A simulação numérica de processos físicos com base no método dos elementos finitos assume hoje um papel preponderante nas áreas tecnológicas. Assim sendo, depara-se com uma nova abordagem na resolução de problemas, especialmente quando estes apresentam alguma complexidade. Este tipo de abordagem numérica vem então colmatar a dificuldade inerente ao desenvolvimento de soluções analíticas.

Por outro lado, conhecendo a importância das tensões residuais e o efeito da sua presença nos componentes, levando a falhas prematuras ou ao aumento do seu tempo de vida útil, torna-se de extrema importância a sua consideração na fase de projecto. Associando a sua importância à viabilidade económica da sua determinação, o método da difracção de raios X é um dos métodos mais utilizados na determinação de tensões residuais, mas a análise em profundidade obriga à remoção sucessiva de camadas de material, devido à fraca penetração dos raios X nos materiais. Mas devido à redistribuição de tensões residuais que ocorre durante a remoção de camadas, os valores determinados por difracção de raios X não serão iguais aos existentes antes da remoção do material, sendo necessário corrigir os valores obtidos experimentalmente para obter o perfil inicial.

Com este trabalho pretendeu-se colmatar a dificuldade associada à determinação das tensões residuais em profundidade utilizando esta combinação de métodos com uma das ferramentas mais importantes e eficientes que existem actualmente, o método dos elementos finitos. Assim, foram implementados dois métodos de correcção da redistribuição de tensões residuais devida à remoção de camadas e desenvolveu-se um novo método no sentido da produção de conhecimento. Quanto à implementação dos métodos verificou-se que a variação dos resultados obtidos entre cada um deles não era significativa nos casos de estudo no entanto todos apresentaram bons resultados. A validação dos modelos desenvolvidos foi efectuada por duas vias, a via numérica e a via analítica.

Palavras-chave: Redistribuição das tensões residuais, simulação numérica, método dos elementos finitos, ANSYS.

Abstract

Numerical simulation of physical processes based on the finite element method has assumed a leading role in technological areas. Thus, we now face a new approach at problem solving, especially when those problems have some complexity. This type of numerical approach fills the difficulty inherent to the development of analytical solutions.

On the other hand, knowing the importance of the residual stresses and the effect of their presence in the components, leading to premature failure or increase its useful life, it is of utmost importance for its consideration at the design stage. Associating its importance to the economic viability of its determination, the method of X-ray diffraction is one of the most used methods to determine residual stresses, but the in-depth analysis requires the removal of successive layers of material, due to poor penetration of the X-rays in materials. But due to redistribution of residual stresses, which occur during the removal of layers, the values determined by X-ray diffraction are not equal to those which existed before the material removal so it becomes necessary to correct the values obtained experimentally.

This work aims to address the difficulties associated with the determination of residual stresses in depth using this combination of methods with one of the most important and effective tool that currently exist, the finite element method. Thus, two methods were implemented to correct the residual stress redistribution due to the removal of layers and a new method was developed. As to the implementation of the methods, it was found that the variation in the results obtained from each case was not significant in any study and all showed good results. The validation of the developed models was carried out in two ways, numerically and analytically.

Keywords Layer removal correction, numerical simulation, finite element method, ANSYS.

Índice

Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xv
Nomenclatura.....	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Tensões Residuais	3
2.2. Método dos elementos finitos.....	10
2.3. Modelo analítico de Moore e Evans.....	13
2.4. Modelo numérico da Lambda-Research.....	18
2.5. Modelo numérico de Vincent Savaria et al.	20
3. MODELOS DESENVOLVIDOS	23
3.1. Placa plana com remoção total de cada camada.....	23
3.2. Placa plana com remoção localizada de cada camada.....	25
3.3. Disco oco com remoção plana de cada camada	25
3.4. Disco oco com remoção localizada de cada camada.....	26
4. SOFTWARE INTERACTIVO.....	29
5. APLICAÇÃO PARA CORRIGIR O PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS	31
6. MODELO DO COEFICIENTE J.....	33
7. CASOS DE ESTUDO	39
7.1. Caso de estudo 1 – Placa plana com remoção total de cada camada.....	39
7.2. Caso de estudo 2 – Placa plana com remoção localizada de cada camada	45
7.3. Caso de estudo 3 – Disco oco com remoção plana de cada camada	48
7.4. Caso de estudo 4 – Disco oco com remoção localizada de cada camada.....	50
8. CONCLUSÕES	53
9. PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Método de remoção por camada. (a) Placa com um estado inicial de tensões residuais em equilíbrio; (b) Camada a ser removida da placa ilustrada em a); (c) Ilustração da deformação resultante da remoção de uma camada de espessura h_0-h_1	8
Figura 2.2. Estrutura global do ANSYS, níveis e fases da simulação.....	11
Figura 2.3. ANSYS: Fases de uma simulação ao nível do processador.....	12
Figura 2.4. ANSYS: Interface gráfica (GUI).	12
Figura 2.5. Geometria considerada para o cálculo da redistribuição de tensões numa placa, após remoção de material [4].	14
Figura 2.6. Geometria considerada para o cálculo da redistribuição de tensões num cilindro, após remoção de material.....	15
Figura 2.7. Geometria considerada para o cálculo da redistribuição de tensões num cilindro oco, após remoção de material.	17
Figura 2.8. Fluxograma representativo do método de correcção da Lambda-Research.....	19
Figura 3.1. Exemplo do modelo de uma placa utilizada numa simulação numérica do processo de remoção de camadas por polimento electrolítico.	24
Figura 3.2. Exemplo do modelo de 1/4 de uma placa com a zona a remover no centro da placa, utilizada numa simulação numérica do processo de remoção de camadas por polimento electrolítico.	25
Figura 3.3. Exemplo do modelo de um disco oco com remoção total de camadas de material no topo, utilizado numa simulação numérica do processo de remoção de camadas por polimento electrolítico.....	26
Figura 3.4. Exemplo do modelo de um disco oco com remoção localizada de camadas de material no topo, utilizado numa simulação numérica do processo de remoção de camadas por polimento electrolítico.....	27
Figura 4.1. Plataforma desenvolvida para gerar os <i>scripts</i> correspondentes à análise numérica de uma dada geometria: fase da selecção da geometria pretendida.	29
Figura 4.2. Plataforma desenvolvida para gerar os <i>scripts</i> correspondentes à análise numérica de uma dada geometria: fase da configuração das propriedades da análise de um disco com remoção localizada das camadas.....	30
Figura 5.1. Aplicação desenvolvida no Excel que faz a correcção do perfil de tensões residuais obtido experimentalmente por difracção de Raios X.	32
Figura 6.1. Esquema representativo dos valores tidos em conta pelo método do coeficiente J e pelo método da Lambda-Research.	33
Figura 6.2. Esquema da placa a utilizar neste caso prático. A vermelho encontra-se o perfil 1 e a azul o perfil 2, impostos numericamente.	34
Figura 7.1. Esquema da geometria da placa a utilizar neste caso prático e as respectivas propriedades do material que a constitui.	40

Figura 7.2. Espessura de cada camada removida.	40
Figura 7.3. Caso de estudo 3 - Espessura de cada camada removida.....	48
Figura 7.4. Caso de estudo 4 – Geometria e características do disco.....	50

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Informação obtida por difracção de raios X no estudo dos materiais policristalinos [12].....	9
Tabela 6.1. Resultados obtidos após a simulação numérica do processo de remoção de camadas numa placa plana e respectiva correcção utilizando o método de correcção numérica do Coeficiente J e o método de correcção analítica de Moore e Evans.	36
Tabela 6.2. Erro associado a cada profundidade.	37
Tabela 7.1. – Caso de estudo 1 - Perfil de tensões residuais obtido experimentalmente utilizando o método da difracção de raios X para a determinação das tensões residuais e a remoção de camadas por polimento electrolítico para obter o perfil de tensão em profundidade.....	41
Tabela 7.2. – Caso de estudo 1 – Valores corrigidos do perfil de tensões residuais obtido experimentalmente.	44
Tabela 7.3. – Caso de estudo 2 - Perfil de tensões residuais obtido experimentalmente utilizando o método da difracção de raios X para a determinação das tensões residuais combinado com o método de remoção por camadas para obter o perfil de tensão em profundidade.....	46
Tabela 7.4. – Caso de estudo 2 - Valores corrigidos do perfil de tensões residuais obtido experimentalmente.	47
Tabela 7.5. – Caso de estudo 3 - Valores corrigidos do perfil de tensões residuais obtido experimentalmente.	49

NOMENCLATURA

Simbologia

- CJ - Coeficiente de correcção do método do Coeficiente J
- I - Intensidade dos picos de difracção
- Θ - Posição de um pico de difracção
- ΔI - Variação da intensidade de um pico de difracção
- $\Delta \Theta$ - Variação da posição de um pico de difracção
- σ - Tensão
- $\sigma_{\text{Corrected CJ}}$ - Tensão corrigida pelo método do Coeficiente J
- $\sigma_{\text{Corrected LR}}$ - Tensão corrigida pelo método da Lambda-Research
- $\sigma_{\text{Corrected VS}}$ - Tensão corrigida pelo método de Vincent Savaria et al.
- $\sigma_{\text{R}}^{\text{III}}$ - Tensões residuais de terceira ordem
- $\sigma_{\text{R}}^{\text{II}}$ - Tensões residuais de segunda ordem
- $\sigma_{\text{R}}^{\text{I}}$ - Tensões residuais de primeira ordem
- $\sigma_{\text{Moore\&Evans}}$ - Tensão corrigida pelo método de Moore & Evans
- $\sigma_{\text{R}}^{\text{M}}$ - Macrotensões residuais num ponto do material
- $\sigma_{\text{R}}^{\text{m}}$ - Microtensões residuais num ponto do material
- σ_{R} - Tensões residuais num ponto do material
- $\sigma_{\text{R}}(r)$ - Valor da tensão corrigida na direcção radial de um cilindro em função do raio
- σ_{x} - Tensões segundo a direcção X
- σ_{y} - Tensões segundo a direcção Y
- σ_{z} - Tensões segundo a direcção Z
- $\sigma_{\text{z}}(r)$ - Valor da tensão corrigida na direcção longitudinal de um cilindro em função do raio
- $\sigma_{\text{zm}}(r)$ - Tensão determinada por DRX na direcção longitudinal função do raio
- $\sigma_{\theta}(r)$ - Valor da tensão corrigida na direcção transversal de um cilindro em função do raio
- $\sigma_{\theta\text{m}}(r)$ - Tensão determinada por DRX na direcção transversal função do raio

Siglas

- APDL - *ANSYS Parametric Design Language*
Batch - Ficheiro utilizado para automatizar tarefas de forma sequencial
DRX - Difrração de raios X
FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
- FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GTR - Grupo de Tensões Residuais
GUI - Interface Gráfica do Utilizador
ISTL - Instituto Superior Técnico de Lisboa
MEF - Método dos Elementos Finitos
Scripts - Linguagem de programação que permite a sua execução no interior de programas

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação surge no âmbito do projecto de investigação PTDC/EME-PME/100204/2008: “Railways - rolling contact fatigue”, cujo principal objectivo é caracterizar o do comportamento do conjunto roda/carril de alta velocidade espanhola (AVE) sujeito ao fenómeno de fadiga de contacto de rolamento. Este é um projecto constituído por uma equipa com elementos da FEUP, ISTL e FCTUC e, no âmbito deste trabalho, a FCTUC é responsável pela caracterização do perfil de tensões residuais nos provetes extraídos das rodas e carril.

O trabalho que se segue foi motivado pela necessidade de corrigir o perfil de tensões residuais obtido em profundidade quando este é determinado por difracção de raios X (DRX). Uma vez que esta técnica permite apenas a determinação das tensões numa camada muito superficial, devido à fraca penetração dos raios X nos materiais, torna-se necessário combinar o método de determinação das tensões com um processo de remoção sucessiva de camadas de material para determinar o perfil de tensões residuais em profundidade. O problema que se levanta é a redistribuição de tensões que ocorre quando se remove material de um componente que está em equilíbrio, levando a que as tensões determinadas após a remoção de material sejam diferentes das tensões iniciais, antes da remoção de material.

Assim, pretende-se com esta dissertação fazer um estudo sobre a redistribuição das tensões residuais devida à remoção de camadas de material e implementar no GTR – Grupo de Tensões Residuais da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra – um *software* amigo do utilizador que permita efectuar a correcção do perfil de tensões residuais determinado por difracção de raios X, para que os valores a ter em conta sejam o mais próximo possíveis dos originais, antes da remoção de camadas.

2. SÍNTESE BILIOGRÁFICA

2.1. Tensões Residuais

De um modo geral pode-se definir tensões residuais como as tensões que se mantêm no interior de um corpo na ausência de cargas externas, como por exemplo a força gravítica ou outra fonte de tensões como gradientes térmicos [1].

2.1.1. Origem

Sempre que exista uma solicitação, seja por meio de uma força, gradiente térmico ou outra qualquer fonte de tensões, há a possibilidade de serem introduzidas tensões residuais. Assim, na prática, é altamente improvável que um determinado material ou componente mecânico se encontre livre de tensões residuais já que, virtualmente, todos os processos aos quais é sujeito se apresentam como uma fonte de tensões residuais [2].

Apesar disso, a origem das tensões residuais deve-se, principalmente, aos processos de fabrico, que modificam as características mecânicas, geométricas e metalúrgicas das camadas superficiais e podem conduzir tanto a uma redução como a um aumento significativo da resistência à fadiga.

A introdução de tensões residuais de forma voluntária, por meio de tratamentos de pré-tensão, é um dos meios mais eficazes para melhorar a resistência à fadiga dos componentes e estruturas [2].

O desenvolvimento de tensões residuais em aços é influenciado pelas seguintes propriedades: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica e tensão limite de elasticidade, entre outros. [3]

As tensões internas existem praticamente em todos os componentes rígidos, metálicos ou não e traduzem a história mecânica e metalúrgica do componente, desde o fabrico, aos tratamentos superficiais, períodos de rodagem e de funcionamento posterior [4].

Pode-se classificar a origem das tensões residuais em três tipos: mecânica, térmica e metalúrgica [5].

- Origem Mecânica** Ocorrem devido às deformações plásticas não uniformes geradas pelos processos de fabrico. Podem ser introduzidas propositadamente, com o intuito de criar um determinado perfil de tensão no componente ou podem ocorrer naturalmente, durante as várias fases do processo de fabrico. Exemplos de processos que introduzem tensões residuais deste tipo: maquinagem, furação, polimento, granalhagem, laminagem profunda, etc.
- Origem Térmica** Devem-se a operações de aquecimento e arrefecimento não uniformes. Ao nível microscópico, têm origem devido à diferença entre os coeficientes térmicos de expansão das diferentes fases constituintes do material.
- Origem Metalúrgica** Surgem como resultado de reacções de transformação de fase, por exemplo durante a soldadura, fundição, etc. Estes processos são acompanhados pela libertação de calor latente e mudanças de volume que constituem fenómenos que induzem tensões residuais.

Em suma, as tensões residuais resultam da heterogeneidade das deformações introduzidas a qualquer escala do componente ou estrutura e, apesar da classificação acima, geralmente as tensões residuais têm origem numa combinação de vários destes fenómenos, tornando assim a previsão do estado de tensões residuais num problema de elevada complexidade [4].

2.1.2. Classificação das tensões residuais em diferentes ordens

Tal como referido anteriormente, as fontes de tensões residuais resultam da heterogeneidade das deformações introduzidas a qualquer escala do componente: macroscópica, microscópica ou submicroscópica. De acordo com estas três escalas de deformação, foi proposta por Macherauch e outros, uma classificação em três ordens [6]:

- Escala macroscópica** À escala macroscópica definem-se as tensões residuais de primeira ordem, σ_R^I , que são homogéneas sobre grandes domínios do material, na ordem de algumas décimas de milímetro. Estas tensões estão em equilíbrio em cada secção e podem ser determinadas por extensómetros que detectem as deformações por elas produzidas ou por difracção de raios X, os seus efeitos manifestam-se pela modificação da posição dos picos de difracção.

Escala microscópica σ_R^{II} A esta escala são definidas as tensões residuais de segunda ordem, σ_R^{II} , homogêneas sobre pequenos domínios do material, como um grão ou fase, à escala de algumas dezenas de micrómetros. A presença destas tensões provém da anisotropia entre os grãos, que não possuem a mesma orientação cristalina, dando origem a incompatibilidades das deformações plásticas entre eles. As forças internas e momentos relacionados com as tensões desta ordem equilibram-se sobre um número relativamente grande de grãos do material e podem ser determinadas por difracção de raios X. As modificações deste equilíbrio podem resultar em variações dimensionais macroscópicas.

Escala submicroscópica σ_R^{III} As tensões residuais de terceira ordem, σ_R^{III} , são tensões à escala da rede cristalina, ou seja, de algumas distâncias interatómicas e representam acções criadas por todos os tipos de defeitos cristalinos (lacunas, átomos intersticiais ou substitucionais, deslocações, juntas de maclas, etc.) As forças internas e os momentos ligados a estas tensões estão em equilíbrio dentro de domínios muito pequenos e perturbações desde equilíbrio não originam variações dimensionais macroscópicas.

Desta classificação resulta que o estado de tensão residual num ponto do material é dado por:

$$\sigma_R = \sigma_R^I + \sigma_R^{II} + \sigma_R^{III} \quad (2.1)$$

No caso de materiais metálicos com grãos muito pequenos (da ordem de 10 μm) torna-se complicado distinguir para uma dada fase os efeitos das tensões de segunda e terceira ordem, sendo nestes casos comum fazer a distinção em macrotensões e microtensões, correspondendo as macrotensões às tensões de primeira ordem e as microtensões às de segunda e terceira ordem anteriormente referidas. De acordo com esta classificação, temos:

$$\sigma_R^M = \sigma_R^I \quad (2.2)$$

$$\sigma_R^m = \sigma_R^{II} + \sigma_R^{III} \quad (2.3)$$

2.1.3. Efeitos

O efeito das tensões residuais pode ser benéfico ou prejudicial, dependendo principalmente se as tensões internas são de compressão ou tracção. Depende ainda da sua distribuição e magnitude.

Ao atender-se ao princípio da sobreposição das forças, pode-se concluir que a tensão resultante que actua sobre um componente em serviço não resulta apenas dos carregamentos externos. Na realidade, às tensões externas têm de ser somadas as tensões internas, ou seja, as tensões residuais.

