

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

NATANY DAYANI DE SOUZA ASSAI

ESTUDO DA RELAXAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM CONDIÇÕES
DE CARREGAMENTO CÍCLICO DA LIGA DE ALUMÍNIO 7050 – T7451

PONTA GROSSA

2014

NATANY DAYANI DE SOUZA ASSAI

**ESTUDO DA RELAXAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM CONDIÇÕES
DE CARREGAMENTO CÍCLICO DA LIGA DE ALUMÍNIO 7050 – T7451**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais como requisito para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS.

Orientador: Prof. Dr. André Luis
Moreira de Carvalho

PONTA GROSSA

2014

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

A844 Assai, Natany Dayani de Souza
Estudo da relaxação de tensões
residuais em condições de carregamento
cíclico da liga de alumínio 7050 - T7451/
Natany Dayani de Souza Assai. Ponta
Grossa, 2014.
83f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e
Ciência de Materiais - Área de
Concentração: Desenvolvimento e
Caracterização de Materiais), Universidade
Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. André Luis
Moreira de Carvalho.

1.Liga de Alumínio 7050- T7451.
2.Tensão residual de relaxação. 3.Difração
de raios X Processo de shot peening.
I.Carvalho, André Luis Moreira de. II.
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Mestrado em Engenharia e Ciência de
Materiais. III. T.

CDD: 669.722

NATANY DAYANI DE SOUZA ASSAI

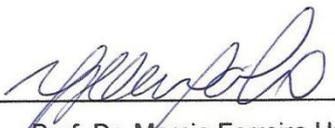
ESTUDO DA RELAXAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM
CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO CÍCLICO DA LIGA DE ALUMÍNIO 7050 –
T7451

Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia e Ciência de Materiais na Universidade Estadual de Ponta Grossa,
área de Desenvolvimento e caracterização de Materiais.

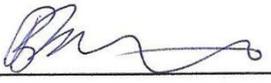
Ponta Grossa, 27 de agosto de 2014.



Prof. Dr. André Luis Moreira de Carvalho – Orientador
Doutor em Engenharia de Materiais
Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG/PR



Prof. Dr. Marcio Ferreira Hupalo
Doutor em Engenharia Metalúrgica
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG/PR



Prof. Dr. Viktor Pastoukhov
Doutor em Ciências Físicas e Matemáticas
Escola de Engenharia de Lorena, EEL-USP /SP

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me permitir chegar até aqui com o auxílio necessário e a certeza de cumprir essa tarefa.

Aos meus pais, Vania e Marcos, que não apenas me apoiaram como sempre cultivaram em minha cabeça a importância da educação como ferramenta de transformação da vida. Sem eles nada disso seria possível.

Ao meu namorado e companheiro Matheus, pela paciência, carinho e incentivo em todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Luis Moreira de Carvalho, pela oportunidade que me foi dada, auxílio na realização deste trabalho e por ceder as amostras utilizadas neste projeto.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais e a UEPG.

A todos que diretamente ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

O degrau de uma escada não serve simplesmente para que alguém permaneça em cima dele, destina-se a sustentar o pé de um homem pelo tempo suficiente para que ele coloque o outro um pouco mais alto.

(Thomas Huxley)

RESUMO

As tensões residuais podem diminuir e se redistribuir por meio de um processo chamado relaxação. A relaxação das tensões residuais é um fenômeno importante no que se refere à previsão da resistência à fadiga dos materiais e pode ocorrer devido a carga mecânica estática, térmica, cíclica como efeitos de extensão da fadiga. As tensões residuais geralmente são prejudiciais por se sobrepor às tensões de serviço, enquanto a resistência à fadiga dos metais e ligas pode ser melhorada por tensões residuais compressivas presentes nas camadas superficiais por meio do tratamento de superfície de *shot peening*. A vida em fadiga com o campo de tensão residual compressiva originada pelo *shot peening* ou modelos sofisticados para a modelagem do Campo de Tensão Residual Compressivo (CTRC), geralmente não leva em consideração, a possibilidade deste alterar-se durante o carregamento cíclico, ou seja, ocorrer o processo de relaxação, que também altera a vida em fadiga. Este trabalho teve como objetivo obter o perfil de tensão residual de relaxação por carregamento cíclico em amostras de liga de alumínio 7050- T7541 com *shot peening* de vidro e cerâmica submetidas a ensaio de fadiga axial. A técnica para determinação das tensões residuais foi a difração de raios X que permite medir com precisão a redistribuição de tensões residuais ao longo da profundidade produzidas pelo processo de fadiga. A remoção das camadas de material foi realizada por ataque eletrolítico. Por meio deste, foi possível constatar a relação entre a tensão máxima e quantidade de ciclos no que se refere à maior ou menor relaxação de corpos de prova em diferentes regimes cíclicos nas condições de *shot peening* com esfera de vidro e cerâmica nas direções longitudinal e transversal à laminação. Os resultados mostraram que as amostras com *shot peening* na direção longitudinal apresentaram redistribuição de tensões residuais compressivas maiores que no sentido transversal ao longo da profundidade. Para os corpos de prova de *shot peening* de cerâmica praticamente não houve relaxação na superfície apenas na profundidade quando comparado ao perfil original, as amostras de *shot peening* de cerâmica obtiveram a relaxação em posições mais afastadas da superfície, devido a influência da rugosidade. A redistribuição de tensões para as amostras de *shot peening* de vidro foram superiores em relação aquelas com *shot peening* de cerâmica ao longo da profundidade em todos os regimes cíclicos estudados nas direções L e T. A relaxação de tensão residual ocorrida em ambas direções não comprometeu o efeito benéfico do *shot peening* no aumento da vida em fadiga das mesmas em relação ao material base.

Palavras chave: Liga de Alumínio 7050- T7451. Tensão residual de relaxação. Difração de raios X Processo de *shot peening*.

ABSTRACT

The residual stress may decrease and redistribute through a process called relaxation. The relaxation of the residual stress is an important phenomenon in relation to the estimated fatigue resistance of the material and can occur due to static mechanical loading, thermal, cyclical and extension fatigue effects. Residual stresses are usually harmful for overlapping the operating voltage, while the fatigue resistance of metals and alloys can be improved by compressive residual stresses present in the surface layer by means of shot peening surface. The fatigue life with the compressive residual stress field caused by shot peening or sophisticated models for modeling voltage field Compressive Residual (CTRC) usually does not take into account the possibility of this change during the cyclic loading, ie , place the relaxation process, which also changes the fatigue life. This study aimed to obtain the residual stress profile relaxation by cyclic loading on aluminum alloy samples 7050- T7541 with shot peening glass and ceramics subjected to axial fatigue test. The technique for determining the residual stress was the X-ray diffraction for measuring accurately the redistribution of residual stresses along the depth of fatigue produced by the process. The removal of layers of material was performed by electrolytic attack. Hereby, it was possible to establish the relationship between the maximum stress and number of cycles in relation to the greater or lesser relaxation test specimens in different regimes of cyclic peening conditions with spherical glass and ceramics in the longitudinal and transverse directions. The results showed that the samples with the longitudinal direction shot peening redistribution showed higher compressive residual stresses in the transverse direction along the depth. For the samples of shot peening ceramic was virtually no relaxation on the surface only in depth when compared to the original profile, samples of ceramic shot peening obtained relaxation in remote locations of the surface, due to the influence of roughness. The redistribution of stresses for samples of shot peening glass were higher than those with shot peening ceramic along the depth in all cyclic regimens studied in the L and T directions. The residual stress relaxation occurred in both directions did not compromise beneficial effect of shot peening increase the fatigue life thereof, in relation to the base material.

Keywords: Aluminum Alloy T7451 7050-. Residual stress relaxation. X-ray diffraction shot peening process.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Caso (a) do avião Comet que explodiu em pleno voo e (b) do navio Liberty que se partiu ao meio.....	18
FIGURA 2.2 – Ciclo senoidal de tensões que caracteriza um carregamento cíclico em que são definidos os parâmetros σ_a e σ_m	20
FIGURA 2.3 - Curvas S-N onde $\sigma_m=0$ e $R= -1$. Na curva A observa-se a existência do limite a fadiga (σ_e), abaixo do qual pode ser aplicada uma tensão por um número infinito de ciclos; na curva B este limite não é observado e esta representa materiais como alumínio e alguns aços de alta resistência.....	21
FIGURA 2.4 - Efeito da tensão média (σ_m) em curvas S-N. A vida em fadiga diminui com o aumento da tensão média.....	22
FIGURA 2.5 – Tensão em uma placa plana após a remoção de camada.....	30
FIGURA 2.6 – (a) e (b) Efeitos do <i>shot peening</i> em superfície metálica.....	33
FIGURA 2.7 – Bloqueio do crescimento de trincas de fadiga através do efeito de tensão residual compressiva superficial.....	34
FIGURA 2.8 – Principais características do perfil de tensões residuais produzido pelo <i>shot peening</i>	34
FIGURA 2.9 – Relações entre as discordâncias ou deformações na superfície provocada pela relaxação de tensões residuais tendo em conta a variação da profundidade.....	37
FIGURA 2.10– Esquema representativo sobre a relaxação das tensões residuais.....	38
FIGURA 2.11 – Distância interplanar de um corpo (a) isento de tensões, (b) na presença de um campo de tensões.....	39
FIGURA 2.12 – Espalhamento e difração de raios X em um arranjo cristalino.....	40
FIGURA 3.1 – Esquema das condições (tratamentos e ensaios) da liga de alumínio 7050 –T7451 utilizadas no presente trabalho.....	42
FIGURA 3.2 – Corpo de prova para fadiga axial.....	43

FIGURA 3.3 - Corpo de prova com <i>shot peening</i> de cerâmica, direção de laminação longitudinal (SPCL), após fadiga axial.....	44
FIGURA 3.4 – Esboço do sistema ataque eletrolítico.....	45
FIGURA 3.5 – Sistema utilizado para o polimento eletrolítico.....	46
FIGURA 3.6 – Difratorômetro de raios X.....	48
FIGURA 4.1 - Curvas σ_N de fadiga axial, entre material base e <i>shot peening</i> com esfera de vidro nas direções L e T, respectivamente.....	51
FIGURA 4.2 - Curvas σ_N de fadiga axial, entre material base e <i>shot peening</i> com esfera de cerâmica, nas direções L e T, respectivamente.....	52
FIGURA 4.3 - Perfil de tensões residuais por <i>shot peening</i> com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em baixo ciclo, direção longitudinal à laminação.....	56
FIGURA 4.4 - Perfil de tensões residuais por <i>shot peening</i> com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em alto ciclo, direção longitudinal à laminação.....	57
FIGURA 4.5 - Perfil de tensões residuais por <i>shot peening</i> com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em médio ciclo, direção longitudinal à laminação (Amostra 1).....	58
FIGURA 4.6 - Perfil de tensões residuais por <i>shot peening</i> com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em médio ciclo, direção longitudinal à laminação (Amostra 2).....	59
FIGURA 4.7 - Perfil de tensões residuais por <i>shot peening</i> com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em baixo ciclo, direção transversal à laminação.....	60
FIGURA 4.8 - Perfil de tensões residuais por <i>shot peening</i> com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em médio ciclo, direção transversal à laminação.....	62
FIGURA 4.9 - Perfil de tensões residuais por <i>shot peening</i> com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em alto ciclo, direção transversal à laminação.....	63