Quando o somatório das tensões devidas aos carregamentos externos e das tensões residuais ultrapassa o valor da tensão limite de elasticidade do material, o componente entra em regime de deformação plástica. Outra situação, no caso de tensões residuais de tracção à superfície de um componente sujeito à fadiga, resulta num aumento da tensão média o que poderá causar a ruína prematura.

Resumindo, pode-se admitir que a presença de tensões residuais tem um efeito benéfico se, quando somadas às tensões devidas aos carregamentos externos, resultar um aumento da vida útil do componente.

Geralmente consideram-se as tensões residuais de compressão como benéficas, já que estas aumentam a dureza e, por outro lado, impedem a propagação de fendas, aumentando a tenacidade e a resistência à fadiga [7].

Um aspecto curioso relativamente às tensões residuais é que raramente são tidas em conta na fase de projecto (à excepção dos coeficientes de segurança). Muitas vezes até que exista falha prematura ou um mau funcionamento de um determinado componente, as tensões residuais são ignoradas.

2.1.4. Métodos de determinação de tensões residuais

Com os recursos analíticos e computacionais disponíveis actualmente, torna-se possível em muitas situações estimar as tensões às quais um componente está sujeito em serviço. No entanto, este facto por si mesmo, não é suficiente para prever de forma fiável o desempenho do componente. Na prática, muitas vezes ocorrem falhas inesperadas devido à presença de tensões residuais que, combinadas com as tensões de serviço, reduzem de forma significativa a vida dos componentes. Por outro lado, existem situações onde se introduzem propositadamente tensões de compressão através de tratamentos superficiais, como é o caso da granalhagem e que podem aumentar de forma significativa a vida útil do componente.

Actualmente já se empregam bastantes recursos no desenvolvimento de uma estrutura de trabalho onde se possam incorporar as tensões residuais no projecto de sistemas em áreas como a aeroespacial, nuclear e outras indústrias críticas.

A determinação das tensões residuais torna-se, assim, um processo essencial e com tendência a ser cada vez mais necessário. Para isso, existem hoje vários métodos disponíveis para a determinação de tensões residuais sendo que, todos eles apresentam vantagens e desvantagens. Na escolha de uma técnica, existem vários critérios que devem ser tidos em conta, como por exemplo o tamanho da amostra, localização e acessibilidade da área de interesse, precisão e exactidão pretendida, factores económicos, entre outros [8]. Assim, ponderando os critérios de decisão com as vantagens e limitações da cada uma das técnicas, pode seleccionar-se o método mais indicado para cada situação. Muitas vezes pode até justificar-se a utilização de mais que uma técnica.

Pode-se classificar os métodos disponíveis em três categorias: i) métodos destrutivos, ii) não destrutivos e iii) semi-destrutivos. Esta classificação, tal como o nome indica, separa os métodos que destroem ou inutilizam a amostra, dos métodos que permitem que a amostra volte a ser utilizada [9]. Existem também métodos semi-destrutivos que permitem a recuperação do componente para que este possa voltar a ser utilizado, sendo um dos métodos mais importantes neste sentido o método do furo.

2.1.4.1. Métodos destrutivos

Como as tensões internas se auto-equilibram, a utilização deste tipo de métodos baseia-se na eliminação do estado de equilíbrio das tensões residuais existentes na amostra. Provocando uma alteração no estado de equilíbrio inicial, estabelece-se um novo estado de equilíbrio. Este fenómeno, conhecido como redistribuição das tensões residuais, permite que seja medida não a relaxação em si, mas os seus efeitos, tais como o deslocamento ou a deformação, daí ser mais correcto do ponto de vista físico referirmo-nos à determinação de tensões residuais e não medição, já que se medem as deformações ou deslocamentos e por conseguinte se determinam as tensões. Entre os principais métodos destrutivos encontram-se o método de remoção por camadas e o método do seccionamento.

No decorrer deste trabalho vai-se utilizar a técnica de remoção por camadas, como poderá ser visto mais à frente. Esta técnica de remoção de material é elaborada de forma cíclica sendo que em cada ciclo se remove uma quantidade de material utilizando para a determinação das tensões residuais o método da difracção de raios X. A remoção de

camadas pode ser feita por maquinagem ou ataque químico. Como a maquinagem tende a induzir novas tensões residuais, é preferível utilizar-se o ataque químico, uma vez que este, por si mesmo, não introduz novas tensões residuais na amostra. A Figura 2.1 representa o processo de remoção de camadas para o caso de uma placa plana com um gradiente de tensões biaxiais no plano ao longo da espessura da placa. Quando é removida uma camada, é destruído o estado de equilíbrio inicial e dá-se uma relaxação de tensões para que a amostra atinja um novo estado de equilíbrio, produzindo deflexões e deformações que podem ou não ser visíveis macroscopicamente [4].

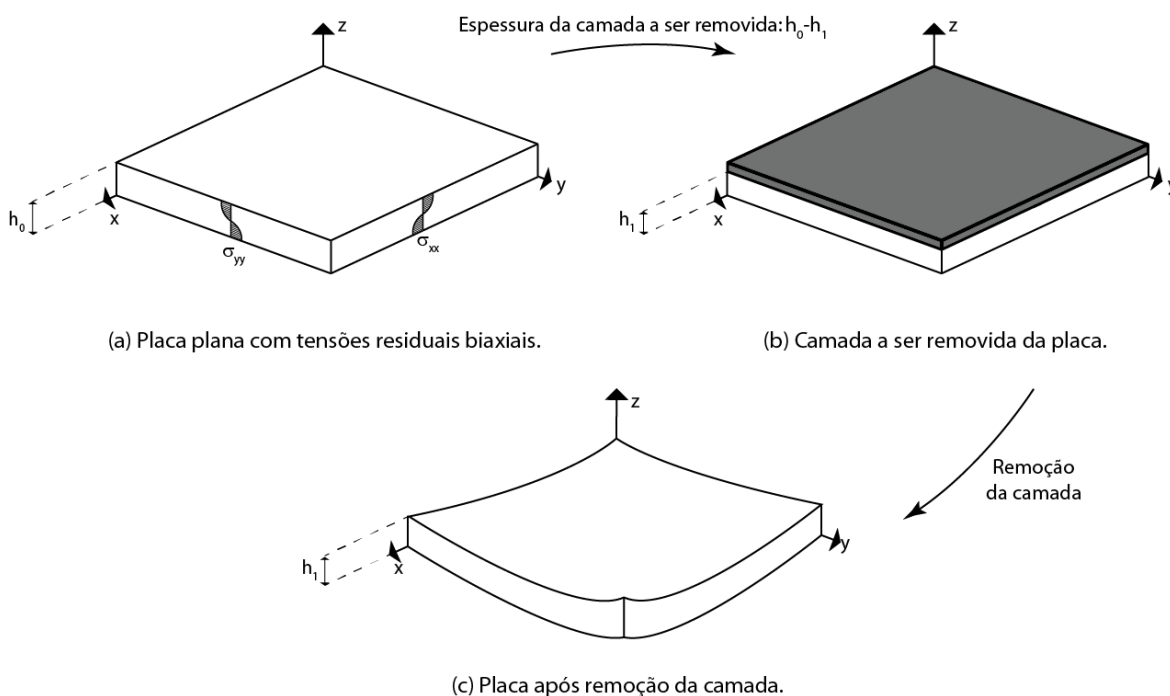


Figura 2.1. Método de remoção por camada. (a) Placa com um estado inicial de tensões residuais em equilíbrio; (b) Camada a ser removida da placa ilustrada em a); (c) Ilustração da deformação resultante da remoção de uma camada de espessura h_0-h_1 .

2.1.4.2. Métodos não destrutivos

Entre os métodos não destrutivos existentes, os principais são o método da difracção de raios X, o método da difracção de neutrões, o método de ultra-sons e o método magnético.

No âmbito desta dissertação vai ser utilizado o método da difracção de raios X, quanto a este método podem realçar-se algumas características [1, 10, 11]:

- Método não destrutivo em medições superficiais;

- Permite efectuar medidas muito localizadas;
- Pode ser aplicado a peças independentemente da sua forma e é limitado apenas pela acessibilidade do ponto de incidência e difracção dos raios X;
- Pelas suas características a sua utilização é limitada a materiais cristalinos;

Sendo a maioria dos metais materiais policristalinos, constituídos por fases que, por sua vez, são constituídas por grãos, pode-se fazer uma divisão em domínios cristalinos que possam ser irradiados por radiação X.

Ao irradiar um material cristalino por raios X, produzimos um espectro de radiação que é característico de cada material.

Pode-se caracterizar cada pico do espectro de difracção em três grandezas distintas: posição, intensidade e forma. Cada uma das quais é afectada pelas diferentes características do material a cada uma das três escalas referidas anteriormente. O valor médio e a variação de cada um dos parâmetros dos picos de difracção permitem obter diversas informações a partir de um difractograma de raios x, de acordo com a seguinte tabela [12]:

Tabela 2.1. Informação obtida por difracção de raios X no estudo dos materiais policristalinos [12].

Posição dos picos de difracção (Θ)	<ul style="list-style-type: none"> - Natureza de um metal, de uma fase ou de um composto intermetálico - Composição de uma solução sólida - Transformação ordem-desordem - Diagramas de equilíbrio
Variação da posição de um pico de difracção ($\Delta\Theta$)	- Tensões residuais
Intensidade dos picos de difracção (I)	- Dosagem de fases
Variação da intensidade de um pico de difracção (ΔI)	<ul style="list-style-type: none"> - Texturas cristalográficas - Medidas de espessura
Forma de um pico de difracção	<ul style="list-style-type: none"> - Tamanho do cristalino - Microdeformações (taxa de encruamento)

Este método, não destrutivo, permite a determinação de tensões residuais superficiais em materiais cristalinos ou em subdomínios cristalinos de materiais policristalinos. Como a penetração dos raios X na maioria dos metais é bastante baixa, na ordem de alguns micrómetros, para que se possam efectuar medições em profundidade pode utilizar-se este método em conjunto com a técnica de remoção de camadas, passando assim a ser um método destrutivo.

2.2. Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos foi introduzido por *Turnet et al* (1956) e desde aí tem sofrido um grande desenvolvimento, basta uma simples pesquisa para que se encontrem centenas de publicações com propostas de desenvolvimento do método.

Sendo esta uma técnica computacional que permite obter soluções aproximadas para uma série de problemas reais, principalmente utilizada no âmbito da engenharia, hoje em dia, o MEF (Método dos Elementos Finitos) tornou-se uma ferramenta essencial na análise de vários fenómenos físicos.

De uma forma geral, este método consiste na decomposição de um domínio contínuo em vários subdomínios (elementos) sendo a solução calculada em pontos específicos (pontos de Gauss), e nos restantes pontos a solução é extrapolada. Desta forma, o método transforma um problema contínuo num discreto, com um número finito de incógnitas. Pode-se dizer, no âmbito da engenharia estrutural, que o MEF tem como objectivos a determinação do estado de tensão e deformação de um corpo.

Actualmente o MEF apresenta um nível de desenvolvimento que permite a sua utilização pela maioria dos engenheiros e cientistas desde áreas de engenharia de topo a áreas mais convencionais. Enquanto no passado muitos dos utilizadores deste método também estavam envolvidos na sua programação, hoje verifica-se que a maioria dos seus utilizadores apenas se preocupa com a utilização de um *software* que permita obter uma solução numérica e com a interpretação dos resultados. Entre os muitos *softwares* deste tipo, ficam alguns exemplos: ANSYS, ADINA, Abaqus, ALGOR, COSMOSWorks, Solidworks Simulation, Nastran, etc.

No âmbito das simulações numéricas pelo MEF deste trabalho vai ser utilizado o *software* comercial ANSYS. Este é um programa que permite fazer a modelação de

inúmeros tipos de problemas de engenharia e os resolve numericamente recorrendo ao MEF. Este *software* é indicado para vários tipos de problemas, como referido anteriormente, tais como, estáticos, dinâmicos, de análise estrutural (linear e não linear), transmissão de calor, mecânica dos fluídos, acústica e electromagnéticos.

Uma das grandes vantagens deste *software* é possuir uma linguagem de programação, APDL (*ANSYS Parametric Design Language*) cuja sintaxe apresenta algumas semelhanças ao Fortran. De uma forma geral, o *software* está dividido em 2 níveis, de acordo com a Figura 2.2:

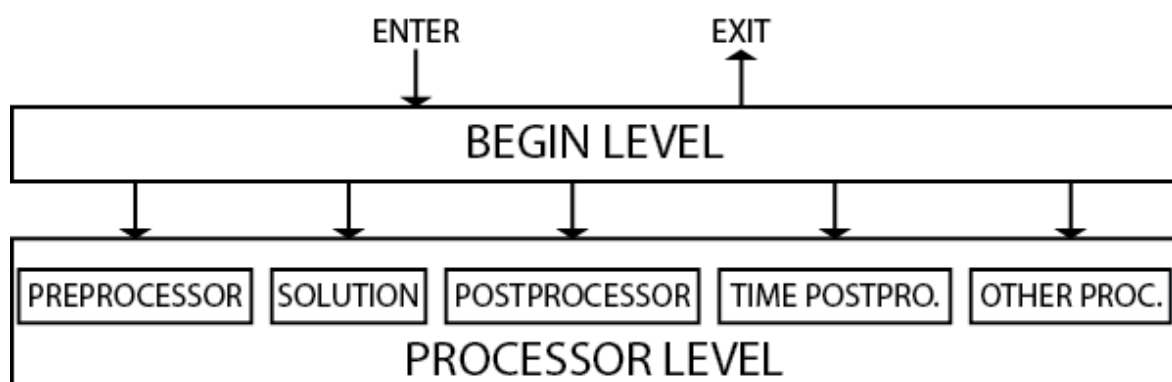


Figura 2.2. Estrutura global do ANSYS, níveis e fases da simulação.

De acordo com a figura acima, a construção do modelo é feita no nível do processador, é nesse nível que se definem todas as variáveis e se faz o pós-processamento. O esquema da Figura 2.3 ilustra os passos a realizar ao nível do processador. Todos os procedimentos necessários a uma simulação podem ser feitos via ambiente gráfico (GUI) ou através de código APDL. Na Figura 2.4 pode ver-se a interface gráfica do ANSYS.

- ▣ **Preprocessor**
 - ▣ Element Type
 - ▣ Real Constants
 - ▣ Material Props
 - ▣ Sections
 - ▣ Modeling
 - ▣ Meshing
 - ▣ Checking Ctrl's
 - ▣ Numbering Ctrl's
 - ▣ Archive Model
 - ▣ Coupling / Ceqn
 - ▣ FLOTRAN Set Up
 - ▣ Multi-field Set Up
 - ▣ Loads
 - ▣ Physics
 - ▣ Path Operations
- ▣ **Solution**
 - ▣ Analysis Type
 - ▣ Define Loads
 - ▣ Load Step Opt's
 - ▣ SE Management (CMS)
 - ▣ Results Tracking
 - ▣ Solve
 - ▣ Manual Rezoning
 - ▣ Multi-field Set Up
 - ▣ Diagnostics
 - ▣ Unabridged Menu
- ▣ **General Postproc**
 - ▣ Data & File Opt's
 - ▣ Results Summary
 - ▣ Read Results
 - ▣ Failure Criteria
 - ▣ Plot Results
 - ▣ List Results
 - ▣ Query Results
 - ▣ Options for Outp
 - ▣ Results Viewer
 - ▣ Nodal Calcs
 - ▣ Element Table
 - ▣ Path Operations
 - ▣ Surface Operations
 - ▣ Load Case
 - ▣ Check Elem Shape
 - ▣ Write Results
 - ▣ ROM Operations
 - ▣ Submodeling
 - ▣ Fatigue
 - ▣ Safety Factor
 - ▣ Define/Modify
 - ▣ Nonlinear Diagnostics
 - ▣ Reset
 - ▣ Manual Rezoning
- ▣ **TimeHist Postpro**
 - ▣ Variable Viewer
 - ▣ Settings
 - ▣ Store Data
 - ▣ Define Variables
 - ▣ Read LSDYNA Data
 - ▣ List Variables
 - ▣ List Extremes
 - ▣ Graph Variables
 - ▣ Math Operations
 - ▣ Table Operations
 - ▣ Smooth Data
 - ▣ Generate Spectrm
 - ▣ Reset Postproc

Figura 2.3. ANSYS: Fases de uma simulação ao nível do processador.

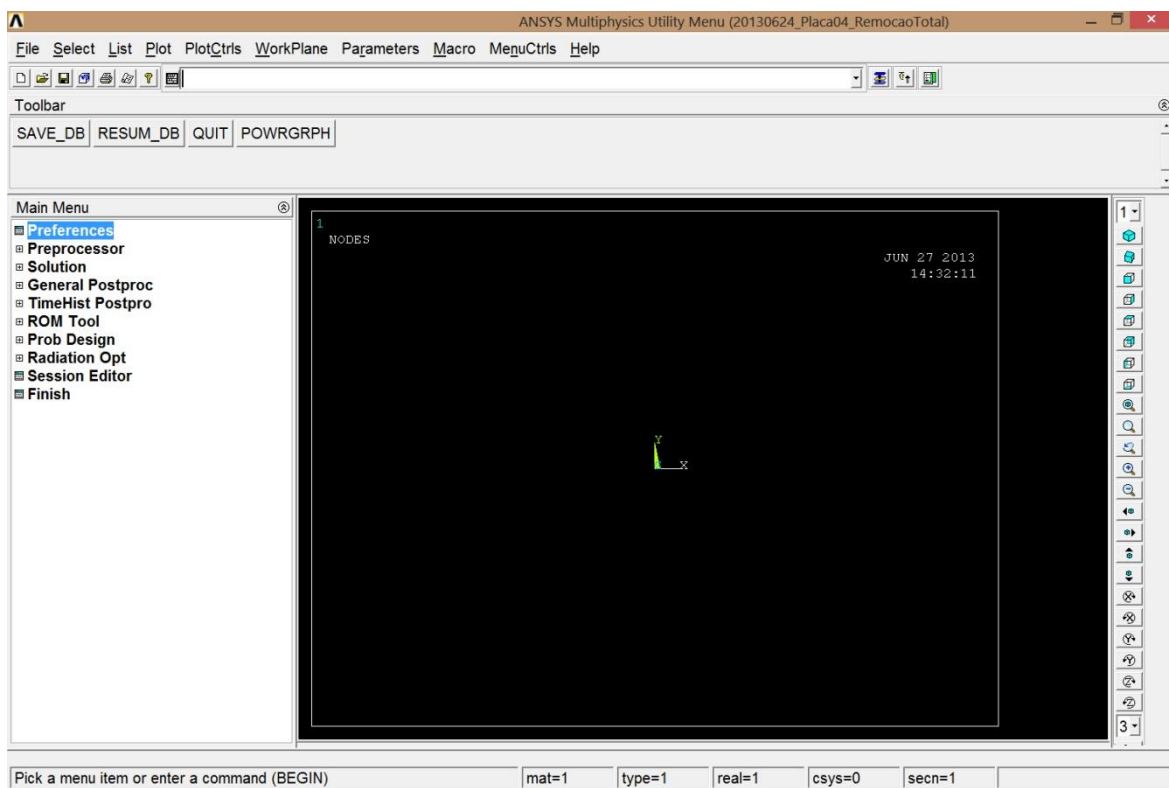


Figura 2.4. ANSYS: Interface gráfica (GUI).

De uma forma geral, pode-se dividir um problema em três partes.

- (I) Pré-processamento** Consiste na definição do problema:
- Pontos/linhas/áreas/volumes;
 - Tipos de elementos
 - Propriedades do material e geométricas;
 - Gerar a malha;
- (II) Solução** Nesta fase impõe-se cargas, constrangimentos e resolve-se o problema:
- Cargas (pontuais, distribuídas, de pressão, etc.);
 - Constrangimentos (translação e rotação);
 - Resolução do sistema de equações;
- (III) Pós-Processamento** Consiste na análise dos resultados:
- Deslocamentos, deformações, tensões;
 - Diagramas de esforços, mapas térmicos, gráficos;
 - Etc.;

2.3. Modelo analítico de Moore e Evans

2.3.1. Caso de uma placa plana

Assumindo que as tensões residuais numa placa plana, de espessura uniforme, dependem apenas da profundidade à qual são determinadas e considerando as tensões principais σ_x , σ_y e σ_z com o eixo OZ perpendicular à face da placa, Moore e Evans [13] deduziram um modelo analítico que permite determinar o valor das tensões originais em função das tensões determinadas após a remoção de camadas de material.

Este modelo assume as seguintes hipóteses:

- O processo de remoção de camadas de material, por si mesmo, não introduz novas tensões residuais.
- A placa, de dimensões infinitas tem espessura uniforme (desprezam-se os efeitos de bordo).
- A remoção de camadas faz-se apenas de um dos lados da placa e a remoção é total e de espessura uniforme.
- A correcção é válida apenas para as tensões no plano da placa.

- A redistribuição das tensões dá-se apenas no domínio elástico.

Respeitando estas hipóteses, Moore e Evans [13] concluíram que ao remover uma camada de espessura uniforme da superfície superior de uma placa, estamos de facto a remover tensões de sinal oposto às da camada removida. Isto é, se a superfície da placa tiver tensões de compressão, na realidade ao remover uma camada à superfície, estamos a remover uma tensão de tracção e um momento flector em cada ponto do resto da placa, isto para cada uma das tensões principais σ_x e σ_y .

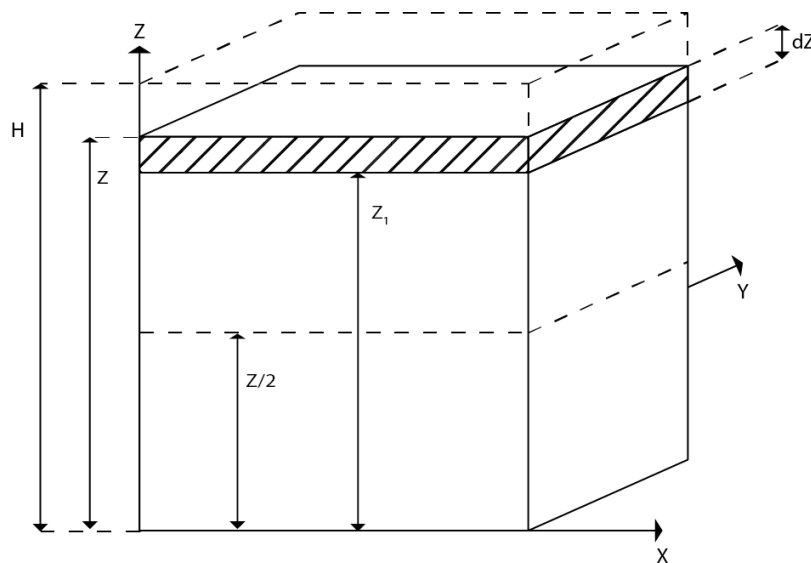


Figura 2.5. Geometria considerada para o cálculo da redistribuição de tensões numa placa, após remoção de material [4].

Atendendo à Figura 2.5, onde H é a espessura inicial da placa, antes de remover qualquer camada de material e Z_1 a distância entre a superfície inferior e o ponto onde se pretende efectuar a correcção da tensão, para calcular as tensões corrigidas, ou seja, as tensões que se encontravam na placa antes da remoção de material Moore e Evans [13] deduziram as seguintes equações:

$$\sigma_x(Z_1) = \sigma_{xm}(Z_1) + 2 \int_{Z_1}^H \frac{\sigma_{xm}(Z)}{Z} \cdot dZ - 6 \cdot Z_1 \int_{Z_1}^H \frac{\sigma_{xm}(Z)}{Z^2} \cdot dZ \quad (2.4)$$

$$\sigma_y(Z_1) = \sigma_{ym}(Z_1) + 2 \int_{Z_1}^H \frac{\sigma_{ym}(Z)}{Z} \cdot dZ - 6 \cdot Z_1 \int_{Z_1}^H \frac{\sigma_{ym}(Z)}{Z^2} \cdot dZ \quad (2.5)$$

Onde, Z representa a distância da camada removida à superfície inferior da placa e $\sigma_{xm}(Z)$ e $\sigma_{ym}(Z)$ as tensões residuais determinadas por difracção de raios X. A resolução dos integrais é geralmente feita através de métodos numéricos que aproximam a solução, por exemplo utilizando o método dos trapézios.

As equações (2.4) e (2.5) representam a correcção a efectuar ao valor da tensão devido à remoção de cada uma das camadas acima, desde a espessura inicial da placa, H , até à profundidade da tensão determinada e que se pretende corrigir, Z_1 .

2.3.2. Caso de um cilindro

Considere-se um cilindro de raio R . Assumindo que o perfil de tensões residuais é simétrico em termos longitudinais e rotacionais, isto é, a tensão é apenas função da distância r , Moore e Evans [13] deduziram o valor da tensão original para as três direcções: longitudinal, transversal e radial, de acordo com a Figura 2.6.

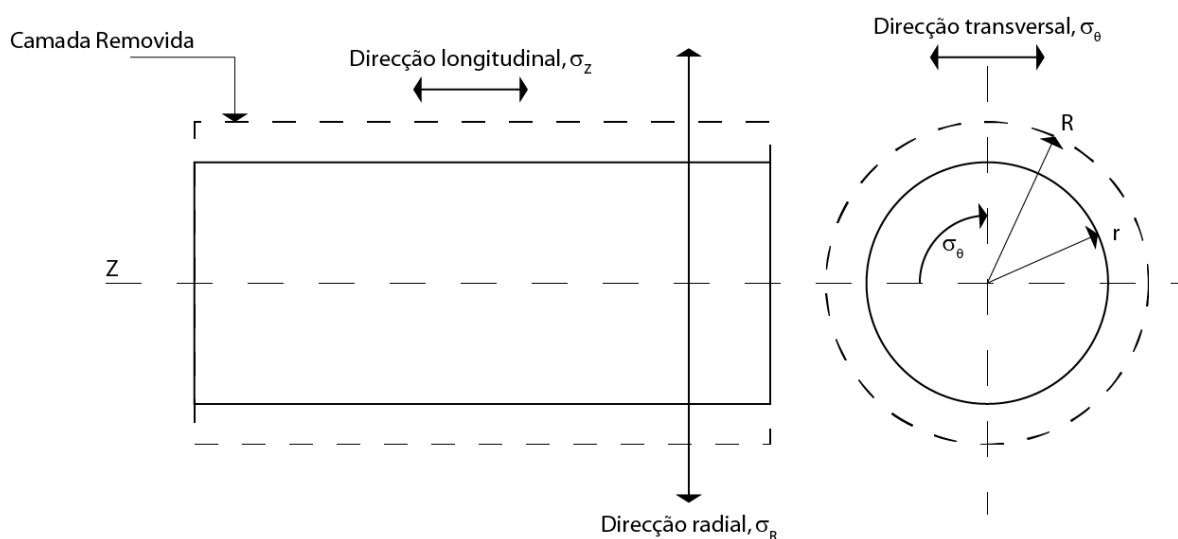


Figura 2.6. Geometria considerada para o cálculo da redistribuição de tensões num cilindro, após remoção de material.

A correcção pressupõe a remoção sistemática de camadas muito finas de espessura uniforme em torno do cilindro e a utilização do método da difracção de raios X para determinar as tensões nas direcções transversal e longitudinal, $\sigma_{\theta m}$ e σ_{zm} , respectivamente. Assume-se também, que o método de remoção das camadas por si mesmo, não introduz novas tensões residuais.

É ainda importante, evitar pontos próximos dos extremos do cilindro para que se possam desprezar os efeitos de bordo.

Em suma, este modelo assume as seguintes hipóteses:

- A distribuição das tensões tem simetria rotacional e longitudinal, ou seja, a tensão é apenas função da distância ao centro do cilindro, r .
- O cilindro é infinito, isto é, desprezam-se os efeitos de bordo.
- O processo de remoção de camadas de material, por si mesmo, não introduz novas tensões residuais, como é o caso do polimento electrolytico.
- A espessura do cilindro é uniforme, assim como a espessura das camadas a remover.
- A redistribuição das tensões dá-se apenas no domínio elástico.

Assumindo estas condições, Moore e Evans [13] concluíram que as tensões originais, antes da remoção de camadas de material, são dadas, para cada uma das direcções indicadas, por:

$$\sigma_R(r) = - \int_r^R \frac{\sigma_{\theta m}(r)}{r} \cdot dr \quad (2.6)$$

$$\sigma_\theta(r) = \sigma_{\theta m}(r) - \int_r^R \frac{\sigma_{\theta m}(r)}{r} \cdot dr \quad (2.7)$$

$$\sigma_Z(r) = \sigma_{Zm}(r) - 2 \int_r^R \frac{\sigma_{Zm}(r)}{r} \cdot dr \quad (2.8)$$

Em que R representa o raio inicial do cilindro, r o raio desde o centro até ao ponto onde se pretende efectuar a correcção, $\sigma_{\theta m}(r)$ e $\sigma_{Zm}(r)$ a tensão determinada por difracção de raios X na direcção transversal e longitudinal, respectivamente e $\sigma_R(r)$, $\sigma_\theta(r)$ e $\sigma_Z(r)$ o valor da tensão corrigida nas direcções radial, transversal e longitudinal, respectivamente. A resolução dos integrais, tal como referido anteriormente, é feita por métodos numéricos, como o método dos trapézios.

2.3.3. Caso de um cilindro oco

À semelhança do caso anterior, Moore e Evans [13] também deduziram as equações de correcção para o caso de um cilindro oco, ou seja, para uma geometria tubular.

Este modelo parte das mesmas hipóteses do modelo anterior, onde:

- A distribuição das tensões tem simetria rotacional e longitudinal, ou seja, a tensão é apenas função do raio.
- O cilindro é infinito, ou seja, desprezam-se os efeitos de bordo.
- O processo de remoção de camadas de material, por si mesmo, não introduz novas tensões residuais.
- A espessura do cilindro é uniforme, assim como a espessura das camadas a remover.
- A redistribuição das tensões dá-se apenas no domínio elástico.

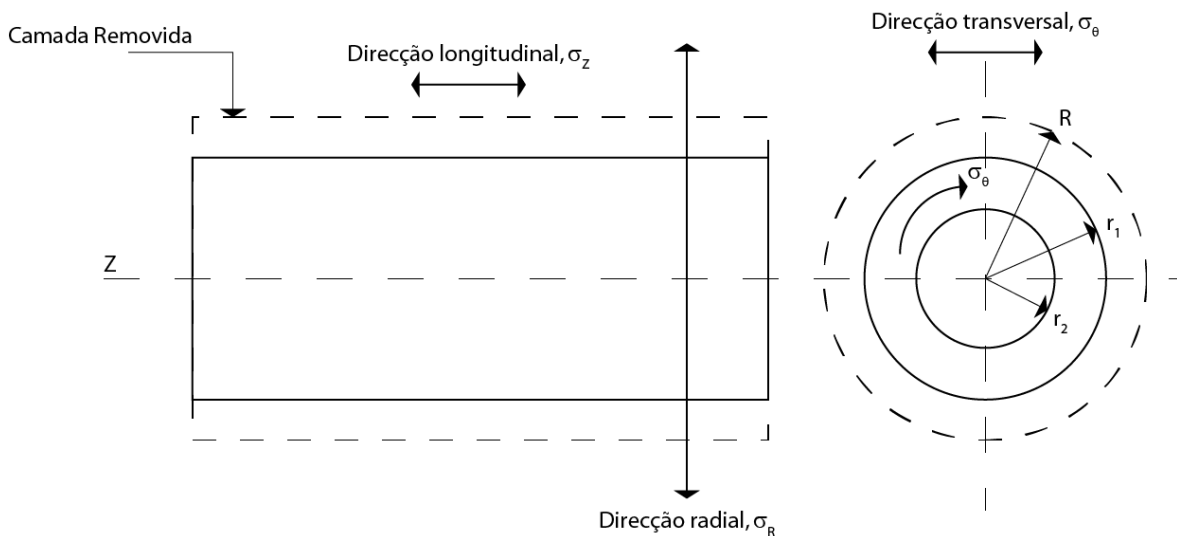


Figura 2.7. Geometria considerada para o cálculo da redistribuição de tensões num cilindro oco, após remoção de material.

De acordo com a Figura 2.7, as equações deduzidas por Moore e Evans [13] tomam a seguinte forma:

$$\sigma_R(r_1) = -\left(1 - \frac{r_2^2}{r_1^2}\right) \int_{r_1}^R \frac{\sigma_{\theta m}(r_1)}{r^2 - r_2^2} \cdot dr \quad (2.9)$$

$$\sigma_{\theta}(r_1) = \sigma_{\theta m}(r) + \frac{r_1^2 + r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} \times \sigma_R(r_1) \quad (2.10)$$

$$\sigma_Z(r_1) = \sigma_{Zm}(r_1) - 2 \int_{r_1}^R \frac{r_1 \times \sigma_{Zm}(r)}{r_1^2 - r_2^2} \cdot dr \quad (2.11)$$

Onde r_2 e R são o raio interno e externo do tubo, r_1 a distância desde o centro até à zona onde se pretende rectificar das tensões residuais, $\sigma_R(r_1)$, $\sigma_{\theta}(r_1)$ e $\sigma_Z(r_1)$ as tensões corrigidas nas direcções radial, transversal e longitudinal, respectivamente.

2.4. Modelo numérico da Lambda-Research

A Lambda-Research propôs uma alternativa aos modelos teóricos já existentes. Este laboratório de investigação desenvolveu um modelo que tem por base o MEF (Método dos Elementos Finitos) cuja principal vantagem é a independência da geometria, ou seja, o método de correcção pode ser aplicado a qualquer geometria. Já os modelos analíticos são adaptados a geometrias específicas e dada a sua complexidade apenas estão desenvolvidos para geometrias simples.

Este método consiste em simular numericamente a extracção das camadas de acordo com a remoção que é feita experimentalmente e encontrar um factor que represente a relaxação das tensões em função das camadas de material removidas. Assim, encontrado esse factor numérico, por meio de engenharia inversa, este é utilizado para corrigir o perfil de tensões residuais em profundidade obtido experimentalmente.

Com este método, “*FEA Matrix Layer Removal Correction*”, torna-se possível obter o perfil de tensão real em geometrias complexas utilizando o método da difracção de raios X em conjunto com a técnica de remoção de camadas por polimento electrolytico, sendo que anteriormente tal era apenas possível recorrendo à técnica da difracção de neutrões, uma vez que estes apresentam uma muito maior penetração nos materiais comparativamente com a profundidade de penetração dos raios X.

Segundo a Lambda-Research [14], depois de construído o modelo numérico correspondente a uma determinada geometria, procede-se à eliminação de cada uma das camadas de elementos de acordo com a remoção experimental. À medida que cada camada de elementos é removida é calculada a redistribuição das tensões no remanescente da peça.

É então determinado um coeficiente de relaxação para cada uma das direcções de interesse das restantes camadas. Esse coeficiente representa a redistribuição que tem lugar a uma determinada profundidade, resultado da remoção anterior das camadas de material. O fluxograma representativo deste método é apresentado na Figura 2.8.

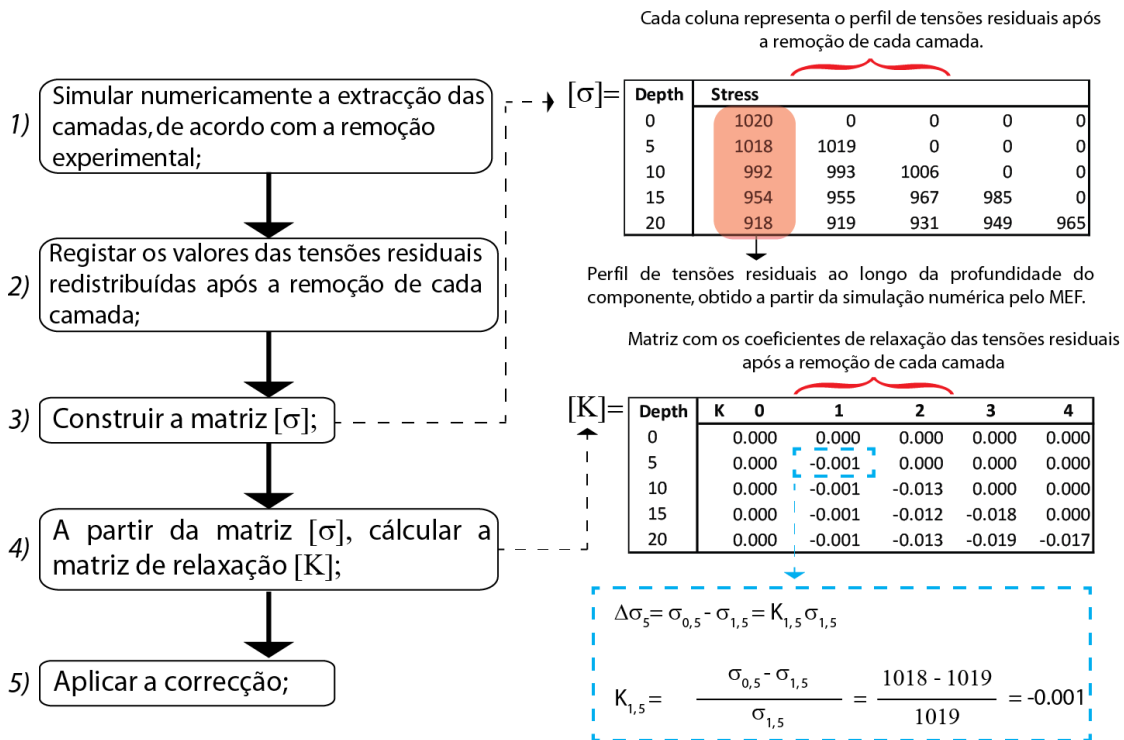


Figura 2.8. Fluxograma representativo do método de correcção da Lambda-Research.