FIGURA 4.10 - Perfil de tensões residuais por <i>shot peening</i> com esfera de cerâmica sobre o processo de fadiga em baixo ciclo, direção longitudinal à laminação.....	65
FIGURA 4.11 - Perfil de tensões residuais por <i>shot peening</i> com esfera de cerâmica sobre o processo de fadiga em médio ciclo, direção de laminação longitudinal.....	66
FIGURA 4.12 - Perfil de tensões residuais por <i>shot peening</i> com esfera de cerâmica sobre o processo de fadiga em alto ciclo, direção longitudinal à laminação.....	67
FIGURA 4.13 - Perfil de tensões residuais por <i>shot peening</i> com esfera de cerâmica sobre o processo de fadiga em baixo ciclo, direção transversal à laminação.....	68
FIGURA 4.14 - Perfil de tensões residuais por <i>shot peening</i> com esfera de cerâmica sobre o processo de fadiga em médio ciclo, direção transversal à laminação	70
FIGURA 4.15 - Perfil de tensões residuais por <i>shot peening</i> com esfera de cerâmica sobre o processo de fadiga em alto ciclo, direção transversal à laminação.....	71

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Composição química em % de peso da liga de alumínio 7050 T7451.....	23
TABELA 2.2 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio 7050 T7451.....	23
TABELA 2.3 – Origem das tensões residuais.....	24
TABELA 2.4 – Características que podem afetar as tensões residuais.....	25
TABELA 2.5 – Vantagens e desvantagens de diferentes técnicas de medição de tensões residuais.....	28
TABELA 3.1 – Parâmetros do processo de <i>shot peening</i>	43
TABELA 3.2 – Condições de varredura utilizadas para a difração de raios X.....	49
TABELA 4.1 – Resultados dos valores de tensão residual ao longo da profundidade para material base com <i>shot peening</i> com esfera de vidro nas direções L e T.....	55
TABELA 4.2 – Resultados dos valores de tensão residual ao longo da profundidade para material base com <i>shot peening</i> com esfera de cerâmica nas direções L e T.....	64

SUMARIO

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO	13
1.1 ASPECTOS GERAIS.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivos específicos.....	15
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO DE PESQUISA.....	16
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 FADIGA.....	17
2.1.1 Influência da tensão na vida em fadiga.....	18
2.2. LIGA DE ALUMÍNIO 7050.....	22
2.3 TENSÕES RESIDUAIS.....	23
2.3.1 Efeitos da tensão residual.....	26
2.3.2 Métodos para medir tensão residual.....	27
2.3.3 Correções dos valores de tensões residuais.....	29
2.4 <i>SHOT PEENING</i>	32
2.4.1 <i>Shot peening versus</i> Tensão Residual.....	32
2.5 RELAXAÇÃO NAS TENSÕES RESIDUAIS.....	35
2.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS X	39
CAPITULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MATERIAL UTILIZADO.....	42
3.1.1 Processo de <i>Shot peening</i>	43
3.1.2 Ensaio de fadiga axial.....	43
3.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS	44
3.2.1 Ataque Eletrolítico.....	45
3.2.2 Difração de raios X para obtenção de tensões residuais.....	47
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	50
4.1 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO <i>SHOT PEENING</i> NA VIDA EM FADIGA.....	50
4.2 ESTUDO DA RELAXAÇÃO DAS TENSÕES PROVOCADO PELO PROCESSO DE FADIGA AXIAL.....	53
4.2.1 Estudo do campo de tensão residual das amostras com <i>shot peening</i> com esfera de vidro.....	54

4.2.2 Estudo do campo de tensão residual das amostras com <i>shot peening</i> com esfera de cerâmica.....	64
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
REFERÊNCIAS.....	76

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

Fadiga é o dano causado por solicitações cíclicas. As falhas por fadiga dependem da geometria, das propriedades do material e das cargas atuantes, etc. Quando submetido à fadiga, o componente ou estrutura pode sofrer falhas catastróficas mesmo quando solicitados abaixo do limite de resistência estática.¹

Estima-se que 90% das falhas em serviço de componentes mecânicos e estruturais sejam atribuídas ao fenômeno de fadiga.² Mesmo sob carregamentos uniaxiais, a superfície do componente é o local preferencial para nucleação de trincas por fadiga. Uma vez que a falha por fadiga é tão dependente das condições superficiais, qualquer processo que mude a resistência à fadiga da superfície do metal irá alterar as propriedades de fadiga da peça como um todo.³

Dentre os fatores que influenciam a vida de fadiga, podem-se destacar: condições superficiais, tensões residuais, tensões médias, tipos de carregamentos aplicados, frequências de aplicações das cargas, condições do meio ambiente e a microestrutura do material.⁴

Tensões residuais se definem como aquelas que permanecem em um corpo na ausência de forças externas e gradientes térmicos⁵, podendo ser tanto benéficas como prejudiciais. Normalmente as tensões residuais são prejudiciais, pois se somam às tensões de serviço. Existem vários casos nos quais estas tensões foram o fator predominante nas falhas estruturais. O aspecto particular no que se refere às tensões residuais é que sua presença geralmente passa despercebida até que o mau funcionamento ou falhas ocorram.⁶

A obtenção do perfil de tensões residuais é hoje largamente utilizada para monitorar a confiabilidade operacional de estruturas e componentes mecânicos, principalmente em situações de elevada complexidade. Alguns tratamentos de aprimoramento de superfície, feitos principalmente pela modificação da integridade da superfície das peças, são amplamente utilizados para melhorar as propriedades dos componentes, incluindo fadiga, corrosão sob tensão, desgaste. Entre esses tratamentos de superfície, o *shot peening* é um processo amplamente aplicado para aumentar o desempenho à fadiga de peças, o qual tem sido aplicado por muitos anos em componentes de aeronaves.⁷

O *shot peening* é um processo a frio que consiste em bombardear a superfície acabada com partículas projetadas em alta velocidade, resultando como principal efeito a indução de tensões de compressão na superfície e abaixo dela. Após o impacto o material é deformado plasticamente na região superficial. O material não afetado abaixo da região plastificada tenta voltar à condição original e a comprime desenvolvendo um campo de tensões residuais compressivo nas camadas superficiais. O mecanismo de criação das tensões é considerado de difícil quantificação, devido às muitas variáveis existentes no processo.⁸

Estas variáveis se dividem em três diferentes classes, cada uma delas associada às condições experimentais específicas: a) parâmetros que descrevem o material tratado: sua geometria e propriedades mecânicas; b) parâmetros de fluxo de energia produzido no processo: diz respeito às propriedades da esfera (tipo, tamanho, material, densidade, dureza, etc), velocidade, ângulo de impacto, duração e distância do jateamento ao material tratado; c) parâmetros que descrevem as condições de contato: coeficiente de fricção e o coeficiente de restituição, o qual depende essencialmente da razão entre a dureza do material tratado e da esfera usada.⁹

A liga de alumínio 7050-T7451 escolhida para esse trabalho tem importantes aplicações na indústria aeronáutica devido às suas características de resistência mecânica e tenacidade.

Para a perfeita caracterização do efeito do tratamento por *shot peening*, é necessário o levantamento do perfil das tensões residuais ao longo da profundidade do espécime. As tensões residuais induzidas pelo processo de *shot peening* na superfície estão relacionadas com as características mecânicas do material tratado e não com as variáveis de *shot peening* usadas.⁹

As tensões residuais desempenham um importante papel no comportamento de serviço, particularmente, na presença de carregamentos cíclicos, e seus valores podem diminuir e se redistribuir por meio de um processo chamado de relaxação.

Inúmeros trabalhos tem procurado prever valores e a forma do campo de tensão residual compressiva criado pelo *shot peening*, levando em consideração as variáveis do processo e as características do material tratado, porém poucos mencionam a possibilidade de variação do campo de tensão residual compressiva com o carregamento cíclicos.

Na presente pesquisa será analisado o efeito da relaxação da tensão residual da liga de alumínio 7050-T7451 após o ensaio de fadiga axial em condições de tratamentos mecânicos de *shot peening*.

Os resultados obtidos serão comparados aos valores de tensões residuais antes do ensaio de fadiga, aplicando a técnica da difração de raios X, para obter o perfil residual de relaxação das amostras.

A avaliação precisa do perfil de tensão residual é essencial para uma correta apreciação do desempenho na aplicação de um componente, sendo o método proposto para medir essas tensões no presente trabalho a difração de raios-X.

A difração de raios X para obtenção de tensões residuais se caracteriza por um método não destrutivo baseado na medição da variação a tensões no regime elástico¹⁰, que se pode determinar a estrutura cristalina, tamanho e a geometria da célula unitária, orientação cristalográfica, tamanho de grão cristalino, tensão residual e obter uma análise química e quantitativa da amostra.¹¹

Devido à penetração limitada da radiação de raios-X em materiais metálicos, aplicada na avaliação da tensão residual de regiões superficiais apenas, dependendo da absorção do material e o comprimento de ondas dos raios X,¹² será utilizado o ataque eletrolítico para avaliar o perfil residual da amostra ao longo da profundidade.

1.2 OBJETIVOS

- Análise da relaxação de tensões residuais em corpos de prova após processo de fadiga axial em condições de *shot peening* com esferas de cerâmica nas direções longitudinal e transversal, *shot peening* com esfera de vidro nas direções longitudinal e transversal nos diferentes regimes cíclicos.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Análise da influência do *shot peening* de cerâmica e vidro na vida em fadiga comparado ao material base
- Análise da relaxação nas amostras com *shot peening* de vidro nas direções longitudinal e transversal à laminação em baixo, médio e alto ciclo.

- Análise da relaxação nas amostras com *shot peening* de cerâmica nas direções longitudinal e transversal à laminação em baixo, médio e alto ciclo.
- Conseqüentemente a obtenção do perfil residual de relaxação após ensaio de fadiga

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO DE PESQUISA

A presente pesquisa foi estruturada e formatada seguindo a normatização da instituição (Universidade Estadual de Ponta Grossa), procurando produzi-lo de forma a proporcionar uma leitura objetiva e concisa, sendo organizado da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução onde se apresenta um breve contexto sobre o processo de fadiga, efeito de relaxação e tensões residuais, além de serem apresentados o objetivo, justificativa e a estrutura desse trabalho.

Capítulo 2: Apresenta a revisão da literatura abordada, necessária para um melhor entendimento do assunto estudado. Neste capítulo são abordados os temas relacionados à liga utilizada, fadiga, o efeito da relaxação, *shot peening*, determinação de tensões residuais, os métodos para determinar e medir tais tensões, dentre outros.

Capítulo 3: Descreve detalhadamente os equipamentos, materiais e procedimentos usados.

Capítulo 4: Análises e discussão dos resultados obtidos.