A matriz de correcção é então uma matriz triangular inferior, sendo que cada coluna corresponde à remoção de uma camada em função da profundidade.

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{ij} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Onde, K_{ij} corresponde ao coeficiente de correcção devido ao efeito que a remoção da camada i tem na tensão existente à profundidade j , determinados a partir da simulação numérica para uma dada geometria.

O produto da matriz de correcção, K , pelo vector que contém as tensões obtidas experimentalmente, σ , resulta num vector de correcção:

$$\Delta\sigma_j = \sum_{j=1}^i K_{ij}\sigma_j \quad (2.13)$$

Este vector de correcção somado ao vector das tensões residuais determinadas experimentalmente, produz o perfil corrigido:

$$\sigma_{corrigida} = \Delta\sigma + \sigma_{determinada} \quad (2.14)$$

2.5. Modelo numérico de Vincent Savaria et al.

Tendo em conta o enorme potencial do método desenvolvido pela Lambda-Research, foi proposto por Vincent Savaria et al. [15] uma alteração com vista a melhorar os resultados obtidos pelo modelo original.

Assim, partindo da mesma formulação, estes autores defenderam que seria mais correcto considerar a distribuição de tensões através da espessura de cada camada removida em vez de se utilizar apenas o valor da tensão determinada à superfície de cada camada removida, como tinha sido anteriormente proposto pela Lambda-Research [14]. No entanto, como seria complexo utilizar todas as tensões ao longo de cada camada removida, foi proposto para esta melhoria aproximar esses valores por meio de uma integração trapezoidal que, no fundo, se aproxima da média entre o valor da tensão à superfície da camada s e $s + 1$. Este método traduz-se pelas seguintes equações:

$$\sigma_{média_s} = \frac{\sigma_{m_s} + \sigma_{m_{s+1}}}{2} \quad (2.15)$$

$$(\Delta\sigma_d)_s = -K_{ds}\sigma_{média_s} \quad (2.16)$$

$$\sigma_{C_d} = \sigma_{média_d} + \sum_{s=1}^{d-1} K_{ds}\sigma_{média_s} \quad (2.17)$$

Em que, $\sigma_{média_s}$ é o valor médio da tensão calculada utilizando a tensão determinada na superfície da camada s , σ_{m_s} e na superfície da camada $s + 1$, $\sigma_{m_{s+1}}$. A grandeza $(\Delta\sigma_d)_s$ representa a variação da tensão à profundidade d , originada pela remoção

da camada s e σ_{C_d} representa a correcção a efectuar na tensão determinada experimentalmente à profundidade d , após a remoção de s camadas, de acordo com a equação (2.17).

3. MODELOS DESENVOLVIDOS

Atendendo às vantagens apresentadas pelos modelos numéricos na correcção do perfil de tensões residuais, pretende-se, com este trabalho, implementar os métodos de correcção para algumas das geometrias mais simples, como o caso de placas e discos, para que possam ser utilizados pelo Grupo de Tensões Residuais da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Estes modelos numéricos são programados em *scripts* na linguagem de programação do ANSYS, o APDL [16]. Estes scripts, que contém uma série de informação relativa à construção do modelo como: dimensões da peça, malha, graus de liberdade, simetrias e funções para exportar os dados relativos à tensão e à sua evolução mediante a remoção de camadas, são então importados pelo ANSYS e da simulação numérica resultam alguns ficheiros “*csv – comma separated value*” que possibilitam uma análise da redistribuição das tensões residuais com a remoção de cada camada de material. A remoção de material é simulada de forma sucessiva utilizando a função “Ekill”, ou seja, são seleccionados os elementos afectos ao volume de material a remover (que representam cada camada removida) e com recurso à função “ekill” estes são eliminados. Após eliminar os elementos, faz-se uma simulação e a nova solução contém as tensões redistribuídas. É através dessa análise que vai ser efectuada a correcção do perfil de tensão residual, pelo programa desenvolvido em *Excel-VBA* que se apresenta no capítulo 5.

Outro dos objectivos, no âmbito da produção de conhecimento, seria efectuar um estudo e tentar desenvolver um novo modelo de cálculo que, se possível, introduzisse melhorias aos modelos já existentes.

3.1. Placa plana com remoção total de cada camada

O primeiro modelo que se pensou em desenvolver foi o modelo da placa plana, já que é um dos casos mais estudados e tem a vantagem de permitir a comparação dos resultados obtidos numericamente com os resultados obtidos pelo modelo analítico de Moore & Evans [13].

Como enunciado anteriormente, para se proceder à correcção do perfil de tensões residuais é necessário construir o modelo geométrico e simular a remoção das várias camadas de material, sendo que após a remoção de cada camada deve ser registado o valor da tensão relaxada.

Assim, o modelo numérico a desenvolver deve permitir ao utilizador definir as dimensões da placa, o número de camadas a remover e a respectiva espessura de cada camada removida, a malha a utilizar e as propriedades do material da placa. Deve, então, simular a remoção de camadas e registar o valor da tensão em cada passo. Devido a razões de simetria, o modelo da placa representa um quarto da placa e o tipo de elemento utilizado é o Solid-185 com 8 nós do programa ANSYS [17].

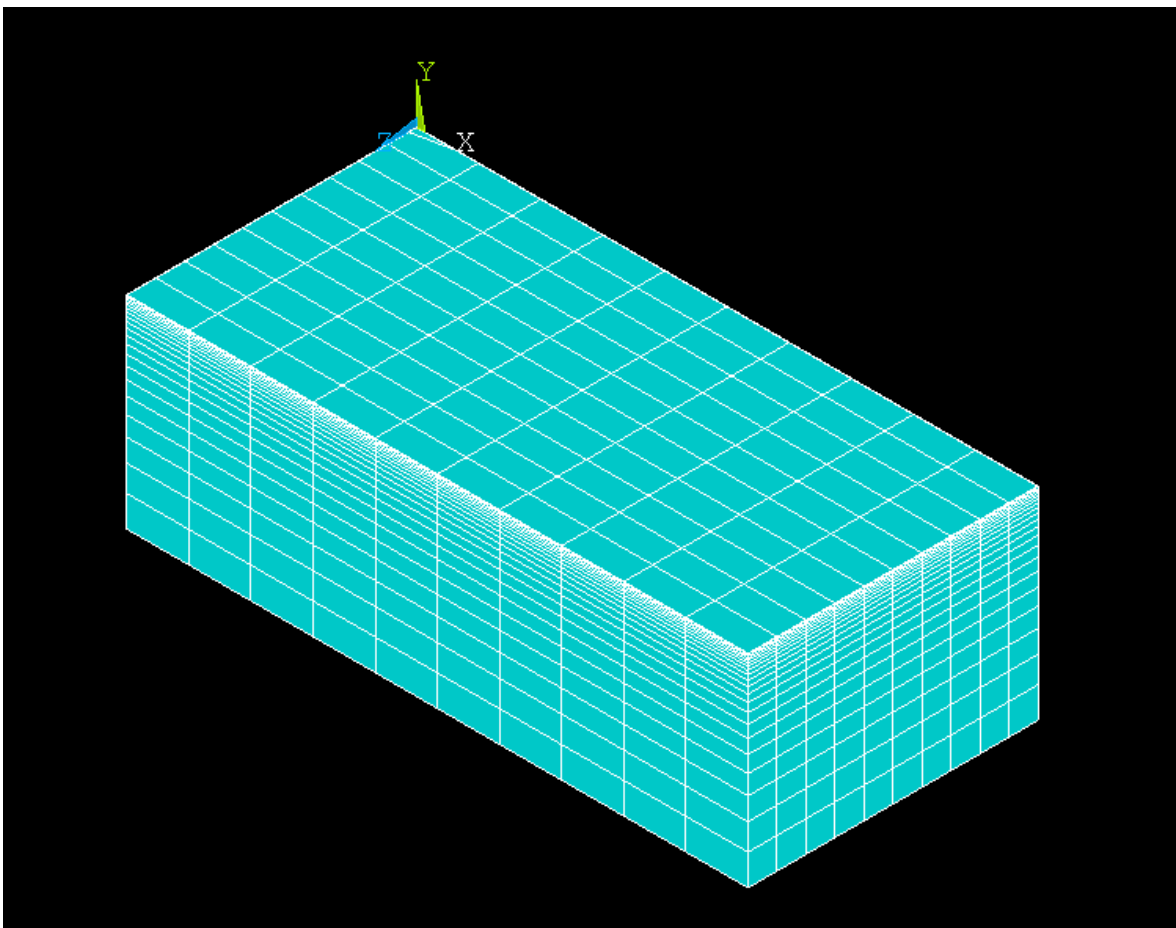


Figura 3.1. Exemplo do modelo de uma placa utilizada numa simulação numérica do processo de remoção de camadas por polimento electro-lítico.

3.2. Placa plana com remoção localizada de cada camada

O modelo da placa plana com remoção localizada é semelhante ao modelo da placa representado em 3.1, diferindo apenas o processo de remoção de camadas que é efectuado no centro da placa sendo as dimensões dessa zona localizada definidas pelo utilizador.

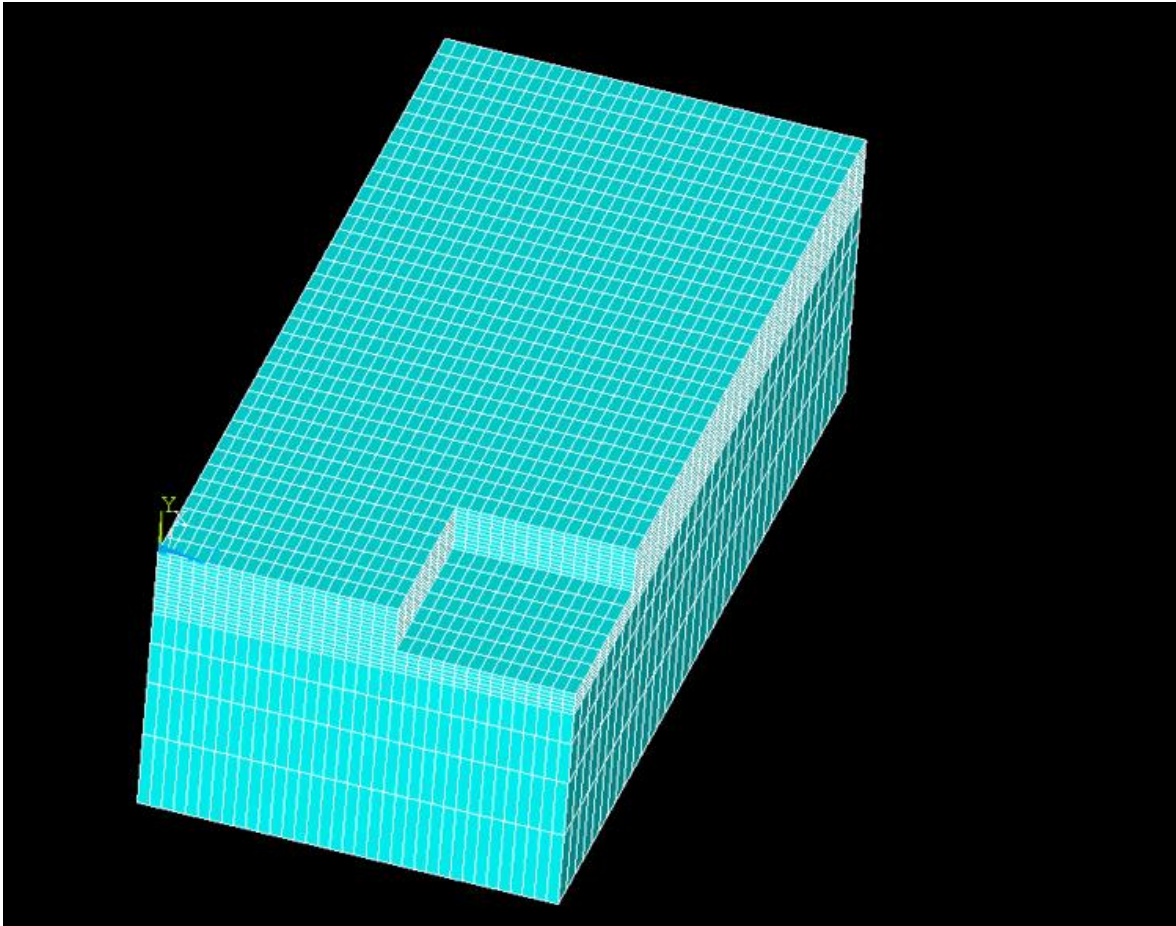


Figura 3.2. Exemplo do modelo de 1/4 de uma placa com a zona a remover no centro da placa, utilizada numa simulação numérica do processo de remoção de camadas por polimento electrolítico.

3.3. Disco oco com remoção plana de cada camada

O modelo de um disco oco surge no âmbito do projecto de investigação onde se enquadra esta dissertação e esta geometria deve permitir ao utilizador definir o raio externo e interno do disco, o comprimento do disco segundo o seu eixo, o número de camadas a remover e a espessura de cada uma. Neste caso, por razões de simetria, apenas se representa metade do disco.

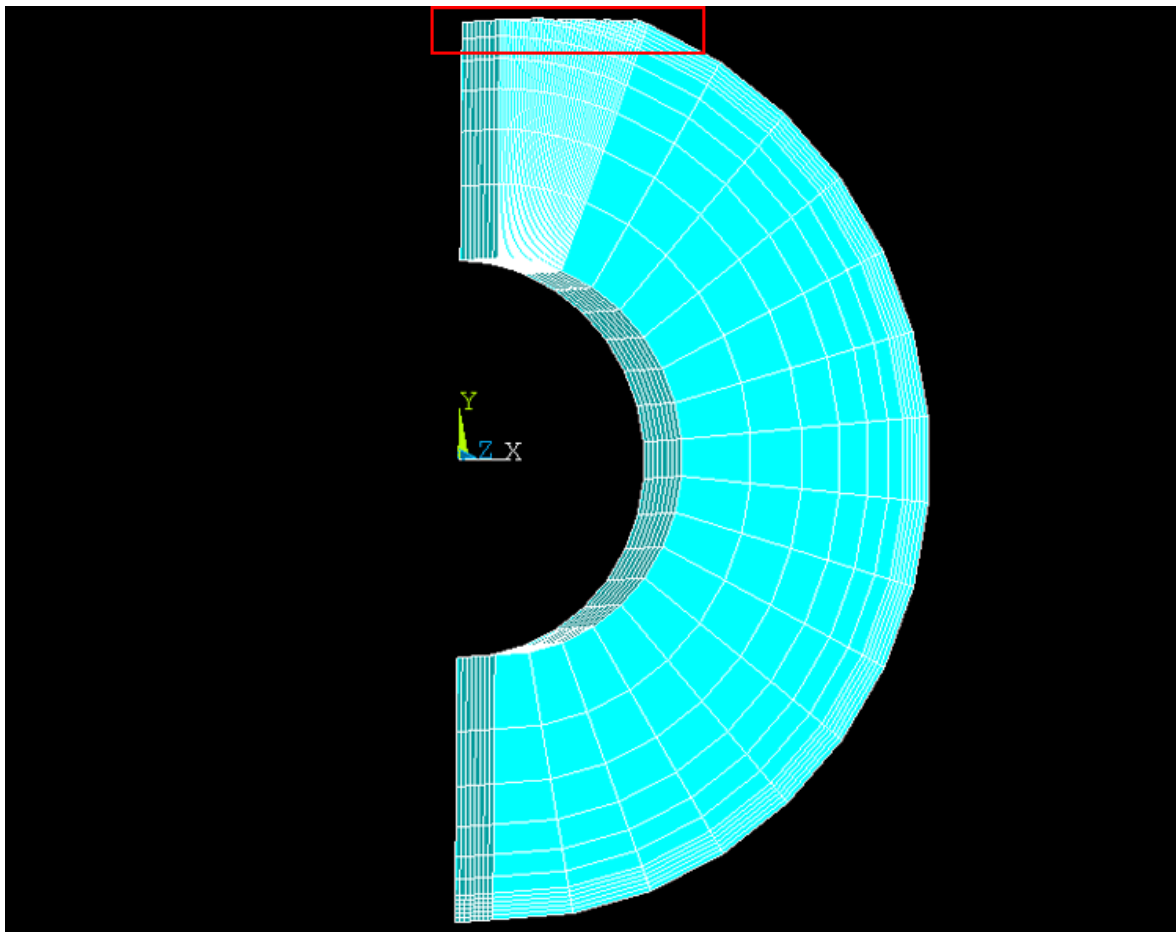


Figura 3.3. Exemplo do modelo de um disco oco com remoção total de camadas de material no topo, utilizado numa simulação numérica do processo de remoção de camadas por polimento electrolytico.

3.4. Disco oco com remoção localizada de cada camada

Este modelo é semelhante ao modelo anterior diferindo apenas pelo facto de a zona de remoção ser localizada. Assim, tal como acontecia na placa, são removidas camadas sucessivas de material localmente como se pode ver na Figura 3.4. A dimensão dessa zona de remoção localizada é também definida pelo utilizador.

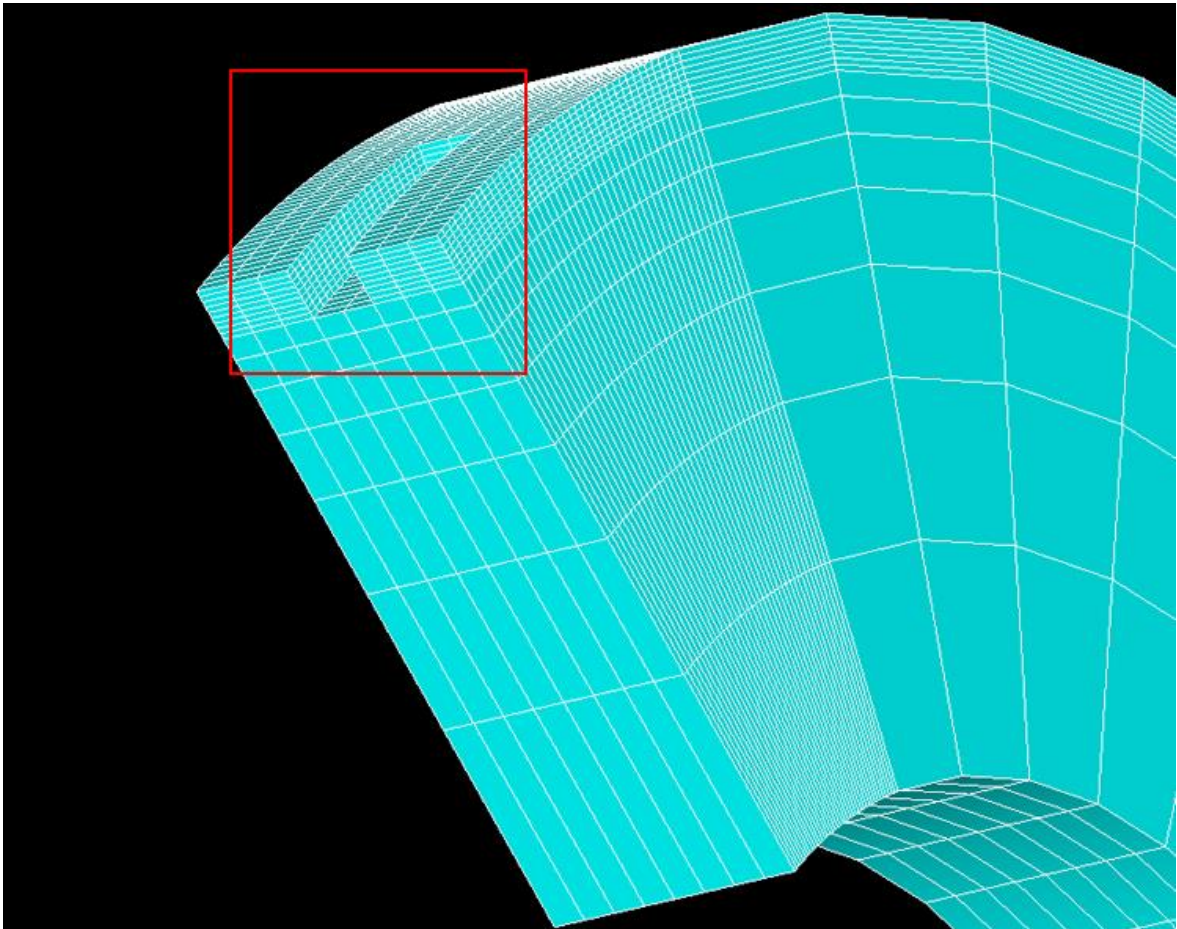


Figura 3.4. Exemplo do modelo de um disco oco com remoção localizada de camadas de material no topo, utilizado numa simulação numérica do processo de remoção de camadas por polimento electrofítico.

4. SOFTWARE INTERACTIVO

Após construir e implementar as quatro geometrias referidas anteriormente nos correspondentes *scripts*, concluiu-se que para aumentar a eficiência e facilitar a análise numérica, que será realizada paralelamente à experimental, era importante a criação de um *software* com um ambiente amigável do utilizador, que permitisse gerar os *scripts* correspondentes à análise pretendida e que permitisse a sua execução em modo “*batch*”. Esta opção permite poupar bastante tempo ao utilizador, já que os *scripts* serão automaticamente executados a partir da linha de comandos do Windows, não sendo necessário abrir o *software* de elementos finitos (ANSYS).

Depois de idealizada a plataforma decidiu-se implementá-la utilizando a linguagem C#. As suas principais características, tal como referido anteriormente são: a fácil utilização, a possibilidade de executar um *script* sem ter de abrir o programa de elementos finitos e ter ilustrações (ao contrário da importação do *script* pelo ANSYS onde são apenas colocadas questões via texto sendo, portanto, menos intuitivo do ponto de vista do utilizador). Nas Figura 4.1 e Figura 4.2 pode ser vista a interface do *software* desenvolvido, no âmbito do presente trabalho.

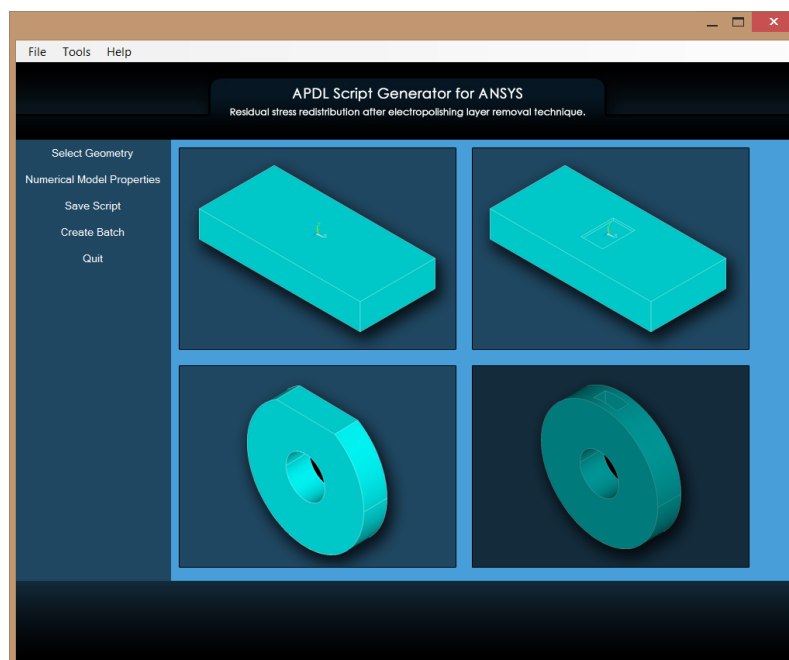


Figura 4.1. Plataforma desenvolvida para gerar os *scripts* correspondentes à análise numérica de uma dada geometria: fase da selecção da geometria pretendida.

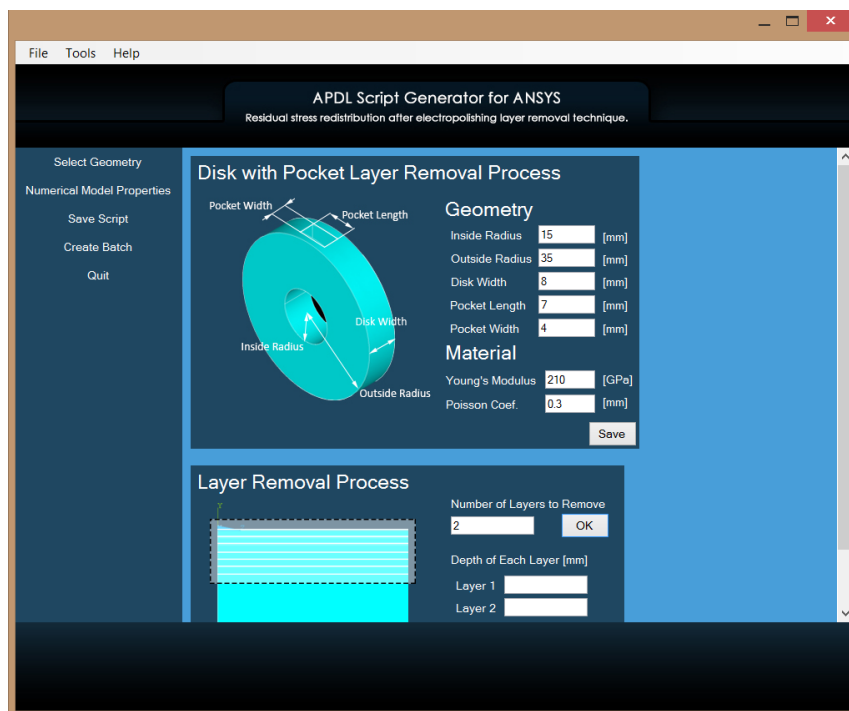


Figura 4.2. Plataforma desenvolvida para gerar os *scripts* correspondentes à análise numérica de uma dada geometria: fase da configuração das propriedades da análise de um disco com remoção localizada das camadas.

5. APLICAÇÃO PARA CORRIGIR O PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS

Como referido anteriormente, para corrigir o perfil de tensões residuais ao longo da profundidade de uma determinada geometria é necessário conhecer a relaxação das tensões com a remoção de camadas. Para tal, é utilizada a simulação numérica, onde se simula o processo de remoção de camadas para uma determinada geometria e se registam os valores da tensão ao longo da profundidade da peça após a remoção de cada camada.

Nos *scripts* de cada modelo foi então programada a escrita num ficheiro, do tipo “*csv – comma separated value*” após a remoção de cada camada, com os valores da tensão ao longo da profundidade da peça. Depois de conhecidos os valores da relaxação das tensões foi necessário criar um programa que interpretasse esses valores de acordo com os modelos numéricos introduzidos nas secções 2.4 e 2.5.

Como estes modelos assentam em operações com matrizes optou-se por utilizar o Excel que com macros desenvolvidas em Visual Basic as manipulassem de acordo com os modelos indicados. Na folha de Excel, que se pode ver na Figura 5.1, pretende-se introduzir a tensão obtida por difracção de raios X a cada profundidade e obter a correcção numérica desse perfil introduzido. Para que tal aconteça, é necessário importar os dados que foram previamente exportados da simulação numérica pelo método dos elementos finitos para uma geometria com as mesmas características da peça onde se pretende efectuar a correcção do perfil de tensão.

Na utilização da folha de correcção deve ter-se em atenção a forma como está construído o modelo numérico já que a profundidade a que a tensão é determinada por DRX deve ser introduzida atendendo à origem do sistema de eixos do modelo.

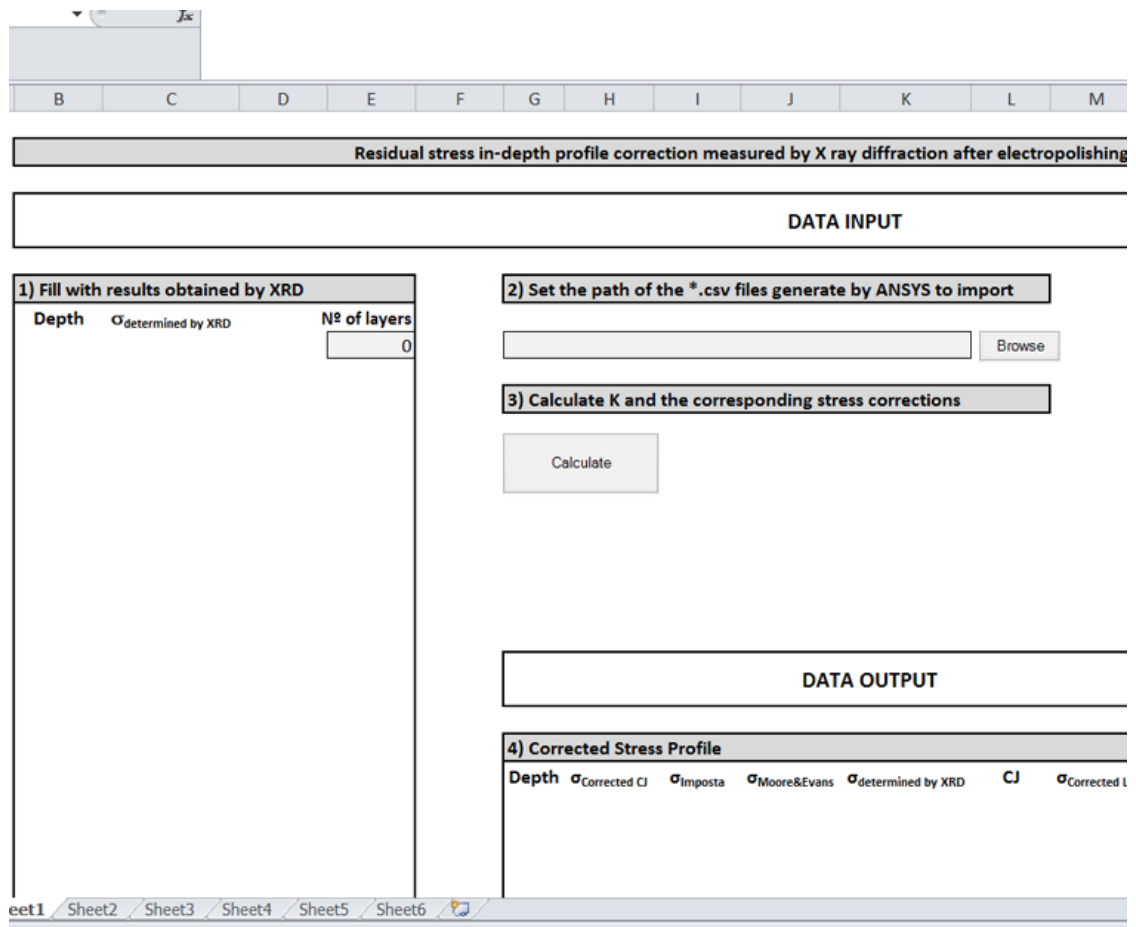


Figura 5.1. Aplicação desenvolvida no Excel que faz a correcção do perfil de tensões residuais obtido experimentalmente por difracção de Raios X.

6. MODELO DO COEFICIENTE J

Além da implementação num software “amigo” do utilizador, dos modelos numéricos propostos em trabalhos anteriores para a correcção do perfil de tensões residuais determinado por difracção de raios X em profundidade, tentou-se ir mais além e desenvolver um modelo próprio.

Tendo como hipótese de partida que a relaxação das tensões residuais depende apenas da geometria e da magnitude das tensões removidas, pensou-se que poderia ser interessante estudar um método de correcção que utilizasse um coeficiente global, em vez de utilizar um somatório de factores de correcção tal como os métodos enunciados nos capítulos 2.4 e 2.5, uma vez que um dos pressupostos do método dos elementos finitos é a presença de um erro associado a cada cálculo. Dessa forma, ao utilizar um coeficiente global de relaxação entre a tensão inicial e a tensão redistribuída, depois de removidas as camadas acima, poderia existir uma redução do erro uma vez que os outros métodos utilizam o somatório dos coeficientes associados a cada uma das camadas removidas, como se encontra representado na Figura 6.1. Mais importante ainda seria a simplificação introduzida, já que ao utilizar um coeficiente global o método utiliza menos variáveis, tornando-se mais eficiente e de mais fácil implementação.

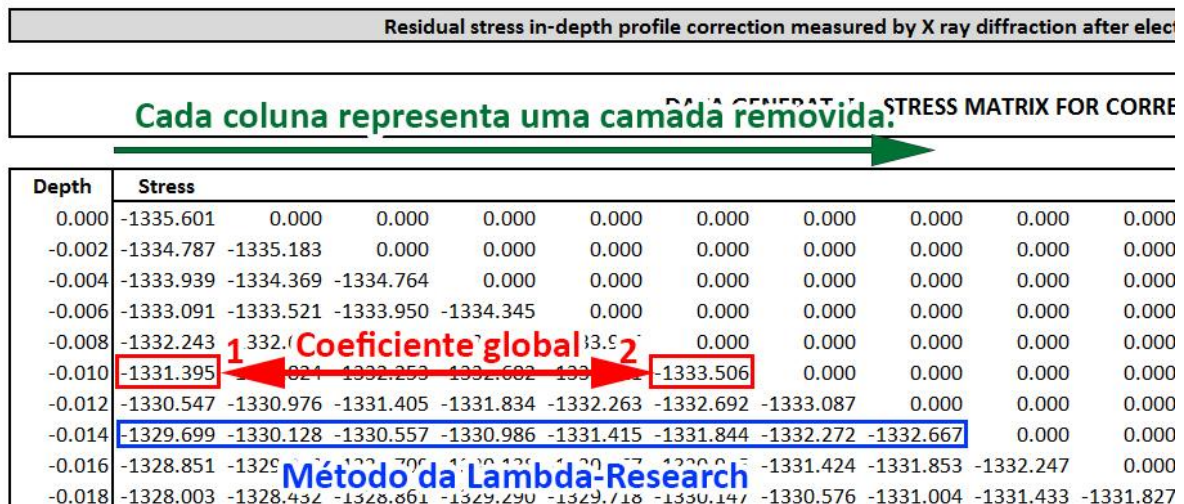


Figura 6.1. Esquema representativo dos valores tidos em conta pelo método do coeficiente J e pelo método da Lambda-Research.

Partindo deste pressuposto, propôs-se a seguinte equação:

$$\sigma_{corrigida} = C_J * \sigma_{determinada\ DRX} \quad (6.1)$$

Sendo C_J o coeficiente de relaxação calculado a partir da simulação pelo método dos elementos finitos, que traduz a relaxação da tensão entre a tensão inicial, imposta numericamente a uma dada profundidade, relativamente à tensão que aí vai passar a existir, depois da remoção de todas as camadas acima dessa profundidade:

$$C_J = \frac{\sigma_{numérica\ imposta}}{\sigma_{numérica\ relaxada}} \quad (6.2)$$

Considere-se então uma placa plana de dimensões: 150mm x 70mm x 24.5mm tal como ilustrada na Figura 6.2.

Utilizando a aplicação desenvolvida, gera-se o script correspondente à geometria de uma placa plana, com remoção total de 20 camadas uniformes de material, sendo a espessura de cada camada 0.05mm.

Vai-se então simular duas situações idênticas, sendo que numa delas se impõe o perfil 1 e noutra, o perfil 2, de acordo com a Figura 6.2.