Capítulo 5: Apresenta as considerações finais após os resultados dos ensaios.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FADIGA

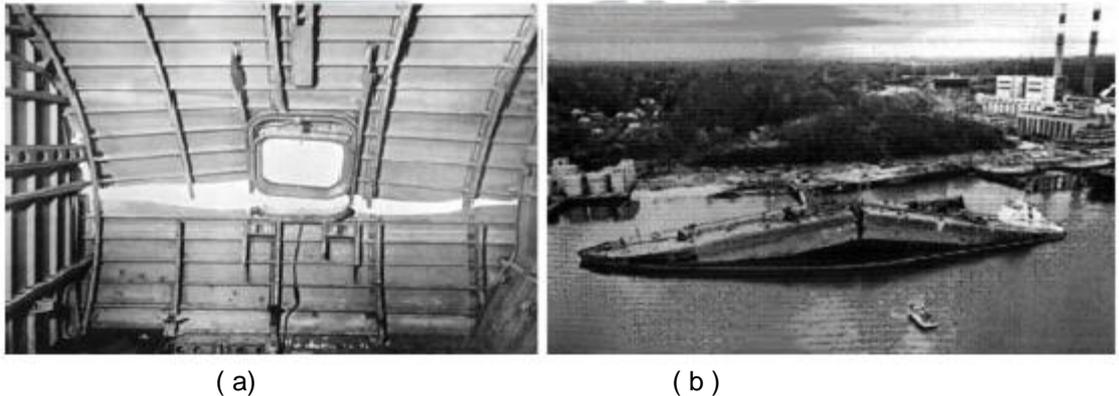
Pode-se definir a fadiga como sendo o processo de degradação localizada, progressiva e permanente, que ocorre em material sujeito a variações de tensões e deformações e que produzem a nucleação de trincas ou a completa fratura depois de um número suficiente de ciclos.¹³

O comportamento de um material submetido à fadiga é afetado por sua composição química e sua microestrutura, como o tamanho dos grãos, inclusões e segregações no material, além dos efeitos do processamento térmico e mecânico aplicado ao material. Em dimensões microscópicas, tem-se o movimento de discordâncias e os diferentes mecanismos de multiplicação e interação destas com outros defeitos cristalinos. O movimento de discordâncias nos planos de deslizamento promove a formação de bandas de deslizamento, com surgimento de extrusões e intrusões na superfície do material e eventual nucleação e subsequente propagação de trincas. Em dimensões macroscópicas tem-se a geometria, as dimensões do componente, a presença de entalhes e as condições de acabamento superficial. Estes fatores microscópicos e macroscópicos se unem para determinar a resistência do componente à fadiga.⁴

Trincas causadas por fadiga são muito comuns e embora com o conhecimento atual seja possível prever a sua ocorrência, diversas falhas em componentes mecânicos ocorreram devido à presença de trincas. Alguns casos como por exemplo o colapso estrutural durante o voo do avião a jato *Comet* em 1955, ilustrado na Figura. (1.1a), as fraturas ocorridas a 3600 *rpm* de componentes rotativos de turbinas a gás de geradores elétricos em 1955 – 1956, e as falhas de motores dos foguetes *Polaris* e *Minuteman* com propelentes sólidos em 1957. Um caso anterior a estes ajudou a popularizar a mecânica da fratura foram os casos de fratura frágil dos navios *Liberty*, ilustrado na Figura 2.1(b), ocorridas logo no começo da 2ª Guerra Mundial, quando os estaleiros dos Estados Unidos estavam a todo vapor produzindo navios cargueiros para abastecer a Europa. Dos 2500 navios *Liberty* fabricados durante a 2ª Guerra Mundial, 145 partiram-se ao meio e aproximadamente 700 sofreram sérias falhas.¹⁴

Apesar de trágicos, esses acidentes foram importantes para chamar a atenção dos engenheiros da época, o que contribuiu para o avanço no que diz respeito ao entendimento do comportamento à fratura de estruturas e metodologias de análises de problemas de mecânica da fratura, tornando assim os componentes muito mais seguros e confiáveis.¹⁴

FIGURA 2.1 – Caso(a) do avião Comet que explodiu em pleno voo e (b) do navio Liberty que partiu ao meio.



FONTE: MANDAI, J.T. **Determinação dos parâmetros para crescimento de trincas em ligas metálicas: modelagem e experimentação**. 2010. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010

Para abordar o estudo de falhas em componentes mecânicos, alguns aspectos importantes podem ser citados:¹⁵

- Falhas em serviço ocorrem quase sempre em altos ciclos;
- Uma falha se inicia preferivelmente em uma região de concentração de tensão,
- As falhas são essencialmente eventos elástico-lineares; se alguma plasticidade existir,
- esta é localizada em uma região nas proximidades da concentração de tensão.

2.1.1 Influência da tensão na vida em fadiga

Um material pode sofrer degradação de suas propriedades mecânicas e falhar sob esforços cíclicos com tensão abaixo da máxima que suportaria em um carregamento estático elástico, como o limite de escoamento. Este processo é definido como fadiga.

Segundo Fontes¹⁶, existem diferenças significativas entre as estruturas resultantes dos materiais solicitados ciclicamente, como nos ensaios de tração, por exemplo. As principais diferenças são:

- devido ao intervalo de tempo de deformação bastante superior na solicitação de fadiga, as estruturas de discordâncias geradas são muito mais próximas das condições de baixa energia do que a estrutura gerada no regime monotônico de deformação;
- a movimentação cíclica da solicitação de fadiga minimiza o unidirecionamento das deformações, o qual prevalece nos ensaios monotônicos;
- a densidade de discordâncias encontrada após a solicitação por fadiga é muito maior que após a solicitação monotônica.

É importante caracterizar os possíveis tipos de tensões cíclicas que provocam o fenômeno de fadiga, sendo que as tensões aplicadas podem ser axiais (tração e compressão), de flexão (dobramento) ou de torção (carga rotativa), permitindo, de modo geral, a existência de três diferentes formas de tensões variáveis com o tempo.¹⁷

As trincas de fadiga iniciam-se em regiões onde a deformação é mais severa (ponto de tensão máxima). Esse ponto pode estar situado em alguma irregularidade superficial macroscópica, ou até mesmo em defeitos microestruturais.¹⁸

Sob a ação de cargas cíclicas, uma região com alta densidade de discordâncias é desenvolvida nesses pontos de irregularidades ou defeitos e acabam funcionando como concentradores de tensão. A alta densidade de discordâncias, e conseqüente deformação, acabam aumentando o potencial de uma trinca de fadiga, trinca essa que se propaga durante o carregamento cíclico, até que ocorra o rompimento catastrófico devido à redução da seção da peça pela propagação da trinca.¹⁹

Vários estudos foram realizados para melhor compreender este processo, e os primeiros foram desenvolvidos por Albert (1837), na Alemanha. Contudo, a investigação mais ampla foi realizada por Wöhler (1860), que definiu as curvas 'S-N', realizando ensaios cíclicos onde eram aplicadas sucessivamente tensão de tração e compressão de módulos iguais até que ocorresse a falha por fadiga. Através destes ensaios foram definidos os parâmetros que são utilizados atualmente: a tensão de tração é a tensão máxima e numericamente igual à amplitude de tensões aplicada (σ_a) e a tensão de compressão é a tensão mínima.²⁰

Nas curvas S-N de Wöhler a tensão média (σ_m) no ciclo de tensões é nula e a razão entre tensão mínima e tensão máxima (R) é -1 . Estes parâmetros são definidos como: ²⁰

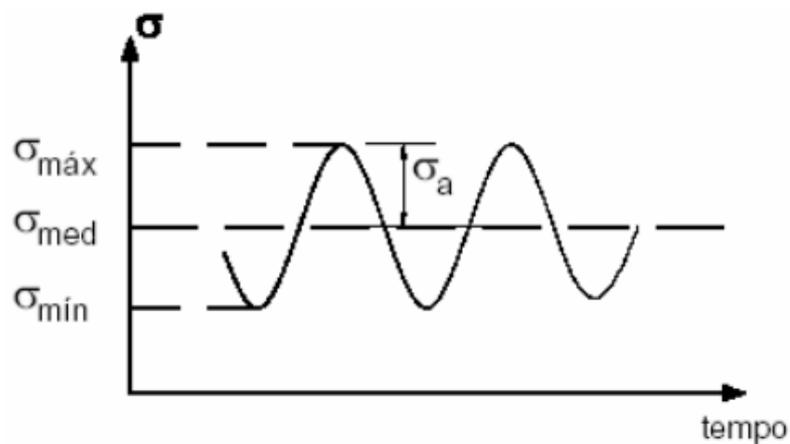
$$\sigma_{(a)} = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (1)$$

$$\sigma_{(m)} = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sigma_{\text{mín}}}{\sigma_{\text{máx}}} \quad (3)$$

A Figura 2.2 apresenta estes parâmetros em um carregamento cíclico genérico de forma senoidal.

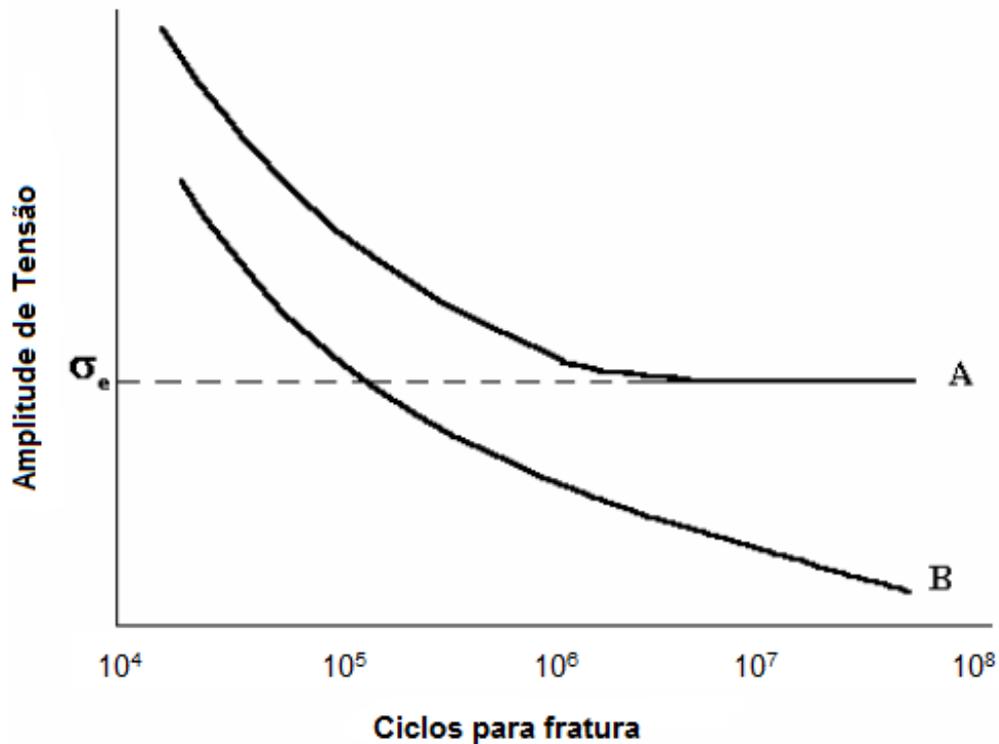
FIGURA 2.2 – Ciclo senoidal de tensões, que caracteriza um carregamento cíclico, em que são definidos os parâmetros σ_a e σ_m



FONTE: SIQUEIRA, C. P. **Influência da Nitretação na Resistência à Fadiga do Aço ABNT 4340**. 2002. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2002.

Nas curvas S-N, para cada tensão aplicada há um número de ciclos até a fratura correspondente, e pode-se perceber que quanto menor a tensão aplicada, maior será o seu respectivo número de ciclos até a fratura, até chegar a um valor de tensão definido como limite à fadiga (σ_e), abaixo do qual não haveria falha por fadiga e o número de ciclos seria infinito. No entanto, para alguns aços de alta resistência e ligas de alumínio este limite não é observado, havendo um número de ciclos finito até ocorrer a falha, como mostra Figura 2.3. ^{3,20}

FIGURA 2.3 - Curvas S-N onde $\sigma_m=0$ e $R= -1$. Na curva A observa-se a existência do limite a fadiga (σ_e), abaixo do qual pode ser aplicada uma tensão por um número infinito de ciclos; na curva B este limite não é observado e esta representa materiais como alumínio e alguns aços de alta resistência



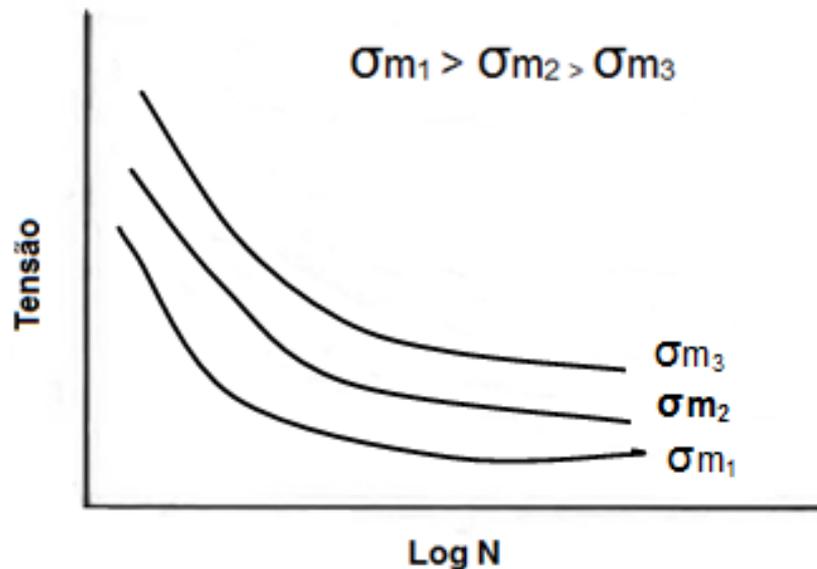
FONTE: Adaptado de MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical Behaviour of Materials**. 2ª ed. New York: Cambridge University Press, 2009. 882p.