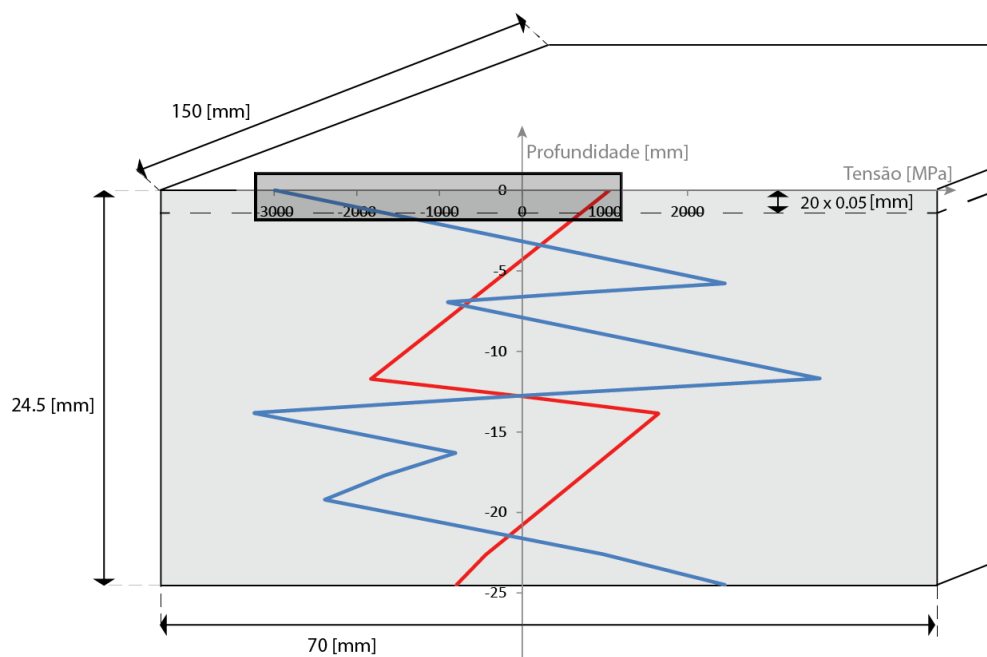


Figura 6.2. Esquema da placa a utilizar neste caso prático. A vermelho encontra-se o perfil 1 e a azul o perfil 2, impostos numericamente.

Supondo que a placa com o perfil de tensão imposto 1, a vermelho, é uma placa existente no laboratório. O objectivo é utilizar o método da difracção de raios X e o polimento electrolítico para conhecer o perfil de tensões residuais existente na placa, ou seja, pretende-se conhecer a curva a vermelho.

Assim, a partir da simulação numérica do processo, vamos determinar o valor das tensões após a remoção de cada camada - diferentes do valor imposto, uma vez que houve relaxação de tensões -, tal como acontece experimentalmente. O objectivo será utilizar a placa com o perfil 2, a azul, para calcular o Coeficiente J e, a partir deste coeficiente, utilizar a equação (6.1) para chegar ao valor da tensão imposta. Caso se verifique, pode-se admitir que o método de correcção é válido. Mais ainda, como este é um caso simples, temos à nossa disposição a correcção analítica de Moore & Evans, que nos vai permitir fazer uma comparação dos métodos de correcção. Será expectável que a correcção obtida pelo modelo analítico de Moore & Evans seja tão próxima quanto possível do valor da tensão imposta (curva a vermelho), assim como do valor obtido a partir da correcção utilizando o método do Coeficiente J. Repare-se que se impôs um perfil 2 tão diferente quanto possível do perfil 1 por forma a demonstrar a independência do perfil de tensão no método de correcção. Os resultados obtidos para esta simulação estão na Tabela 6.1 e resumidos no Gráfico 6.1.

Como se pode ver, tanto a correcção analítica de Moore e Evans como a correcção numérica utilizando o método do Coeficiente J dão resultados muito próximos do valor da tensão imposta, na Tabela 6.2 e Gráfico 6.2 podem-se analisar o erro associado a cada um dos métodos e a sua evolução, com o método desenvolvido por nós a apresentar excelentes resultados. Este erro foi calculado utilizando a equação (6.3).

$$Erro[\%] = \left| \frac{(\sigma_{corrigida} - \sigma_{imposta})}{\sigma_{imposta}} \right| * 100 \quad (6.3)$$

Onde, $\sigma_{corrigida}$ é a tensão determinada por um dos métodos e $\sigma_{imposta}$ a tensão imposta numericamente.

Tabela 6.1. Resultados obtidos após a simulação numérica do processo de remoção de camadas numa placa plana e respectiva correcção utilizando o método de correcção numérica do Coeficiente J e o método de correcção analítica de Moore e Evans.

Depth [mm]	σ_{Imposta} [MPa]	$\sigma_{\text{determined by XRD}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{Corrected CJ}}$ [MPa]	CJ	$\sigma_{\text{Moore\&Evans}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{Corrected LR}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{Corrected VS}}$ [MPa]
0.00	975.1	975.1	975.1	1.000	975.1	975.1	975.1
0.05	963.3	970.8	963.7	0.993	963.0	963.7	963.7
0.10	951.1	966.5	951.6	0.985	951.0	951.6	951.7
0.15	938.8	962.2	939.5	0.976	938.9	939.7	939.7
0.20	926.5	957.7	927.3	0.968	926.9	927.7	927.8
0.25	914.3	953.3	915.0	0.960	914.8	915.8	915.9
0.30	902.0	948.8	902.7	0.951	902.8	903.9	904.0
0.35	889.8	944.3	890.4	0.943	890.7	892.1	892.2
0.40	877.5	939.7	878.0	0.934	878.7	880.3	880.4
0.45	865.2	935.1	865.6	0.926	866.6	868.5	868.7
0.50	853.0	930.4	853.1	0.917	854.6	856.8	857.0
0.55	840.7	925.7	840.5	0.908	842.5	845.1	845.3
0.60	828.4	920.9	827.9	0.899	830.5	833.5	833.7
0.65	816.2	916.1	815.2	0.890	818.4	821.9	822.1
0.70	803.9	911.3	802.5	0.881	806.4	810.3	810.6
0.75	791.6	906.4	789.7	0.871	794.3	798.8	799.1
0.80	779.3	901.4	776.8	0.862	782.2	787.4	787.7
0.85	767.1	896.4	763.8	0.852	770.2	776.0	776.3
0.90	754.8	891.3	750.7	0.842	758.1	764.6	765.0
0.95	742.5	886.2	737.6	0.832	746.1	753.3	753.7
1.00	730.3	881.1	724.4	0.822	734.0	742.0	742.4

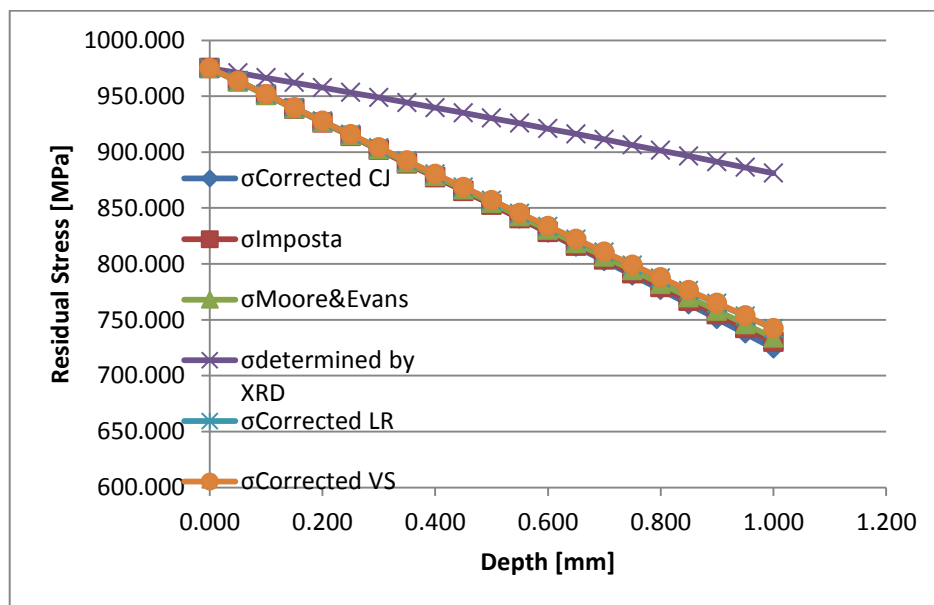


Gráfico 6.1 - Resumo dos resultados obtidos.

Tabela 6.2. Erro associado a cada profundidade.

Depth [mm]	$E(\sigma_{\text{Corrected CJ}})$ [%]	$E(\sigma_{\text{Moore\&Evans}})$ [%]	$E(\sigma_{\text{Corrected LR}})$ [%]	$E(\sigma_{\text{Corrected VS}})$ [%]
0	0	0	0	0
0.05	0.037	0.031	0.037	0.039
0.1	0.053	0.009	0.061	0.065
0.15	0.069	0.015	0.094	0.1
0.2	0.077	0.037	0.127	0.135
0.25	0.079	0.06	0.165	0.175
0.3	0.079	0.085	0.21	0.223
0.35	0.072	0.11	0.26	0.276
0.4	0.059	0.136	0.316	0.335
0.45	0.04	0.163	0.379	0.4
0.5	0.013	0.19	0.449	0.472
0.55	0.02	0.218	0.525	0.551
0.6	0.063	0.247	0.609	0.639
0.65	0.114	0.277	0.702	0.734
0.7	0.175	0.307	0.802	0.837
0.75	0.247	0.339	0.912	0.95
0.8	0.33	0.371	1.031	1.072
0.85	0.427	0.405	1.16	1.205
0.9	0.538	0.439	1.299	1.348
0.95	0.664	0.475	1.45	1.502
1	0.807	0.512	1.613	1.668

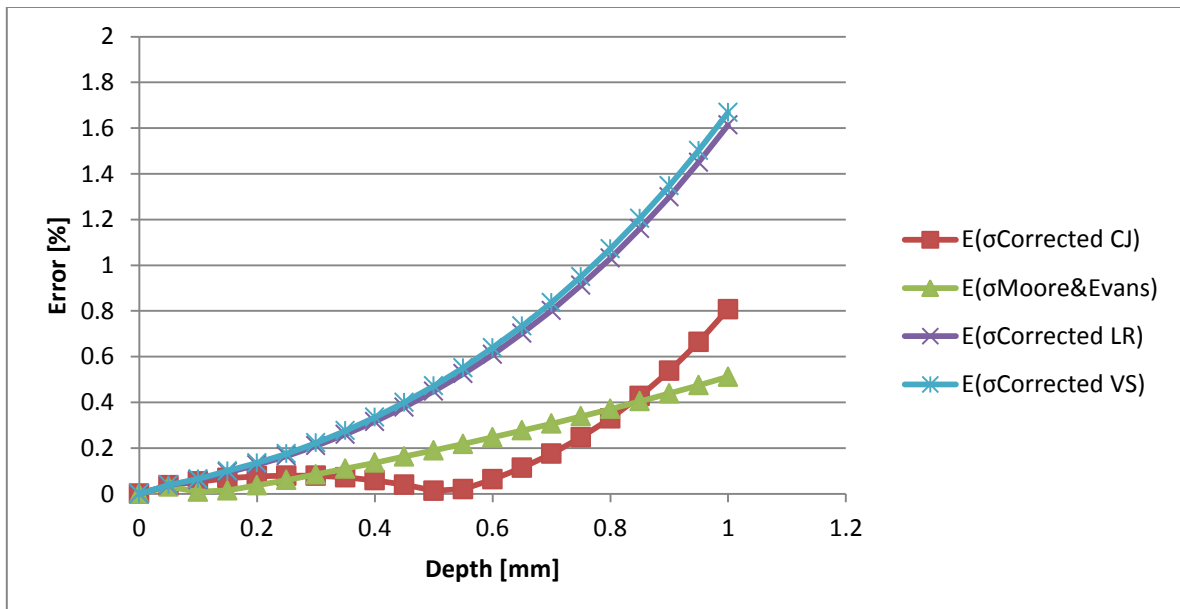


Gráfico 6.2 – Evolução do erro em função da profundidade.

7. CASOS DE ESTUDO

Por forma a validar os métodos de correcção, foram feitos inúmeros testes para os validar e comparar. Neste capítulo pretende-se fazer a comparação dos resultados obtidos entre os diferentes tipos de geometrias para que se possa analisar de forma crítica o comportamento dos métodos de correcção em diversas situações.

7.1. Caso de estudo 1 – Placa plana com remoção total de cada camada

Um dos casos de estudo mais importantes é o da placa plana com remoção total de cada camada, uma vez que para esta situação pode-se utilizar de forma expedita a correcção analítica de Moore & Evans. Assim, e depois de validada a implementação dos vários métodos numéricos, pode-se assumir que estes serão igualmente válidos para qualquer geometria estando apenas dependentes da construção do modelo de elementos finitos. O modelo de cálculo depende apenas da magnitude das tensões e da geometria da peça [14, 15].

O objectivo deste caso de estudo é validar o modelo numérico e os métodos de correcção. Serve ainda para exemplificar como se devem utilizar as ferramentas desenvolvidas no âmbito desta dissertação para fazer a correcção do perfil de tensões residuais obtido em profundidade. Para isso vai ser estudado o efeito de alguns parâmetros na qualidade dos resultados obtidos, como por exemplo a densidade da malha a utilizar.

No âmbito deste caso de estudo foram utilizados os dados de um estudo experimental realizado por Ferreira [18]. A geometria da placa a considerar encontra-se representada na Figura 7.1. Quanto à análise das tensões em profundidade removeram-se 15 camadas de material, estando a profundidade de cada camada representada na Figura 7.2.

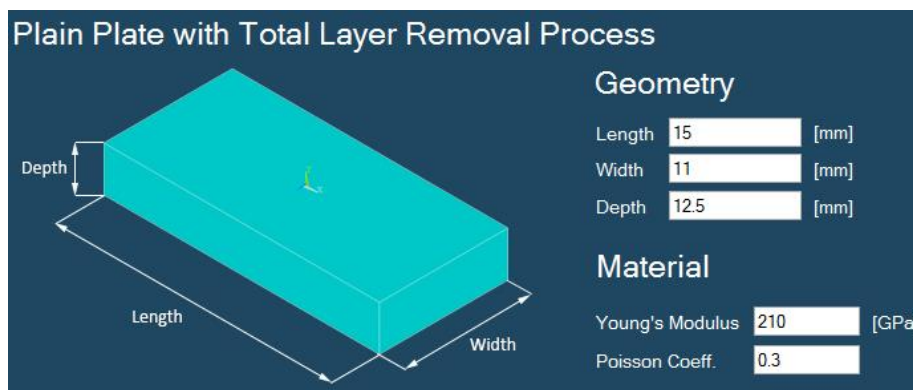


Figura 7.1. Esquema da geometria da placa a utilizar neste caso prático e as respectivas propriedades do material que a constitui.

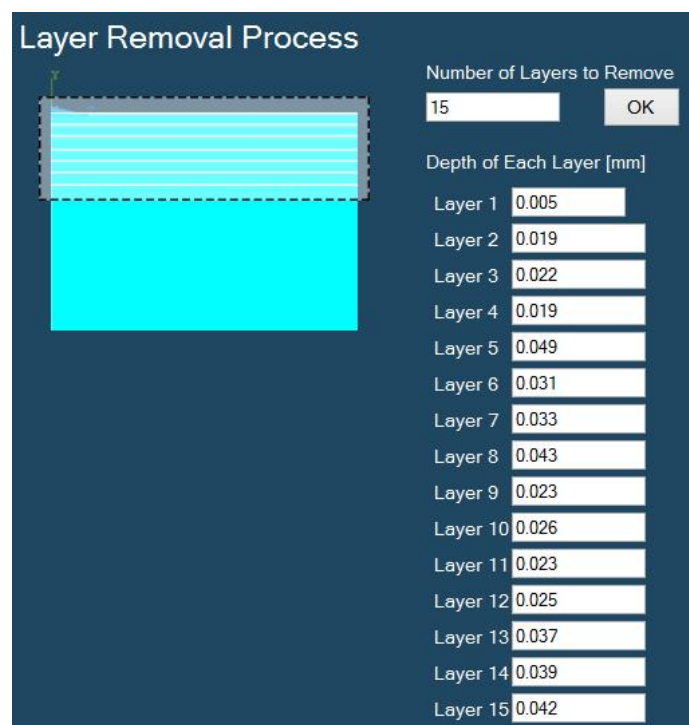


Figura 7.2. Espessura de cada camada removida.

Os dados recolhidos experimentalmente utilizando o método da difracção de raios X combinado com método de remoção por camadas encontram-se na Tabela 7.1

Tabela 7.1. – Caso de estudo 1 - Perfil de tensões residuais obtido experimentalmente utilizando o método da difracção de raios X para a determinação das tensões residuais e a remoção de camadas por polimento electrolítico para obter o perfil de tensão em profundidade.

Depth [mm]	$\sigma_{\text{determined by XRD}}$ [MPa]
0.000	-607.000
0.005	-607.000
0.024	-541.000
0.046	-559.000
0.065	-535.000
0.114	-524.000
0.145	-497.000
0.178	-452.000
0.221	-433.000
0.244	-403.000
0.270	-372.000
0.293	-321.000
0.318	-256.000
0.355	-154.000
0.394	-40.000
0.436	-10.000

Como em qualquer problema que envolva o método dos elementos finitos, quanto mais densa for a malha maior será a precisão dos resultados. No entanto, por uma questão de eficiência, é de extrema importância conhecer os valores da densidade de malha que apresentam uma boa solução em termos de qualidade e tempo de cálculo. Assim, fixou-se um parâmetro e analisou-se a sua variação em função da densidade da malha.

O parâmetro seleccionado foi a tensão corrigida por cada um dos métodos à superfície da placa, após a remoção das quinze camadas de material, ou seja, a 0.436mm de profundidade.

Como ponto de partida começou por se estudar o efeito na tensão corrigida com o aumento do número de elementos de cada camada removida. O estudo foi feito partindo de uma malha com 20 x 20 x 20 x 5 elementos segundo a espessura, comprimento e largura da placa e espessura de cada camada removida, respectivamente. Fez-se variar o número elementos segundo a espessura de cada camada removida de 5 para 2, 10, 15 e 20 elementos, os resultados obtidos encontram-se representados no Gráfico 7.3.

De seguida foi feito um estudo análogo que incidiu sobre o número de elementos a utilizar segundo o comprimento, largura e espessura da placa estando os resultados obtidos no Gráfico 7.4, Gráfico 7.5 e Gráfico 7.6.

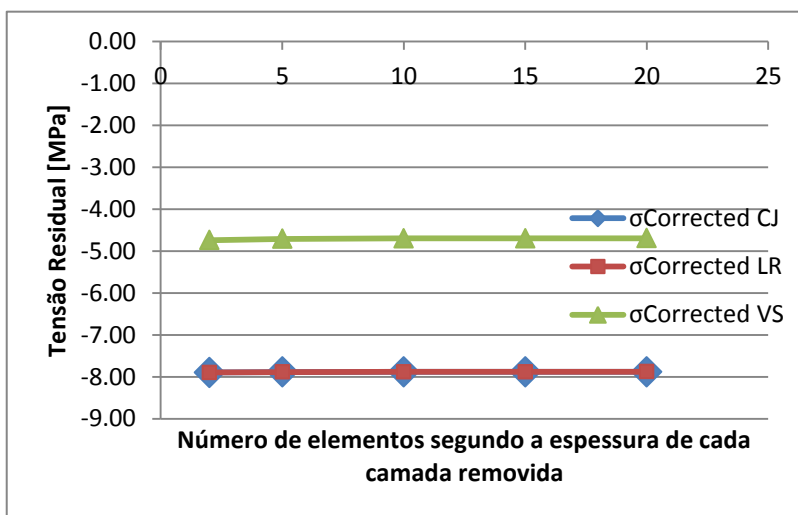


Gráfico 7.3 - Caso de estudo 1 – Evolução do valor da tensão corrigida à superfície da placa após a remoção de 15 camadas de material com o número de elementos utilizado segundo a espessura de cada camada removida.

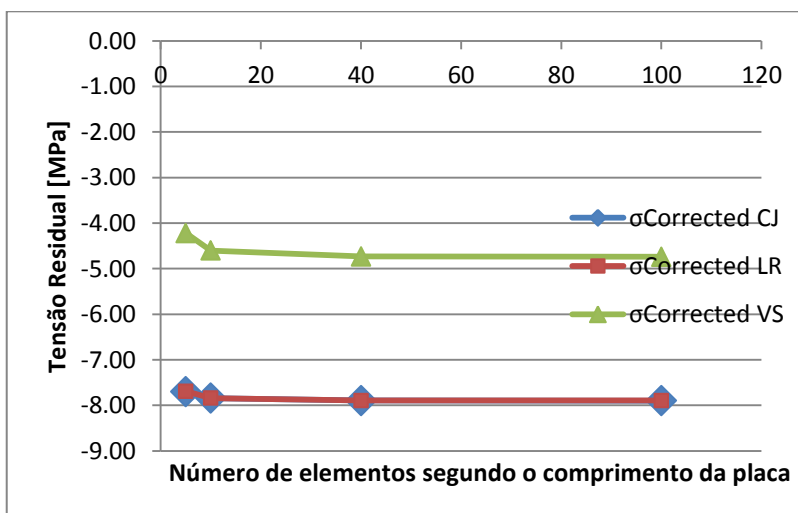


Gráfico 7.4 - Caso de estudo 1 – Evolução do valor da tensão corrigida à superfície da placa após a remoção de 15 camadas de material com o número de elementos utilizado segundo o comprimento da placa.

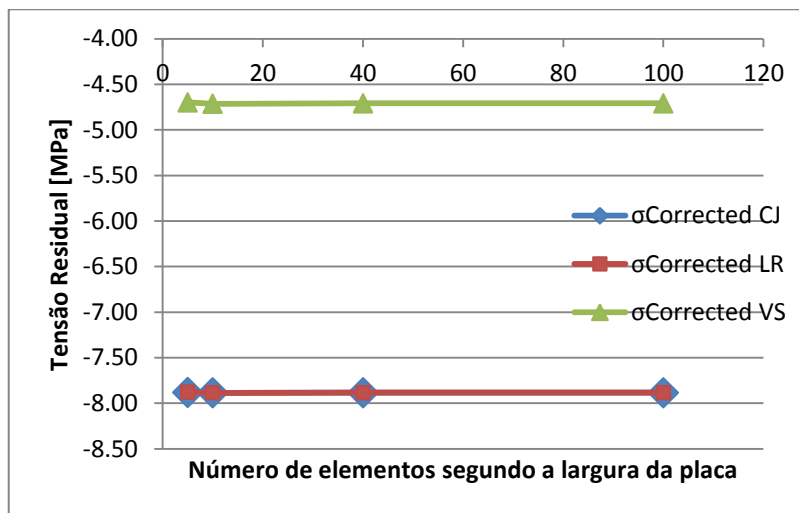


Gráfico 7.5 - Caso de estudo 1 – Evolução do valor da tensão corrigida à superfície da placa após a remoção de 15 camadas de material com o número de elementos utilizado segundo a largura da placa.

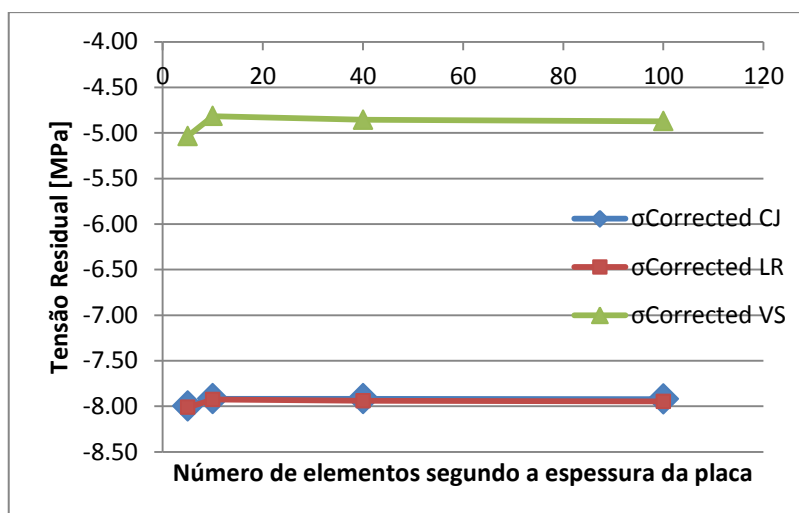


Gráfico 7.6 - Caso de estudo 1 – Evolução do valor da tensão corrigida à superfície da placa após a remoção de 15 camadas de material com o número de elementos utilizado segundo a espessura da placa.

Após este estudo, pode-se concluir que o efeito do aumento do número de elementos não provoca alterações significativas no valor da tensão e que o número adequado de elementos a utilizar será de: 20 x 20 x 20 x 5 elementos segundo o comprimento, largura, profundidade da placa e profundidade de cada camada removida, respectivamente.

Na Tabela 7.2 e no Gráfico 7.7 encontram-se os valores da correcção do perfil de tensões residuais obtido experimentalmente e como se pode analisar pelo Gráfico 7.7 a tensão corrigida utilizando os métodos numéricos acompanha a correcção analítica de

Moore & Evans até cerca de 0.35mm. A partir desta profundidade, há uma tendência para que as curvas de correcção numéricas se aproximem do valor da tensão determinada por difracção de raios X. Esta é uma situação importante já que o modelo analítico apresenta uma tendência para se afastar cada vez mais do valor da tensão determinada por DRX. Após uma análise mais cuidada desta situação, percebeu-se que esta tendência está relacionada com a magnitude da tensão: quando a tensão tende para zero o valor da tensão corrigida é próximo do valor da tensão determinada por DRX. Este é um ponto interessante e abre uma nova questão, será esta uma realidade física? Caso esta dependência da magnitude da tensão represente uma realidade física, então os métodos numéricos podem apresentar uma melhoria significativa relativamente ao modelo analítico.

Tabela 7.2. – Caso de estudo 1 – Valores corrigidos do perfil de tensões residuais obtido experimentalmente.

Depth [mm]	$\sigma_{\text{determined by XRD}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{Moore\&Evans}}$ [MPa]	CJ	$\sigma_{\text{Corrected CJ}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{Corrected LR}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{Corrected VS}}$ [MPa]
0.000	-607.0	-607.0	1.000	-607.0	-607.0	-607.0
0.005	-607.0	-606.0	0.998	-605.6	-605.6	-605.6
0.024	-541.0	-536.5	0.988	-534.5	-534.5	-534.1
0.046	-559.0	-550.7	0.977	-545.9	-545.9	-546.1
0.065	-535.0	-523.4	0.967	-517.4	-517.4	-517.0
0.114	-524.0	-504.1	0.942	-493.8	-493.7	-493.4
0.145	-497.0	-472.1	0.927	-460.5	-460.5	-459.5
0.178	-452.0	-422.1	0.910	-411.5	-411.5	-409.4
0.221	-433.0	-397.1	0.889	-385.1	-385.0	-383.9
0.244	-403.0	-364.0	0.878	-353.8	-353.7	-351.9
0.270	-372.0	-329.9	0.865	-322.0	-321.9	-319.8
0.293	-321.0	-276.4	0.855	-274.3	-274.2	-270.5
0.318	-256.0	-209.2	0.843	-215.8	-215.7	-210.6
0.355	-154.0	-104.9	0.826	-127.1	-127.1	-118.2
0.394	-40.0	10.1	0.808	-32.3	-32.3	-21.3
0.436	-10.0	40.2	0.788	-7.9	-7.9	-4.7

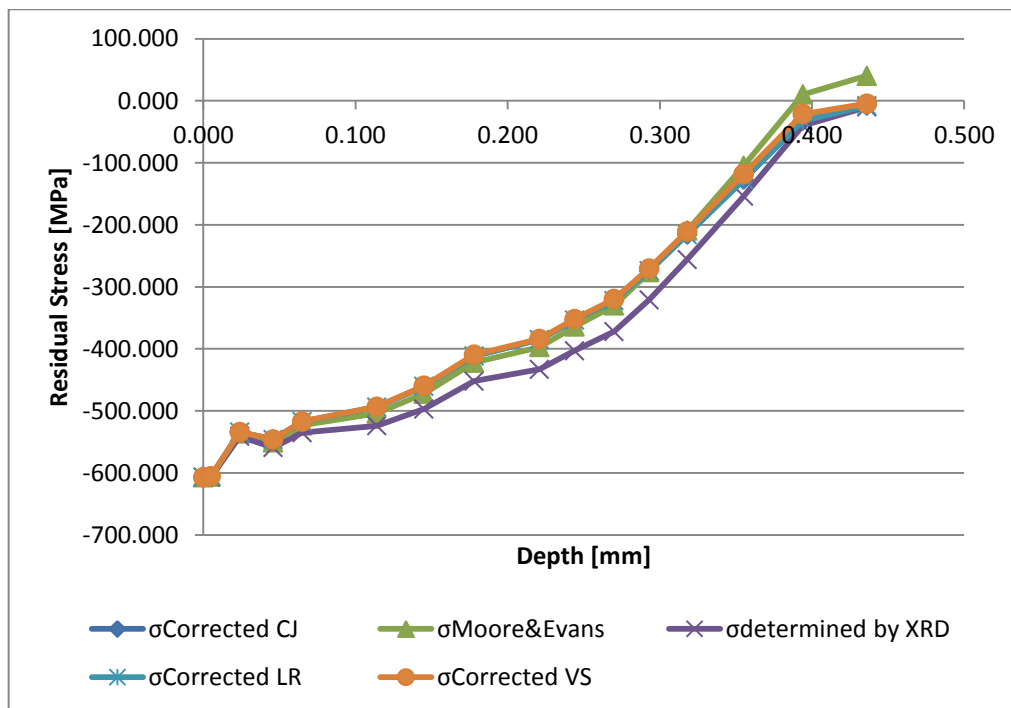


Gráfico 7.7 - Caso de estudo 1 – Valores corrigidos do perfil de tensões residuais obtido experimentalmente.

7.2. Caso de estudo 2 – Placa plana com remoção localizada de cada camada

Para esta geometria foi também realizado um ensaio experimental onde se removeram 12 camadas de material e cujos valores obtidos se encontram na Tabela 7.3. A placa tinha dimensões: 300mm x 60mm x 12.2mm de comprimento, largura e profundidade, respectivamente e a zona localizada de remoção encontrava-se no centro do provete e tinha 50mm de comprimento e 40mm de largura. Este provete é de uma lâmina de uma mola de suspensão utilizada em veículos, em aço grenalhado.

Tabela 7.3. – Caso de estudo 2 - Perfil de tensões residuais obtido experimentalmente utilizando o método da difracção de raios X para a determinação das tensões residuais combinado com o método de remoção por camadas para obter o perfil de tensão em profundidade.

Depth [mm]	$\sigma_{\text{determined by XRD}}$ [MPa]
0.000	-870.000
-0.005	-870.000
-0.057	-1146.000
-0.134	-1288.000
-0.206	-1379.000
-0.305	-1050.000
-0.401	-766.000
-0.495	-467.000
-0.601	-276.000
-0.698	-244.000
-0.793	-254.000
-0.915	-199.000
-1.007	-192.000

Também neste caso, o parâmetro seleccionado para fazer o estudo do refinamento da malha foi a tensão corrigida por cada um dos métodos após a remoção das 12 camadas de material à superfície da placa, a 1.007mm de profundidade. Optou-se por uma malha com 30 x 20 x 10 elementos segundo o comprimento, largura e espessura da placa e 15 elementos segundo a espessura de cada camada removida

Os resultados das correcções encontram-se na Tabela 7.4 e Gráfico 7.8 e, apesar de termos utilizado a correcção de Moore e Evans [13], a correcção não pode ser aplicada a este caso, já que não há remoção total. Apesar disso, podemos ver o erro que seria cometido ao considerar este método de correcção.

Quanto à correcção efectiva, se analisarmos o coeficiente CJ da Tabela 7.4 vemos que há uma diminuição deste parâmetro com o aumento da profundidade. Seria então de esperar um aumento proporcional na distância entre a curva da tensão determinada por DRX e a curva da tensão corrigida numericamente. No entanto, tal não se verifica e a justificação relaciona-se com a diminuição da magnitude da tensão à medida que se aumenta a profundidade.

Tabela 7.4. – Caso de estudo 2 - Valores corrigidos do perfil de tensões residuais obtido experimentalmente.

Depth	$\sigma_{\text{Corrected CJ}}$	$\sigma_{\text{Moore\&Evans}}$	$\sigma_{\text{determined by XRD}}$	CJ	$\sigma_{\text{Corrected LR}}$	$\sigma_{\text{Corrected VS}}$
0.000	-870.000	-870.000	-870.000	1.000	-870.000	-870.000
0.005	-869.134	-870.000	-870.000	0.999	-869.134	-869.135
0.057	-1130.850	-1129.000	-1146.000	0.987	-1130.869	-1132.773
0.134	-1247.035	-1240.000	-1288.000	0.968	-1247.416	-1249.979
0.206	-1310.874	-1300.000	-1379.000	0.951	-1312.182	-1314.972
0.305	-972.265	-932.000	-1050.000	0.926	-974.779	-963.938
0.401	-690.490	-620.000	-766.000	0.901	-694.026	-681.695
0.495	-409.467	-303.000	-467.000	0.877	-413.059	-396.688
0.601	-234.079	-101.000	-276.000	0.848	-237.470	-224.850
0.698	-200.270	-63.000	-244.000	0.821	-204.619	-202.641
0.793	-201.417	-67.000	-254.000	0.793	-207.691	-209.286
0.915	-150.283	-5.000	-199.000	0.755	-157.372	-152.410
1.007	-139.332	6.000	-192.000	0.726	-148.388	-148.364

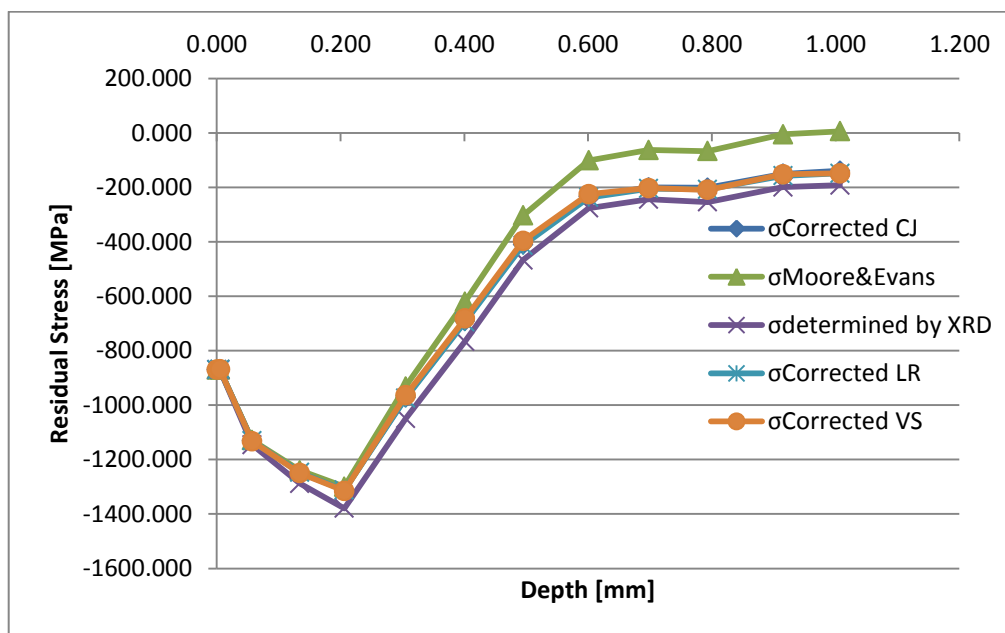


Gráfico 7.8 - Caso de estudo 2 – Valores corrigidos do perfil de tensões residuais obtido experimentalmente.

7.3. Caso de estudo 3 – Disco oco com remoção plana de cada camada

Para este caso de estudo foi ensaiado um provete cilíndrico [19] com um raio interno de 16mm e externo de 35mm. A espessura do disco tinha 7mm e foram removidas 13 camadas de acordo com a Figura 7.3.

Os dados obtidos experimentalmente, após remoção de cada camada e a correcção do perfil de tensões obtido experimentalmente são apresentados na Figura 7.3 e Gráfico 7.9.

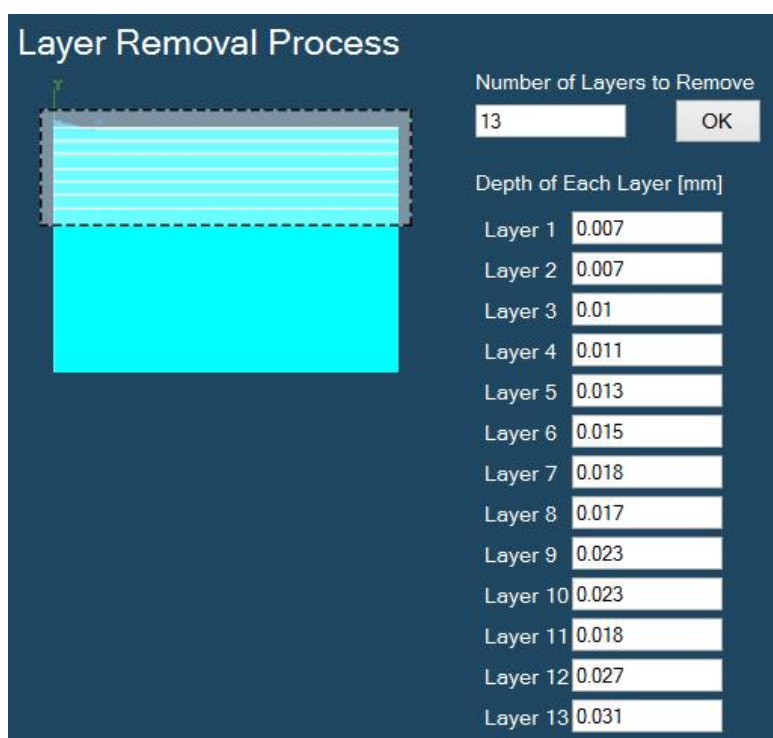


Figura 7.3. Caso de estudo 3 - Espessura de cada camada removida.