A tensão média (σ_m) produz efeito na resistência à fadiga de um material. Em curvas S-N de um material obtidas com valores diferentes de tensão média, como mostra a Figura 2.4, para uma dada amplitude de tensão (σ_a), com o aumento da tensão média (σ_m), ocorre a diminuição da vida em fadiga. Os efeitos de tensões residuais podem também contar como um efeito de tensão média e a introdução de tensões de compressão, em áreas críticas, reduz este efeito.³

Assim, a resistência à fadiga dos metais pode ser definida como sendo a resistência que o metal oferece à nucleação da trinca, através das intensidades e espaçamentos das barreiras microestruturais do metal.²¹

As tensões residuais podem ter uma influência significativa sobre a vida em fadiga de componentes de engenharia. Em particular, as tensões residuais de tração perto da superfície tendem a acelerar as fases de iniciação e crescimento da fadiga.²²

FIGURA 2.4 - Efeito da tensão média (σ_m) em curvas S-N. A vida em fadiga diminui com o aumento da tensão média



FONTE: Adaptado de MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical Behaviour of Materials**. 2ª ed. New York: Cambridge University Press, 2009. 882p.

Uma das formas de se aumentar significativamente o limite de fadiga em peças metálicas é pela aplicação de tratamentos superficiais para se induzir um capo de tensão residual compressiva.²³

2.2 LIGA DE ALUMÍNIO 7050

Esta liga de alumínio é vastamente utilizada na indústria aeronáutica devido às suas excepcionais características de resistência à corrosão, resistência mecânica e tenacidade. Essa liga é capaz de manter essas características mesmo quando utilizada na forma de chapas finas, daí sua importância para aplicações aeronáuticas.

Além das suas propriedades metalúrgicas, esta liga demonstra excelente usinabilidade na fabricação de peças espessas e de geometria complexas. Algumas das aplicações típicas utilizadas em aeronaves são: nas asas (nervuras das empenagens, longarinas, rebites reforçadores e revestimentos), trem de pouso (nas partes de suporte) e em cavernas onde exigem maior responsabilidade mecânica da fuselagem e não podem apresentar problemas superficiais que geram trincas.²⁴

A liga 7050 - T7451, bem como diversas outras ligas modernas, possui uma anisotropia alta e necessita ser bem caracterizada mecanicamente para o uso

seguro. A condição T7451 designa o tratamento térmico sofrido pela liga, na condição de duplo envelhecimento com alívio de tensão. Sua composição química bem como as propriedades mecânicas encontra-se a seguir, respectivamente nas tabelas 2.1 e 2.2. ¹⁴

TABELA 2.1 - Composição química em % de peso da liga de alumínio 7050 T7451

Componente Químico	% em peso	Componente Químico	% em peso
Alumínio, Al	87,3 – 90,3	Silício, Si	< 0,12
Cromo, Cr	< 0,04	Titânio, Ti	0,06
Ferro, Fe	< 0,15	Zinco, Zn	5,7 – 6,7
Magnésio, Mg	1,9 – 2,6	Manganês, Mn	< 0,1
Cobre, Cu	2,0 -2,6	Zircônio, Zr	0,08 – 0,115

FONTE: MANDAI, J.T. **Determinação dos parâmetros para crescimento de trincas em ligas metálicas: modelagem e experimentação**. 2010. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

TABELA 2.2 - Propriedades mecânicas da liga de Alumínio 7050 T7451.

Módulo de elasticidade	71,4 GPa
Tensão de escoamento	469 MPa
Tensão de ruptura	524 MPa
Coefficiente de Poisson	0,33

FONTE: MANDAI, J.T. **Determinação dos parâmetros para crescimento de trincas em ligas metálicas: modelagem e experimentação**. 2010. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

2.3 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são definidas como as tensões que permanecem em um material na ausência de forças externas ou gradientes de temperatura, e que não são necessárias para manter o equilíbrio entre o material e o ambiente em que está inserido. ²⁵ As tensões residuais podem ser originadas devido a diferentes processos (Tabela 2.3).

Todo sistema de tensões residuais está em equilíbrio e o somatório das forças resultantes e dos momentos produzidos será zero. O valor máximo em módulo que as tensões residuais poderão chegar é o próprio limite de escoamento do material. Valores de tensões acima do limite de escoamento do material irão

ocasionar uma deformação plástica do material, havendo assim, uma redistribuição das tensões residuais.²⁶

TABELA 2.3 - Origens de tensões residuais

1	Deformação plástica local	Compreende todos os processos de carregamento mecânico, moagem e usinagem
2	Fornecimento ou retirada de calor	Soldagem, fundição, processos de tratamentos térmicos
3	Diferente expansão térmica de diferentes fases	Processos de recobrimento
4	Gradientes de composição química	Tratamentos de superfície

FONTE: CAMPOS, M. F.; MACHADO, R.; HIRSCH, T. **Tensões residuais em aços avaliados por difração de raio X: diferença entre macro e micro tensões residuais.** In: WORKSHOP SOBRE TEXTURA, 3.,2006, São Paulo. **Resumos...** São Paulo: USP. p. 115-131.

Existem três tipos de tensões residuais que são definidas:

Tensões Residuais do tipo I ou macrotensões

São homogêneas no volume de vários grãos e causam deformações uniformes apreciáveis da rede cristalina na região que atuam. Em geral são as que despertam maiores interesses aos problemas relacionados com a engenharia em função de sua ação sobre os materiais. Atuam na escala de alguns tamanhos de grãos.²⁸

Tensões Residuais do tipo II

São da ordem do tamanho dos grãos do material e surgem da anisotropia dos grãos ou nas diferenças de fase dentro do material.¹

Tensões Residuais do tipo III ou microtensões

Atuam em áreas do tamanho de um grão ou parte de um grão do material e são causadas, em materiais com grãos orientados aleatoriamente, pelo escoamento que ocorre primeiro nos grãos cujos planos de deslizamento coincidem aproximadamente com os planos de tensão de cisalhamento (mais propícios ao deslizamento). Após a remoção das cargas, os grãos que não escoam tendem a retornar a sua geometria inicial e os que sofreram escoamento tendem a manter a sua deformação elástica permanente. Estas tensões residuais microscópicas

resultam, ainda, da interação de fases, como por exemplo, campos de tensão em torno de precipitados, entre agulhas de martensita, etc.²⁹

Tensões residuais macroscópicas podem ser introduzidas nos componentes durante fabricação e como resultado da deformação plástica durante a utilização do equipamento. Estas tensões residuais de natureza macroscópica e de mais longo alcance que as tensões residuais microscópicas, podem ser introduzidas através de tensões de contração originadas, por exemplo, da fundição ou lingotamento e por processos mecânicos de fabricação e tratamentos como laminação, extrusão, soldagem, *shot peening*.³⁰ A tabela 2.4 aborda os fatores que influenciam no aparecimento das tensões residuais.

TABELA 2.4 - Características que podem afetar as tensões residuais.

Fatores que pode afetar tensões residuais		
Ação térmica	Ação mecânica	Ação química
Tratamento térmico (recozimento, têmpera)	Usinagem, retífica e polimento	Ataque químico
Alívio de tensão	<i>shot penning</i>	Corrosão
Endurecimento	Superfície de rolamento	Usinagem química
Tratamento por difusão	Jateamento	Tratamento de superfície
Nitretação	Conformação a frio	Eletrodeposição
Cementação	Estiramento	
Fabricação com calor	Estampagem	
Soldagem	Dobramento	
Fundição	Recalcamento	
Chama de corte	Torção	
Conformação a quente	Desgaste por atrito	
	Tensão cíclica	

FONTE: Adaptado de CARVALHO, A. L. M. **Efeito das tensões residuais na fratura e resistência à fadiga da liga de alumínio 7050- T7451**. 2004, 213 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, Campus II, Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Guaratinguetá, 2004.

Em geral, todo componente mecânico tende a apresentar tensões residuais de origem microscópica, derivadas de seu processamento para alteração das qualidades microestruturais e características mecânicas. Além destas, tensões

residuais macroscópicas estarão também presentes devido aos processos de fabricação, necessários à conformação do material à sua forma final.³⁰

As tensões residuais do tipo 1 são particularmente importantes em engenharia para análise estrutural em componentes, uma vez que podem comprometer ou aumentar a vida útil de um equipamento. Estas se apresentam como um perfil de tensões, trativo-compressivo ou compressivo-trativo, com extensão comparável às dimensões do componente analisado.⁷

2.3.1 Efeitos da tensão residual

Geralmente, os vários processos de fabricação, tais como usinagem, soldagem e todos os tratamentos de superfície induzem gradientes de tensão residual na superfície de peças de metal e estruturas.³²

Os efeitos das tensões residuais podem ser tanto benéficos como prejudiciais, dependendo da sua magnitude, sinal, e da sua distribuição.³³

Na maior parte dos casos as tensões residuais são prejudiciais, pois sobrepõem-se às tensões de serviço. Tais efeitos na maior parte dos casos, são nocivos, uma vez que podem causar deformações, aumentar a velocidade das transformações de fase e processo de corrosão, ou provocar o início de trincas. Contudo, podem também ser benéficas, especialmente por permitirem o aumento da tensão limite de fadiga em componentes solicitados dinamicamente. Isto é, as tensões residuais podem ou não provocar o início de uma trinca e conseqüentemente a diminuição da resistência à fadiga do material.^{28,33}

A maior parte das trincas de fadiga se inicia na superfície ou em regiões subsuperficiais. De fato, a superfície é a região do componente que geralmente suporta a maior carga aplicada durante operação, estando muitas vezes sujeita às condições ambientais adversas e podendo até mesmo conter defeitos e tensões residuais provenientes do processo de fabricação, e/ou de montagem e operação. Portanto, o aumento da resistência e a melhoria das propriedades superficiais de um componente são de extrema importância para a sua vida útil.³⁰

Tensões residuais trativas podem ser perigosas quando tensões aplicadas ao componente também forem trativas; a soma das tensões trativas pode contribuir para a iniciação e o crescimento de trincas de fadiga. Já as tensões residuais compressivas se opõem à direção de carregamento trativo – nesse caso, a tensão

residual compressiva amortiza o nível de tensão aplicada e inibe a iniciação e a propagação de trincas²⁵. Nestes casos são propositadamente provocadas tensões residuais de compressão à superfície, como é o caso do *shot peening*.³³

Da mesma forma, se a peça apresenta tensão residual compressiva e o carregamento de serviço for compressivo, o valor da tensão compressiva será acrescido.³⁰

Muitas vezes, gradientes das tensões residuais em profundidade assumem especial importância. Na existência de revestimentos superficiais ou granalha, a amplitude de tensões residuais varia desde um valor máximo, à superfície, até zero ao longo duma camada muito fina.³⁴ Dessa forma, é essencial a escolha de um método adequado para medir as tensões residuais existentes no material.

2.3.2 Métodos para medir tensão residual

Não existe um método universal de medida das tensões residuais capaz de resolver todos os problemas, a baixo custo, da melhor maneira possível. A técnica a ser utilizada deve ser selecionada com base em uma série de parâmetros influenciados pelas características do componente e o tipo de medida a ser efetuada. Estes parâmetros baseiam-se nos seguintes fatores:

- na natureza do componente;
- no tipo de tensões residuais presentes no componente;
- no gradiente de tensões residuais;
- na geometria do componente;
- em onde a medida será realizada (em campo ou no laboratório);
- no tipo de intervenção (método destrutivo ou não-destrutivo);
- no tempo disponível para a medida e apresentação dos resultados;
- na precisão e repetibilidade do método; e
- no custo final da medida.³⁵

Existem atualmente diferentes técnicas para a medição de tensões residuais, tais como: remoção de camada e curvatura, método do furo com extensômetro ou com processos ópticos em que a radiação se encontra no visível, difração de raios X e de nêutrons, técnicas magnéticas e de ultrassom, etc.³³

Método Magnético: os materiais ferromagnéticos são constituídos de regiões microscópicas magneticamente ordenadas conhecidas por domínios. Cada

domínio é magnetizado segundo direções cristalográficas preferenciais à magnetização. Quando se aplica um campo magnético ou tensões mecânicas nestes materiais, acontece um rearranjo na orientação magnética dos domínios. Medindo-se a amplitude do ruído eletromagnético provocado pela magnetização local destes materiais consegue-se medir as tensões residuais adicionadas.

Difração de nêutrons: método não destrutivo de medição de tensões residuais com princípios idênticos aos da difração de raios X. Contudo, os feixes de nêutrons incidentes têm uma maior capacidade de penetração, que pode atingir 50 mm num material cristalino. Esta é a razão pela qual este método pode ser utilizado para medir tensões residuais tridimensionais num componente espesso como é, por exemplo, um cordão de soldadura.

Como o domínio definido pelo volume explorado por um feixe de nêutrons é relativamente grande, este método indica apenas o valor médio das macrotensões residuais no volume em análise. O fato de ser não destrutivo torna-o muito interessante em muitas aplicações como: na soldadura, nos tratamentos térmicos, nos materiais compósitos à base de metal.³⁴

Difração de raios X: O método de medição de tensões residuais por difração de raios-x analisa o espaçamento entre os planos de materiais cristalinos. As tensões residuais causam uma modificação nesse espaçamento, que é uniforme. Medindo-se essa deformação relativa à superfície da amostra, em duas orientações diferentes e conhecidas, consegue-se calcular a tensão residual da amostra pela proporção entre a deformação no regime elástico e a tensão.³⁶ A difração de raios X foi a técnica escolhida para medir as tensões residuais da presente pesquisa, sendo abordado mais adiante.

Na tabela 2.5 encontra-se uma síntese das particularidades referentes às técnicas de medição de tensões residuais.

(continua)

TABELA 2.5 - Vantagens e desvantagens de diferentes técnicas de medição de tensões residuais

Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Método do furo	<ul style="list-style-type: none"> - Rápido e simples; - Extensamente disponível; portátil; - Grande gama de materiais; - Possibilidade de furos profundos em componentes com secção espessa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Interpretação dos dados; - Semidestruutivo; - Limitada sensibilidade e resolução.
Raman/Fluorescente	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resolução; - Disponibilidade de sistemas portáteis 	<ul style="list-style-type: none"> - Medições superficiais; - Interpretação e Calibração; - Gama de materiais limitada

(conclusão)

Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Difração de raios X	<ul style="list-style-type: none"> - Versátil, extensamente disponível; - Grande gama de materiais (materiais cristalinos); - Sistemas portáteis; - Possibilidade de medição de micro e macro tensões residuais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Medições básicas; - Sistemas em laboratório; - Medição de pequenos componentes
Synchrotron	<ul style="list-style-type: none"> - Melhoria da penetração e resolução relativamente à difração de raios X; - Possibilidade de perfis de tensão em profundidade; - Rápido; - Possibilidade de medição de micro e macro tensões residuais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Apenas em laboratórios especializados; - Baseado em laboratório.
Difração de nêutrons	<ul style="list-style-type: none"> - Excelente penetração e resolução; - Mapas de tensão 3D; - Possibilidade de medição de micro e macro tensões residuais 	<ul style="list-style-type: none"> - Apenas em laboratórios especializados; - Baseado em laboratório. - Demora muito tempo e é dispendioso
Remoção de camada e curvatura	<ul style="list-style-type: none"> - Relativamente simples; - Grande gama de materiais; - Pode ser combinado com outras técnicas para se obter o perfil das tensões. 	<ul style="list-style-type: none"> - Limitado a formas simples; - Destrutivo; - Baseado em laboratório.
Magnéticas	<ul style="list-style-type: none"> - Muito rápido; - Variedade de técnicas magnéticas; - Portátil. 	<ul style="list-style-type: none"> - Só pode ser aplicado a materiais ferromagnéticos; - Necessidade de separar o sinal devido à microestrutura do provocado pelas tensões.
Ultrason	<ul style="list-style-type: none"> - Geralmente disponível; - Muito rápido; - Baixo custo; - Portátil. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resolução limitada;

FONTE: KANDIL F. A. et.al.. **A Review of Residual Stress Measurement Methods: A Guide to Technique Selection.** Reino Unido: National Physical Laboratory, 2001.42p.

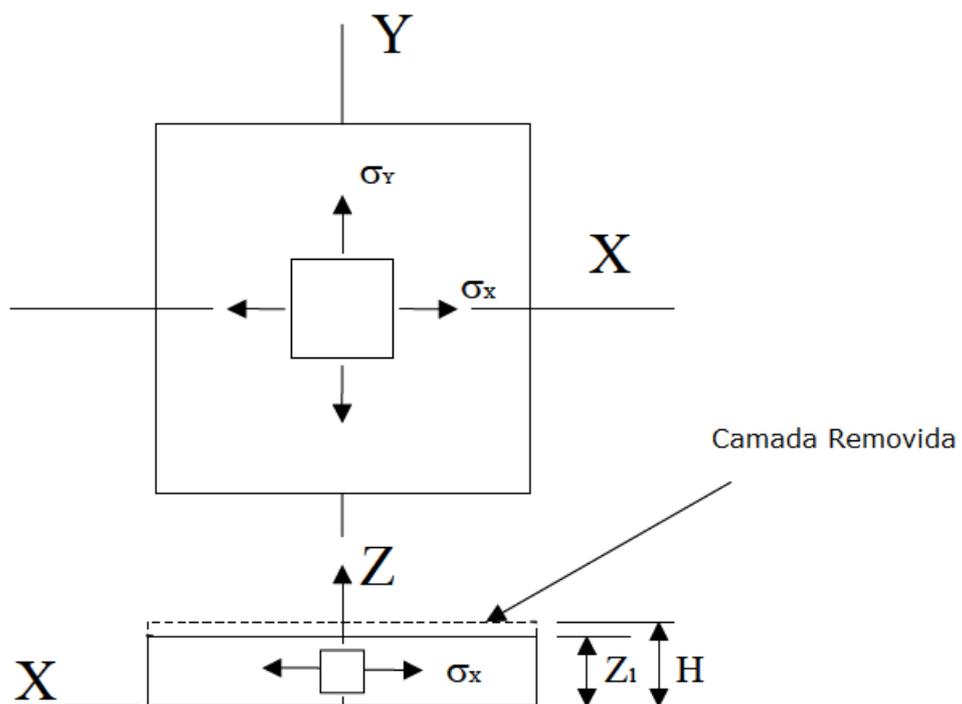
2.3.3 Correções dos valores de tensões residuais

Para medidas de tensão *versus* profundidade, a cada camada superficial incrementada deve ser removida seguida de remedição na superfície recém-criada fazendo correções para a quantidade de material removido. ³⁷

Ao realizar a remoção da camada residual e medidas de tensão é importante para considerar qualquer redistribuição ou relaxação do esforço residual na superfície exposta.³⁸

Moore e Evans³⁹ propuseram uma aproximação para chapas planas variando através da espessura (Figura 3.6). Eles utilizavam difração de raios X para a medição de tensões a partir da qual foi calculado a correção e o procedimento consistiu na remoção de camadas a partir da superfície da placa e medindo as tensões existentes em cada camada. O processo assume que a tensão perpendicular à superfície era zero. Deve notar-se que, para que este procedimento ser válido, as áreas medidas pelo DRX teriam de ser livres de deformação plástica causada pela remoção da camada.³⁸

FIGURA 2.5: Tensão em uma placa plana após a remoção de camada



FONTE: Adaptado de FITZPATRICK, M. E. et. al. **Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction** . National Physical Laboratory. n.52, v.2, Teddington, Middlesex, United Kingdom, 2005.

Uma solução generalizada proposta (método de série) por Sikarskie com base nas soluções originais de Moore e Evans pode ser utilizado quando finas camadas foram removidos a partir da superfície de um componente.^{40,41}

O procedimento funciona bem para profundidades (poucos por cento de espécime diâmetro ou espessura), ou em casos onde o gradiente de tensão sobre a profundidade total removido não muda muito rapidamente. A praticidade deste método depende do ajuste da medida de tensões em profundidade por uma série de Taylor dos valores de tensão medidos na superfície e suas sucessivas derivadas ao longo da profundidade (Equação 4). Quando o método é aplicável, as relações obtidas são bastante convenientes, pois descrevem a correção de tensões em termos dos fatores que influenciam, por exemplo, a profundidade da camada, magnitude da tensão, gradiente de tensão, do espécime e tamanho.

$$\sigma(z_1) = \sigma_m(z_1) + 2 \int_{z_1}^h \frac{\sigma_m(z)}{z} dz - 6z_1 \int_{z_1}^h \frac{\sigma_m(z)}{z^2} dz \quad (4)$$

Expandindo as integrais acima usando resultados uma série de Taylor na seguinte equação

$$\sigma(z_1) = \sigma_m(z_1) + \left(\begin{array}{l} -4\sigma_m(H) \left(\frac{H-Z_1}{H} \right) + [\sigma_m(H) + 2H\sigma'_m(H)] \times \left(\frac{H-Z_1}{H} \right)^2 + \\ \frac{1}{3} [2\sigma_m(H) + H\sigma'_m(H) - 2H^2\sigma''_m(H)] \times \left(\frac{H-Z_1}{H} \right)^3 \end{array} \right) \quad (5)$$

onde H é a espessura inicial da amostra; Z₁, espessura após a camada removida; σ_m, tensão medida e σ_z, tensão corrigida.

Para amostras em que a camada retirada represente menos que 5% da espessura total, utiliza-se apenas o primeiro termo da equação sem necessidade do incremento das derivadas das tensões provenientes das camadas anteriores.⁴⁰

Assume-se que as deformações medidas são o resultado acumulado da relaxação das tensões residuais existentes na zona de cada uma das sucessivas medidas ao longo da profundidade do corpo, ou seja, consiste na identificação do contribuição das tensões existentes em cada incremento para a tensão total.^{42,43}

Sendo assim, a deformação total medida é a soma das deformações causadas pela relaxação das tensões existentes em cada incremento.

Os dados coletados depois de corrigidos por esses algoritmos numéricos, contabilizam a relaxação de tensões devido à remoção de camadas para obtenção do perfil residual das amostras.⁴⁴

2.4 SHOT PEENING

Shot peening é um processo de trabalho a frio que consiste no jateamento repetitivo com esferas de aço, cerâmica ou vidro, na superfície das peças, e tem enorme importância na área industrial.⁴⁵ A utilização do termo *shot peening* - universalmente aceito - decorre da intenção de caracterizar que não se trata de um simples jateamento, mas de uma ferramenta de precisão, decorrente de uma série de fatores, o que o torna rigorosamente controlável e repetitivo.^{46,30}

De uma forma geral, os efeitos do *shot peening* são largamente empregados para uma série de funções, dentre elas o aumento da resistência à fadiga, a característica que será analisada especificamente nesse trabalho.