Tabela 7.5. – Caso de estudo 3 - Valores corrigidos do perfil de tensões residuais obtido experimentalmente.

Depth [mm]	$\sigma_{\text{Corrected CJ}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{determined by XRD}}$ [MPa]	CJ	$\sigma_{\text{Corrected LR}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{Corrected VS}}$ [MPa]
0.000	-128.140	-128.140	1.000	-128.140	-128.140
0.007	-125.203	-128.140	0.977	-125.203	-125.169
0.014	-69.455	-71.870	0.966	-69.438	-68.455
0.024	78.084	82.220	0.950	78.020	81.953
0.035	98.030	104.570	0.937	97.887	98.552
0.048	72.667	78.540	0.925	72.505	71.450
0.063	56.619	61.960	0.914	56.447	55.663
0.081	50.984	56.860	0.897	50.751	50.428
0.098	51.956	58.320	0.891	51.698	51.735
0.121	27.939	30.740	0.909	27.882	26.559
0.144	32.259	35.850	0.900	32.169	32.404
0.162	23.795	27.570	0.863	23.616	22.974
0.189	20.175	22.860	0.883	20.099	19.781
0.220	23.022	26.500	0.869	22.890	23.115

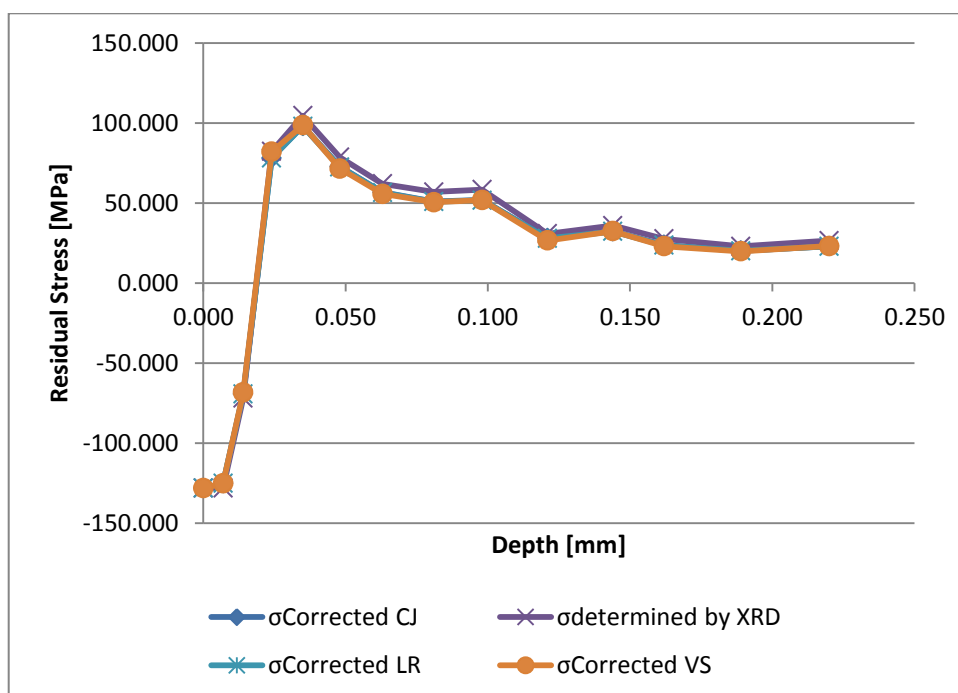


Gráfico 7.9 - Caso de estudo 3 – Valores corrigidos do perfil de tensões residuais obtido experimentalmente.

Se analisarmos os resultados obtidos, podemos verificar que nesta situação o valor da correção é pouco significativa, estando os valores das tensões corrigidas muito próximos das tensões determinadas por DRX.

7.4. Caso de estudo 4 – Disco oco com remoção localizada de cada camada

Para esta geometria não foi possível realizar o ensaio experimental, no entanto, fez-se uma análise numérica. Essa análise numérica consiste em duas simulações pelo método dos elementos finitos, sendo que em cada uma das análises se impõe na peça um perfil de tensão distinto. O objectivo é utilizar os resultados obtidos através de uma dessas simulações para determinar a tensão que seria determinada por difracção de raios X, caso tivesse sido realizado o ensaio experimental. Posteriormente, com o outro perfil de tensão inicial imposto, vão ser utilizados os dados da simulação para calcular os coeficientes necessários à correcção. O objectivo será comparar o perfil corrigido com a tensão imposta e quanto mais próximo for o perfil corrigido da tensão imposta, mais preciso será o método de correcção. A geometria do disco encontra-se representada na Figura 7.4 e foram removidas 9 camadas, cada uma com 0.01mm de espessura.

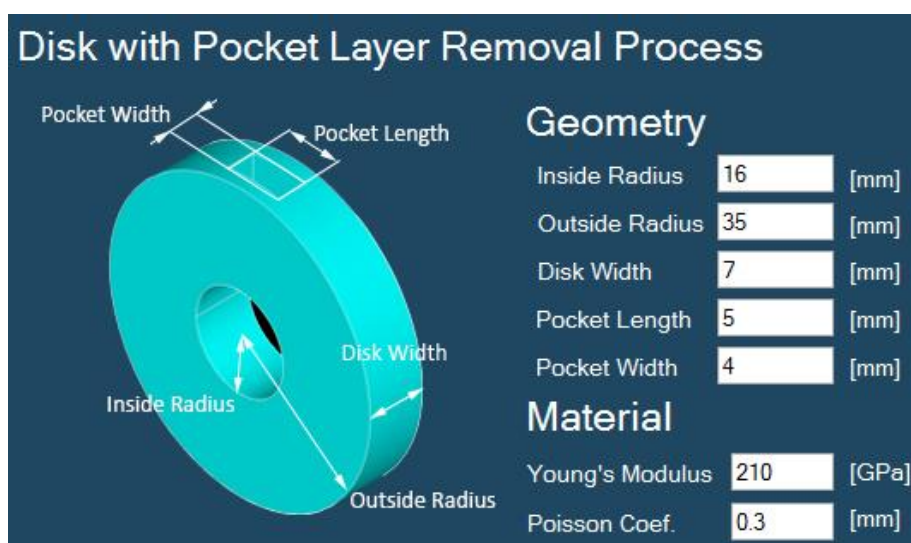


Figura 7.4. Caso de estudo 4 – Geometria e características do disco.

Vão-se fazer duas simulações, com perfis de tensão diferentes. Numa das simulações retira-se apenas o valor da tensão redistribuída após a remoção de cada camada e, de seguida, aplica-se a correcção que é calculada com o outro perfil. O perfil de tensão imposto e o perfil obtido por simulação do processo de remoção de camadas encontram-se representados no Gráfico 7.10. A diferença nesta situação é que a tensão imposta é

conhecida, ou seja, espera-se que o perfil corrigido, após a redistribuição das tensões, seja tanto mais próximo quanto possível do perfil imposto. No Gráfico 7.11 estão os valores da correção e como se pode ver há uma tendência para se afastarem cada vez mais da tensão determinada por DRX, isto verifica-se porque na presente situação a remoção não foi profunda o suficiente para que a tensão começasse a tender para zero.

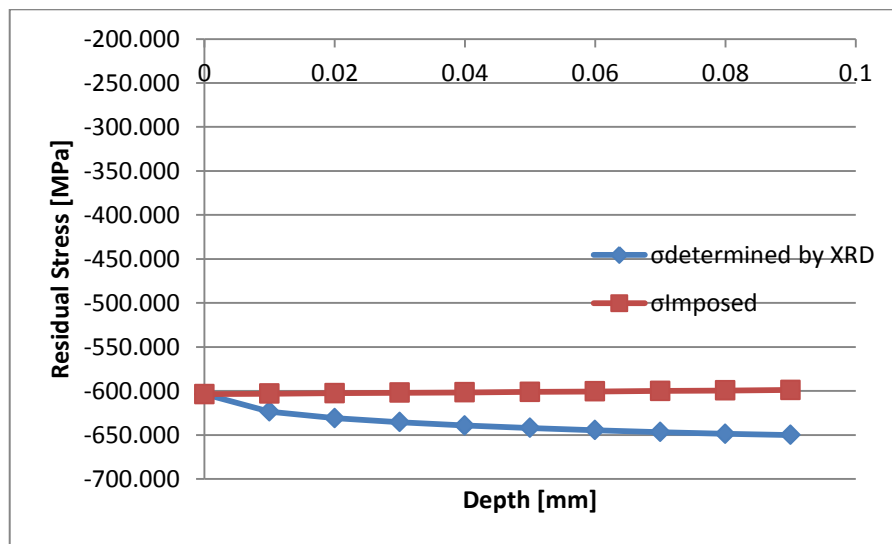


Gráfico 7.10 - Caso de estudo 4 – Valores da tensão determinada por DRX após o processo de remoção de camadas e o correspondente perfil de tensão imposto, valores obtidos numericamente.

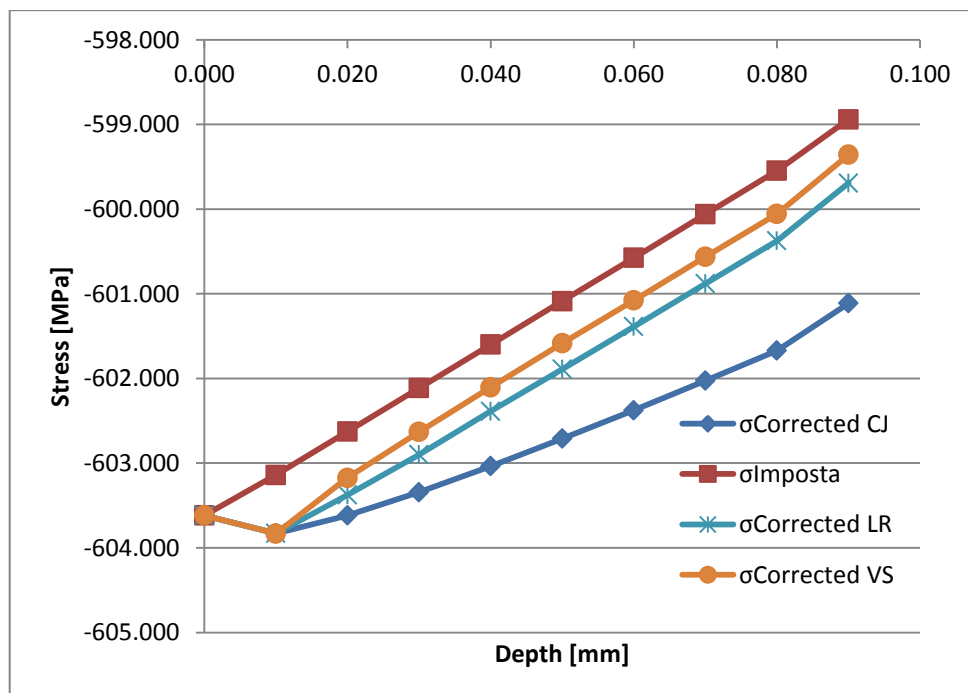


Gráfico 7.11 - Caso de estudo 4 – Valores corrigidos do perfil de tensões residuais obtido numericamente.

8. CONCLUSÕES

O objectivo principal deste trabalho foi o estudo e implementação de um método numérico para corrigir o perfil de tensões residuais obtido em profundidade para geometrias comuns, como o caso da placa plana e do disco. A criação do *software* de correcção em Excel-VBA deixa também em aberto a possibilidade de análises para qualquer geometria ficando apenas pendente da criação de mais modelos.

Com o decorrer do trabalho, foram surgindo objectivos paralelos que se consideram relevantes, como a criação do *software* para gerar o código APDL que possibilita fazer várias simulações através da linha de comandos do Windows, tornando assim as análises mais eficientes e muito mais simples, do ponto de vista do utilizador.

Quanto ao estudo dos métodos de correcção existentes, verificou-se que o modelo analítico de Moore & Evans deve apenas ser utilizado quando são respeitadas as geometrias simples para as quais foi desenvolvido. Já os métodos numéricos implementados, demonstraram ser bastante versáteis e com correcções muito precisas. É ainda de salientar que as diferenças entre as correcções calculadas pelos diferentes modelos numéricos são bastante baixas.

Concluiu-se ainda que o método do Coeficiente J é adequado para análises a profundidades típicas afectadas pelos tratamentos superficiais, entre algumas centenas de micrómetros e o milímetro. No caso de a remoção de camadas ser usada para aceder a profundidades mais elevadas, típicas de uma análise por difracção de neutrões, por exemplo, a utilização de um coeficiente global pode resultar nalguma perda de precisão.

Em suma, esta forma de correcção numérica apresenta-se como uma solução muito prática e polivalente dado que permite a sua utilização para todas as geometrias independentemente da sua complexidade.

9. PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO

A presente dissertação levanta uma questão pertinente e de maior relevância para trabalhos futuros. Ao longo deste trabalho verificou-se que havia uma discrepância nos resultados entre o modelo analítico e os modelos numéricos no que toca à influência da magnitude das tensões. Especificamente, o modelo analítico de Moore & Evans apresenta uma evolução dependente da profundidade a que se está a efectuar a correcção. Assim, o modelo analítico tem em conta a influência da relaxação das tensões nas camadas acima e verifica-se que quanto maior for a profundidade mais distantes estão as curvas da tensão determinada experimentalmente e da tensão corrigida. Por sua vez, verificou-se que os modelos numéricos apresentam uma evolução que depende da profundidade e da magnitude das tensões, então quando a tensão tende para zero, a curva da tensão corrigida tende para a curva da tensão determinada experimentalmente.

Do supracitado, a questão que ficou em aberto foi, então, conhecer se a relaxação das tensões tem efectivamente uma dependência da magnitude das tensões ou se este é um ponto fraco da correcção numérica. Caso se verifique que a dependência da magnitude das tensões representa uma realidade física, então os modelos numéricos introduzem uma melhoria significativa relativamente ao modelo analítico.

Seria ainda interessante combinar as duas aplicações desenvolvidas, a aplicação para gerar os scripts APDL e a aplicação que faz a correcção numa única aplicação. Outra aplicação importante do modelo desenvolvido será a análise de outras geometrias de remoção de camadas, como por exemplo, um modelo para a placa plana com remoção localizada descentrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. R. James e J. Lu, Handbook of Measurement of Residual Stresses, United States: The Fairmont Press, Inc., 1996.
- [2] G. Maeder, L. Castex, V. Djafari e P. Poupeau, *précontraintes et traitements superficiels techniques de l'ingénieur, Traité Métallurgie, M1180:1-26, M1181:1-8*, 1991.
- [3] H.K.D.H. Bhadeshia, Material Factors, in Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International, Ohio, 2002.
- [4] A. C. Batista, Deterioração por fadiga de contacto de engrenagens tratadas superficialmente, PhD thesis, Universidade de Coimbra, Portugal, 306 páginas, 1997.
- [5] G. Maeder, *Mesure de contraintes résiduelles par diffraction X. Applications Revue Française de Mécanique*, 82: 57-70, 1982.
- [6] M. E., W. H. e W. V., “Zur zweckmäßigen definition von eigenspannungen”, *Härtereitechnische Mitteilungen*, Vol. 28, pp. 201-211, 1973.
- [7] A. Cavaleiro, *Apontamentos da disciplina de Ciência e Engenharia de Materiais II*, Coimbra: Universidade de Coimbra, 2010.
- [8] N. Tebedge, G. A. Alpsten e L. Tall, Measurement of residual stresses a study of methods, Bethlehem, Pennsylvania: Lehigh University, 1971.
- [9] P. Withers e H. Bhadeshia, “Residual Stress Part 1 - Measurement techniques,” *Materials Science and Technology*, vol. 17., vol. 17, 2001.
- [10] B. D. Cullity, Elements of X-Ray Diffraction, Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc..
- [11] N. I.C. e C. J.B., *Residual Stress*, Springer-Verlag, 1987.
- [12] C. L., L. J.L., M. G. e S. J.M., *Détermination des Contraintes Résiduelles par Diffraction des Rayons X, Publications Scientifiques et Techniques*, Vol. 22, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, França, 1981.
- [13] M. Moore e W. Evans, “Mathematical correction for stress in removed layers in X-Ray diffraction - Residual stress analysis,” *SAE Transactions*, vol. 66, 1958.
- [14] Lambda-Research Inc., “Finite Element Correction for Stress Relaxation in Complex Geometries,” *Diffraction Notes*, n.º 17, 1996.
- [15] V. Savaria, F. Bridier e P. Bocher, “Computational Quantification and Correction of the Errors Induced by Layer Removal for Subsurface Residual Stress Measurements,” *International Journal of Mechanical Sciences*, n.º 64, 2012.
- [16] A. Inc, ANSYS Mechanical APDL command reference, 2010.
- [17] Ansys Inc., Element Reference, 2009.
- [18] M. Ferreira, “Determinação de leis tensão-deformação de materiais tratados superficialmente,” Universidade de Coimbra, 2001.

- [19] A. C. Batista, D. F. C. Peixoto, J. P. Nobre, L. Coelho, D. M. Ramos, L. A. A. Ferreira e P. M. S. T. Castro, "Wear and surface residual stress evolution on twin-disc tests of rail/wheel steels," *Materials Science Forum Vols. 768-769*, pp. 707-713, 2014.
- [20] R. M. D. Guimarães, A técnica do furo incremental na determinação de tensões residuais em ligas de alumínio: Estudo do efeito da furação a alta velocidade, Coimbra: Tese de Mestrado em Engenharia Física - Universidade de Coimbra, 2012.
- [21] J. P. Nobre, A. C. Batista, L. M. Coelho e A. M. Dias, "Two Experimental Methods to Determining Stress–Strain Behavior of Work-hardened Surface Layers of Metallic Components," 2010.