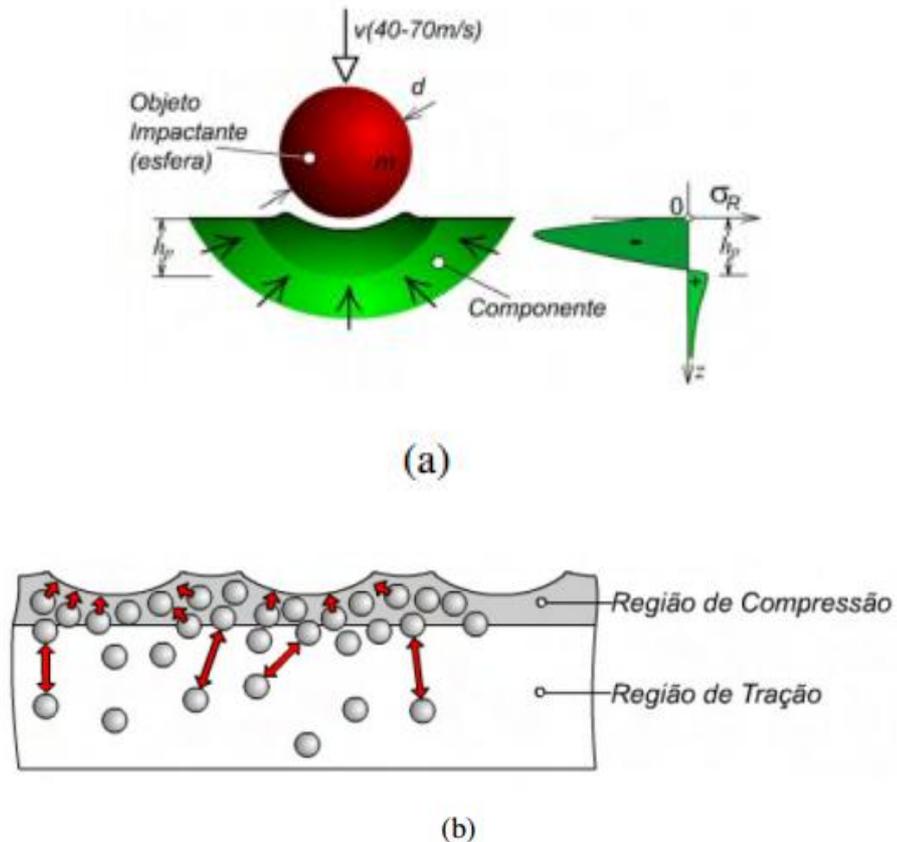
2.4.1 *Shot peening* versus Tensão Residual

As características típicas da superfície com *shot peening* são tensões residuais compressivas e elevada densidade de discordâncias nas camadas superficiais resultantes de deformações plásticas heterogêneas. Em alguns casos, é possível ocorrer a transformação de fase levando a um endurecimento superficial adicional.⁴⁷

Durante o processo, a colisão das esferas sobre a superfície alvo causa deformações plásticas localizadas e um encruamento na camada superficial. Abaixo da superfície, o material procura restaurar a sua forma original, produzindo um hemisfério de elevadas tensões residuais compressivas ao redor das microcavidades, conforme está representado na Figura 2.6.⁴⁸

Após o processo de jateamento, verifica-se uma certa deformação superficial dos grãos que influencia o mecanismo de fadiga no sentido de bloquear a nucleação da trinca ou retardar o seu crescimento. Quando se forma uma trinca, o seu comportamento consiste em um acelerado crescimento durante poucos ciclos de vida e posteriormente uma desaceleração progressiva nos ciclos consecutivos. Este fato concorda com as trincas não propagadas encontradas na superfície de materiais jateados.¹⁵

FIGURA 2.6: (a) e (b) *Efeitos do shot peening* em superfície metálica



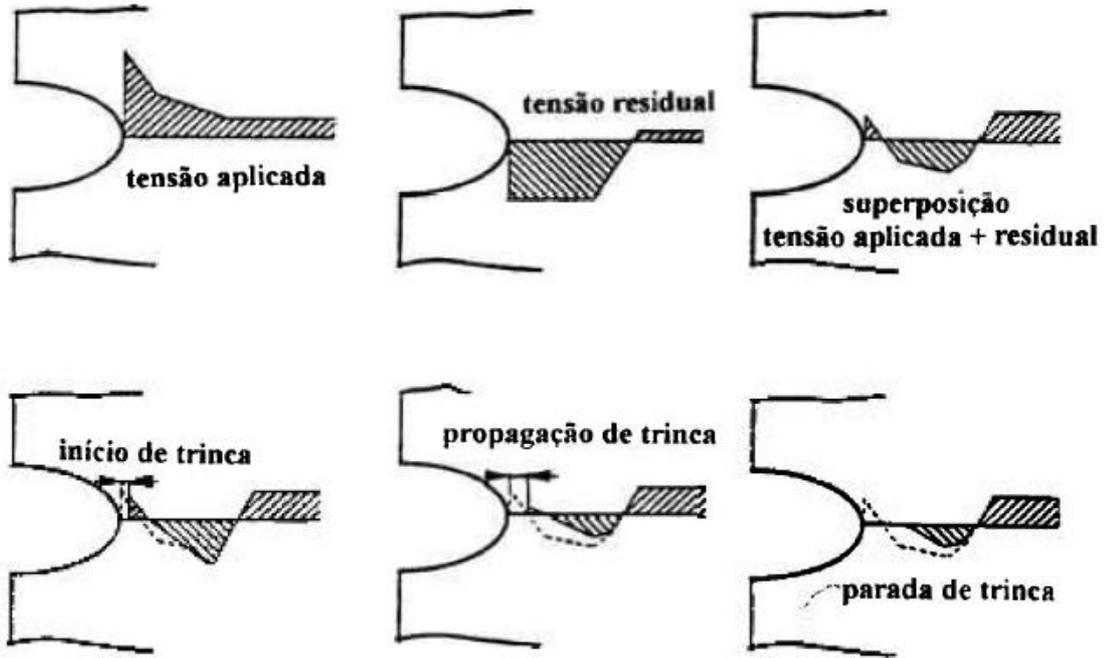
FONTE: SIQUEIRA, C. P. **Influência da Nitretação na Resistência à Fadiga do Aço ABNT 4340**. 2002. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2002.

A figura 2.7 mostra como o processo de *shot peening* efetua o bloqueio de propagação de trincas.

De maneira geral, as tensões residuais compressivas, localizadas na superfície, são benéficas, pois retardam ou impedem abertura e o avanço de trincas de fadiga.⁴⁹

O aumento da resistência á fadiga de materiais jateados pode ser explicado em duas formas: a tensão de compressão formada nas camadas superficiais opõem-se às forças e momentos externos e a inibição de escorregamento de finas camadas de metal na direção da máxima tensão de cisalhamento. Para ambos os casos uma maior força é requerida para reiniciar estes dois eventos. Quando iniciada uma trinca, três fatores dominam o comportamento da fadiga: o primeiro fator reside na resistência à fadiga do material não jateado, o segundo leva em conta a tensão residual superficial e o terceiro associa a concentração de tensão nos entalhes produzidos pela agressão das esferas do jateamento.¹⁵

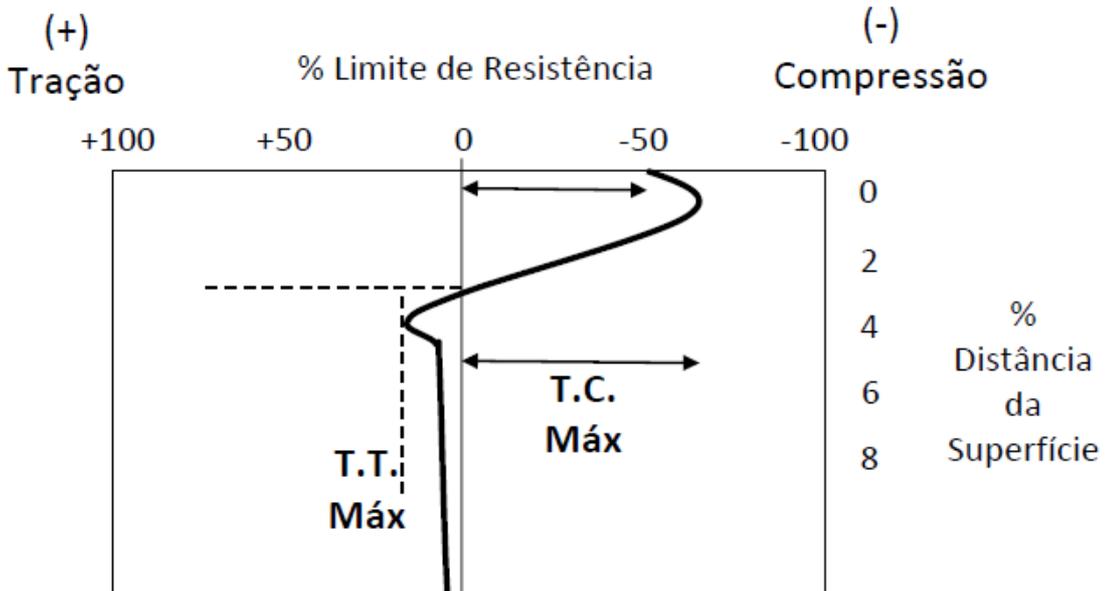
FIGURA 2.7 - Bloqueio do crescimento de trincas de fadiga através do efeito da tensão residual compressiva superficial



FONTE: COLOSIO, M. A. **Uma abordagem vida em fadiga em barra estabilizadora automotiva considerando defeito superficial fisicamente pequeno.** 2003. 2224 f. Tese (Doutorado em Ciências na área de tecnologia nuclear) – IPEN, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

A figura 2.8 mostra a atuação *shot peening* em uma amostra e alguns de seus conceitos envolvidos com suas respectivas siglas.

FIGURA 2.8 - Principais características do perfil de tensões residuais produzido pelo *shot peening*



FONTE: SCURACCHIO, B. G. **Tensões induzidas por shot peening e durabilidade de molas em lâmina.** 2012. 113 f. Tese (doutorado em Engenharia metalúrgica e de Materiais) – Universidade Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

Onde, as siglas correspondentes representados na figura:

- T. S. (Tensão superficial)- tensão residual medida exatamente na superfície do material.
- T.C. Máx. (Tensão compressiva máxima) – Máximo valor da tensão residual compressiva, situada pouco abaixo da superfície
- P (profundidade) – Profundidade da camada compressiva determinada pelo ponto em que a tensão residual passa pelo ponto 0.
- T.T. Máx. (Tensão trativa máxima) – Máximo valor de tensão residual de tração

Contudo, dependendo dos níveis de deformação envolvidos no carregamento cíclico, o jateamento de esferas pode promover ou não uma melhoria da resistência à fadiga no material, por exemplo, em carregamentos elevados próximos ao limite de escoamento, ocorre uma plastificação das camadas superficiais, a qual inibe o efeito benéfico das tensões residuais. Neste caso é esperado um comportamento similar entre o material com ou sem jateamento.¹⁵

2.5 RELAXAÇÃO NAS TENSÕES RESIDUAIS

Para componentes mecânicos sujeitos a cargas cíclicas assimétricas que levam a deformação plástica, a maioria dos materiais apresenta o fenômeno de tensão média de relaxamento.²⁶ A relaxação das tensões residuais pode ocorrer por uma interação complexa de um grande número de fatores. Ela depende não somente do estado da tensão residual presente, mas também das características das condições de carregamento, da geometria e do meio em que se encontra o material.⁸

A relaxação de tensões residuais pode ocorrer decorrente de processos térmicos ou mecânicos e também com o tempo.

A temperatura causa o relaxamento das tensões residuais, agindo como um facilitador para a movimentação atômica, a qual é controlada pelas movimentações das discordâncias e ou precipitação de fases secundárias. Vários pesquisadores como Barraganz e Choudhry^{50, 51} estudam o efeito térmico de relaxação de tensões residuais.

Entretanto, mesmo ocorrendo o relaxamento das tensões residuais compressivas devido à temperatura, ainda se obtém uma melhora da vida em fadiga devido às deformações plásticas superficiais ainda presentes.^{51,52}

Especificamente nesse trabalho, será estudada a relaxação de tensões residuais oriundos do processo mecânico de fadiga em regime cíclico.

A relaxação de tensões residuais normalmente tem lugar nos primeiros ciclos, seguido por uma diminuição mais gradual durante o tempo de vida. O relaxamento durante o primeiro ciclo (quase estático) ocorre quando ocorre a superposição das tensões aplicadas e tensões residuais excede o limite de fadiga, mas são menores que a tensão de escoamento.^{1, 32}

A relaxação da tensão residual superficial devido ao carregamento cíclico deve ocorrer ao longo da vida de um componente em fadiga, quando a soma da tensão residual e do carregamento em compressão ou tração excede a resistência local para ocorrência da deformação plástica. Isto significa que o relaxamento da tensão residual causará plastificação de regiões superficiais e ainda com maior intensidade para maiores amplitudes de tensão de carregamento.¹⁵

As tensões residuais podem ficar parcialmente ou completamente relaxadas durante a vida de fadiga. Em geral, alcançam um estado estabilizado quando o carregamento cíclico está próximo limite de fadiga. Por conseguinte, a resistência à fadiga é amplamente relacionada com as tensões residuais estabilizados atuando na zona mais crítica. É bem conhecido que a relaxação da tensão residual é um fenômeno complexo que pode depender da interação de vários fatores, tais como a amplitude de tensão cíclica, o modo de carga, o número de ciclos, características do material, e o processo de acabamento de superfície.³²

Nos casos onde ocorre somente à deformação plástica da superfície, a tensão residual, após o descarregamento, deverá ficar sob tensão na mesma direção, porém de sinal oposto da tensão aplicada. Esse efeito se deve a reação do material abaixo da superfície e muitas vezes são utilizadas intencionalmente para induzir tensões residuais compressivas, como é o caso do *shot peening*.¹

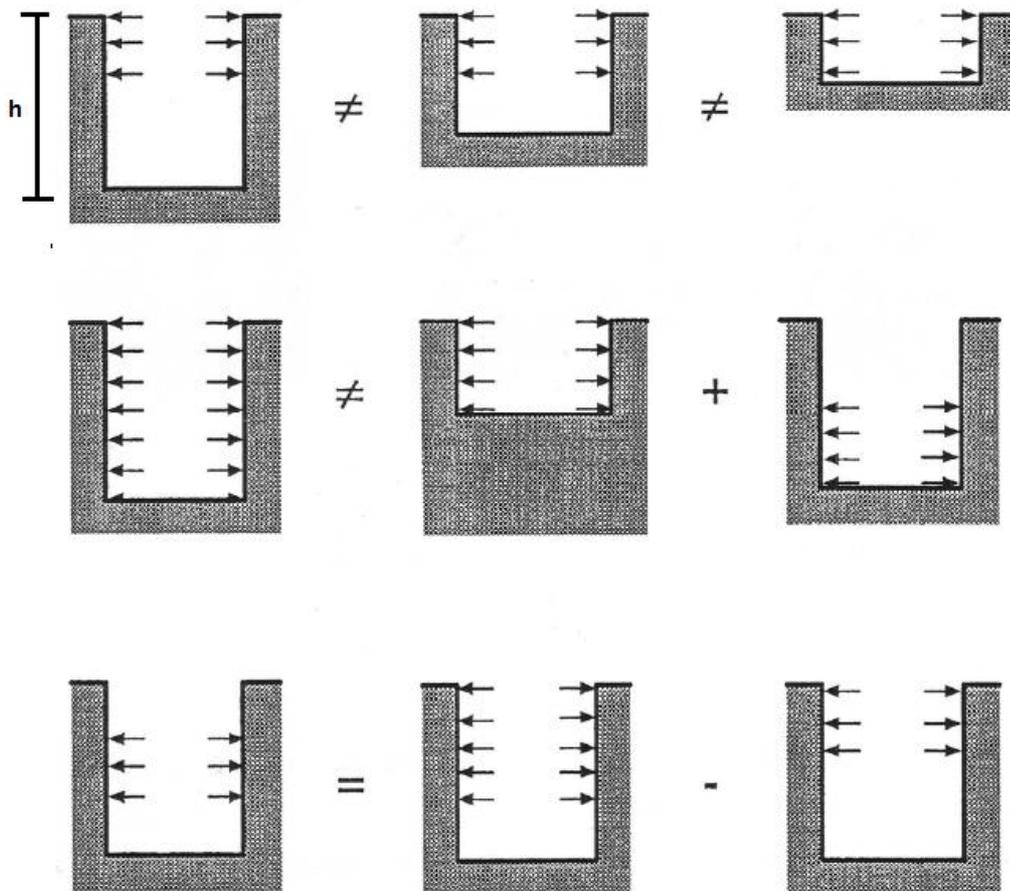
Nesse campo de tensões residuais criado pelo *shot peening* também ocorre relaxação durante o carregamento cíclico. O relaxamento durante sucessivos ciclos está relacionado com a resistência à deformação cíclica e tem atraído a atenção de vários pesquisadores, utilizando abordagens experimentais e numéricas. Assim, cálculos de previsão à integração de tensões residuais na resistência à fadiga, sem

considerar o seu relaxamento durante o funcionamento, conduzem a modelos matemáticos imprecisos para a confiabilidade dos componentes e estruturas.³²

Algumas abordagens sobre o relaxamento das tensões residuais em função do carregamento mostraram que o relaxamento deve ocorrer ao longo da vida cíclica, porém, não desaparece totalmente; todavia, para amplitudes de carregamento elevadas, próximas ao limite de escoamento do material, a tensão residual pode ser totalmente eliminada.¹⁵

Quando a tensão residual varia em profundidade, as tensões nas camadas intermediárias não representam a tensão residual atual, mas a tensão equivalente uniforme (da superfície até à profundidade h) que produziria a mesma relaxação de deformação aquela profundidade. Esta situação se encontra demonstrada esquematicamente na Figura 2.9.³⁴

FIGURA 2.9 - Relações entre as discordâncias ou deformações na superfície provocada pela relaxação de tensões residuais tendo em conta a variação da profundidade.



FONTE: Adaptado de RIBEIRO, J. E.. **Caracterização Experimental e Numérica de Campos de Tensões Residuais Provocadas por Processos de Fabrico**. 2006. 278 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, 2006.

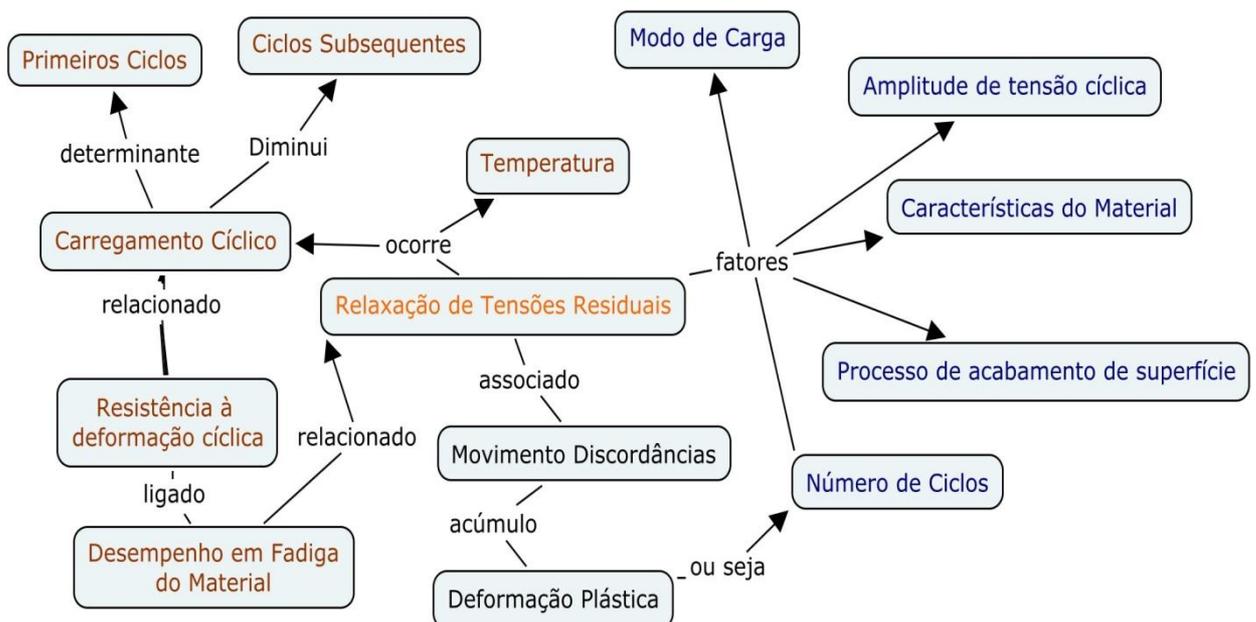
Torres⁹ cita alguns trabalhos, como Zeller e Kodama que mostram que as tensões residuais induzidas por *shot peening* relaxam proporcionalmente ao número de ciclos. Esses autores observaram um grande relaxamento já no primeiro ciclo de fadiga e uma pequena diminuição da tensão residual na superfície nos ciclos seguintes.

Há um consenso também da relação de que uma maior amplitude de tensão tem uma maior influência sobre o relaxamento de tensões residuais.⁵³

Para a grande maioria dos estudos sobre a relaxação de tensões residuais em ligas de alumínio, o quadro geral mostra um comportamento de relaxamento moderado. Para outros, o relaxamento foi mínimo. Seppi⁵⁴ observou uma redução de 20% da tensão residual em alumínio 7075-T6 que foram submetidos a testes de fadiga axial. Bathias⁵⁵ conduzindo um estudo de difração de raios-X e emissão acústica de danos por fadiga em ligas de alumínio observou um relaxamento de 10 a 40% de tensões residuais em ligas de alumínio 2024 e 7075. Zinn⁵⁶ também observou um relaxamento de 30 a 40% de tensões residuais em ligas de alumínio 7020, 6082, 5754, 5083 e 2017 para flexão alternada, enquanto para liga 6082-T5, Fontanari⁵⁷ relatou 5 a 20% de relaxação.

A Figura 2.10 ilustra de maneira resumida os fatores e influências discutidos nesse capítulo no que se refere à relaxação de tensões residuais.

FIGURA 2.10 – Esquema representativo sobre a relaxação das tensões residuais



FONTE: A Autora

2.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

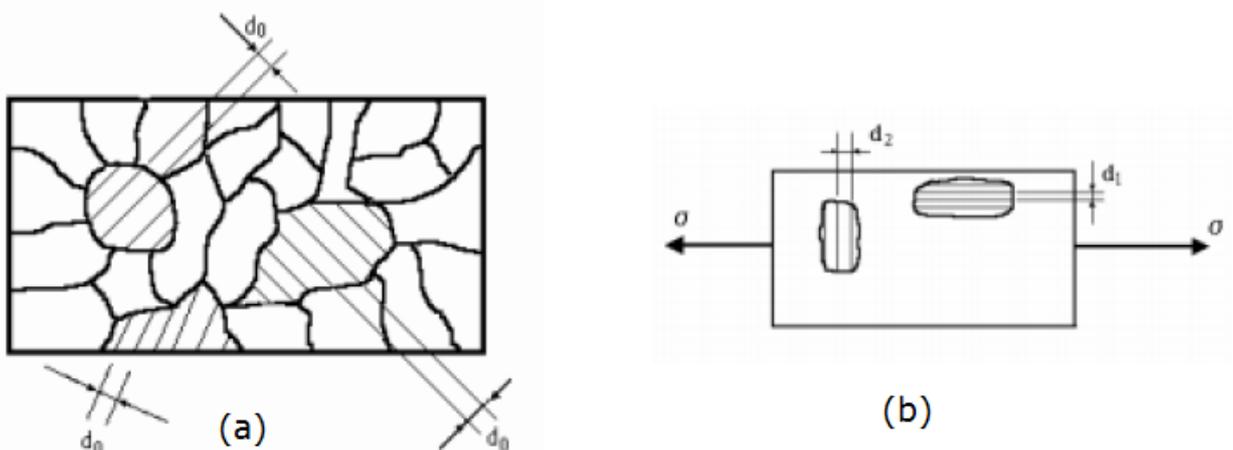
O método de difração de raios x é uma técnica bem estabelecida para medição de tensões residuais em função de apresentar as seguintes características:

- não é destrutivo, com possibilidade de fazer medidas em áreas muito localizadas ($<1\text{mm}^2$), dando informações da micro e macrotensões;
- como método não destrutivo, permite a caracterização de tensões apenas na superfície. Entretanto, removendo-se camadas superficiais de material através de ataque químico, é possível avaliar tensões internas sucessivamente;
- sendo um processo de boa repetibilidade e velocidade de respostas relativamente alta é adequado para controle de muitos parâmetros que atuam no processo produtivo.⁵⁸

O método baseia-se no fato da tensão presente na amostra manifestar-se na rede cristalina dos grãos de formas individualizadas mudando os espaçamentos interatômicos entre os seus planos.²⁸

Num material policristalino, isento de tensões, o espaço entre planos cristalinos não varia. Conforme é possível visualizar na Figura 2.9, a presença de um estado de tensões faz com que as distâncias entre planos variem, aproximando-se se a tensão for de compressão e afastando-se se a tensão for de tração, como pode ser notado na Figura 2.11 (b).⁴²

FIGURA 2.11 - Distância interplanar de um corpo (a) isento de tensões, (b) na presença de um campo de tensões



FONTE: CARDOSO, F. A. A. **Medição de tensões residuais a partir de um ensaio de flexão em quatro pontos**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.

Os ângulos de difração permitem descrever a estrutura dos cristais com alto grau de precisão e segurança. Estes ângulos dependem do comprimento de onda dos raios X e das distâncias interplanares do material.⁵⁹

Em um material cristalino os átomos estão regularmente dispostos de acordo com um arranjo tridimensional periódico. Uma das características físicas de um material deste tipo é a sua distância entre planos cristalinos. Quando os raios X monocromáticos incidem na superfície do material cristalino, os mesmos são difratados segundo a lei de Bragg.

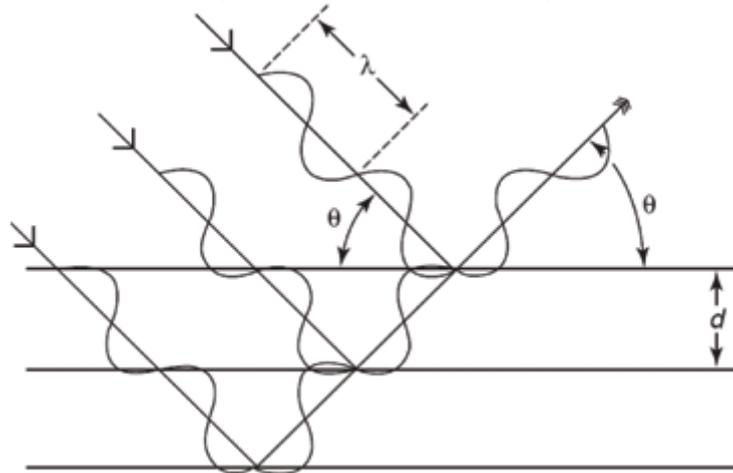
Neste caso, o raio difratado e o raio incidente são simétricos, relativamente ao plano de difração, e respeitam a seguinte equação 6.

$$2d \operatorname{sen} \theta = n\lambda \quad (6)$$

onde, d é a distância entre planos cristalinos consecutivos; θ é o ângulo de Bragg; n é número da ordem de difração e λ , por sua vez, representa o comprimento de onda dos raios X.

A figura 2.12 mostra o espalhamento e difração de raios X em um retículo cristalino, assim como as variáveis envolvidas na equação de Bragg.

FIGURA 2.12 - Espalhamento e difração de raios X em um arranjo cristalino



FONTE: ROCHA, A., NUNES M R.; HIRSCH, T. Comparação entre difração de raios X e "método do furo cego" para medição de tensões residuais em barras cilíndricas. **Revista Matéria** . v. 14. n. 3. 2009. p. 1-14.

O método mais comumente utilizado para a determinação de tensões é o método $\operatorname{sen}2\psi$. Um número de medidas de difração de raios X são feitas em diferentes inclinações ψ (ψ).³⁸

As medidas de tensões residuais são determinadas de acordo com a Equação 7: ^{38,58}

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{(1+\nu)\text{sen}^2\psi} + \frac{d\phi\psi - d_0}{d_0} \quad (7)$$

Onde:

σ_{ϕ} - a tensão residual superficial;

ψ – Ângulo entre a superfície normal e a normal dos planos cristalográficos;

$d\phi\psi$ - espaçamento interplanar definido pelos ângulos ϕ e ψ , obtido a partir da posição do pico de difração para um dado plano do retículo cristalino (hkl);

d_0 - espaçamento interplanar livre de tensão do plano (hkl) do retículo cristalino;

E - Módulo de elasticidade do alumínio;

ν - coeficiente de Poisson do alumínio.

A relação linear na Equação 1 para tensão residual implica na representação gráfica da deformação do retículo cristalino *versus* $\text{sen}2\psi$ será uma reta, a qual o gradiente é função de σ_{ϕ} , E e ν . O valor de σ_{ϕ} pode ser calculado a partir do gradiente da linha reta para vários ângulos de inclinação ψ . Usando a Lei de Bragg, a Equação 6 pode ser reescrita como. ⁵⁸

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{(1+\nu)} + \frac{\text{cotg}\theta\Delta\theta}{\text{sen}^2\psi} \quad (8)$$

Esta equação permite o cálculo da tensão em qualquer direção a partir de espaçamentos interplanares determinada a partir de duas medições, em um plano perpendicular à superfície e que contém a direção da tensão a ser medida.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E METODOS

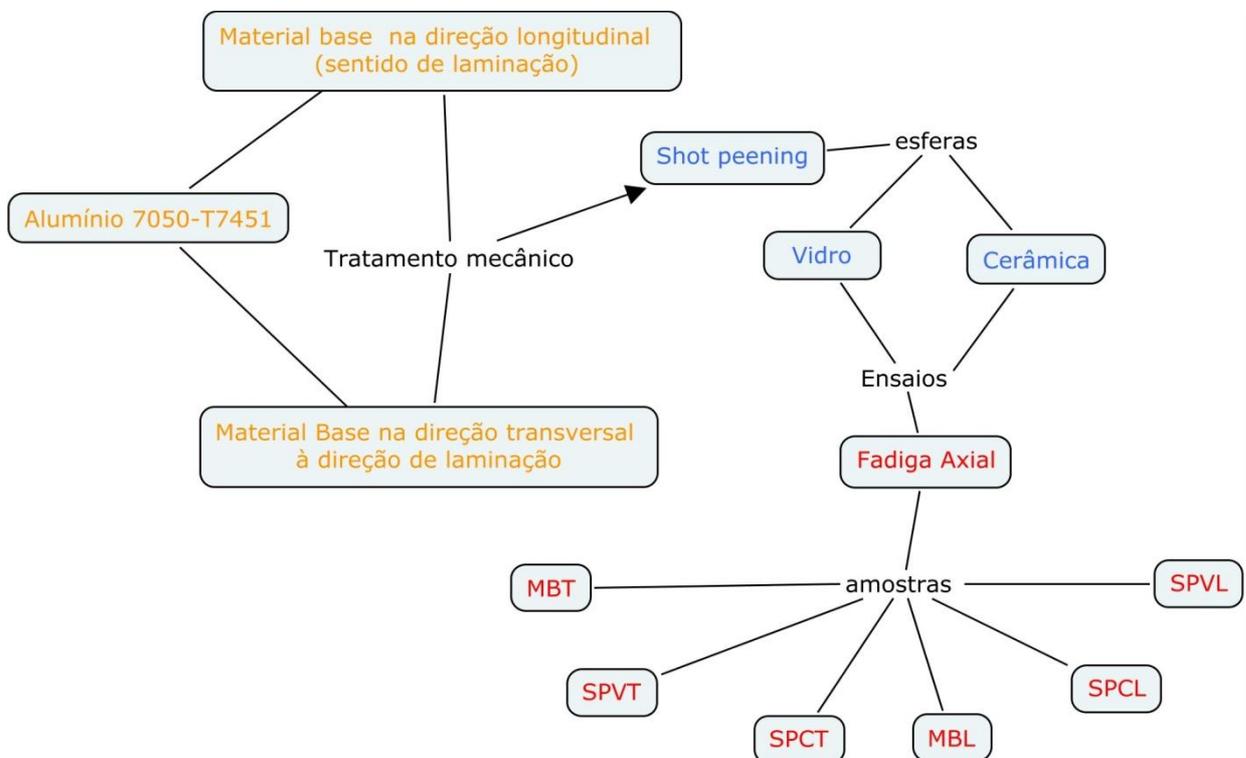
3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MATERIAL UTILIZADO

Para o desenvolvimento desse projeto de pesquisa foram utilizados os resultados de pesquisa de tese de doutorado intitulado “Efeito das tensões residuais na fratura e resistência à fadiga da liga de alumínio 7050- T7451”. Como também, o tratamento de superfície, ensaios de fadiga e o perfil original de tensão residual não fazem parte do procedimento deste projeto de mestrado. No entanto, é necessário descrever as condições que os mesmos foram utilizados na presente pesquisa.

A placa de alumínio da liga 7050 na condição T7541, de aplicação estrutural foi fornecida pela EMBRAER-LIEBHERR (ELEB), com a qual foi realizado o tratamento de superfície de *shot peening*.²⁸

O processo de *shot peening* realizado na ELEB seguiu o padrão de qualidade aeronáutico, de acordo com as normas preestabelecidas. As condições de estudo do presente trabalho são apresentadas na figura 3.1

FIGURA 3.1 – Esquema das condições (tratamentos e ensaios) da liga de alumínio 7050- T7451 utilizada no presente trabalho.



FONTE: A Autora.

3.1.1 Processo de *Shot peening*

O tratamento de superfície por *shot peening* foi realizado pela EMBRAER-LIEBHERR (ELEB) de acordo com a norma MIL-S-13165. O jateamento do lote de corpo-de-prova foi feito sem interrupção da máquina de jateamento para evitar variáveis do processo, com uma cobertura correspondente de 120% e todos os lados dos corpos-de-prova foram cobertos. As esferas utilizadas no processo de *shot peening* foram de esferas de vidro e esfera de cerâmica (alumina Al_2O_3). Para ambos o ângulo de incidência foi de 90° . A tabela 3.1 ilustra os parâmetros do processo de *shot peening*.

TABELA 3.1 - Parâmetros do processo de *shot peening*

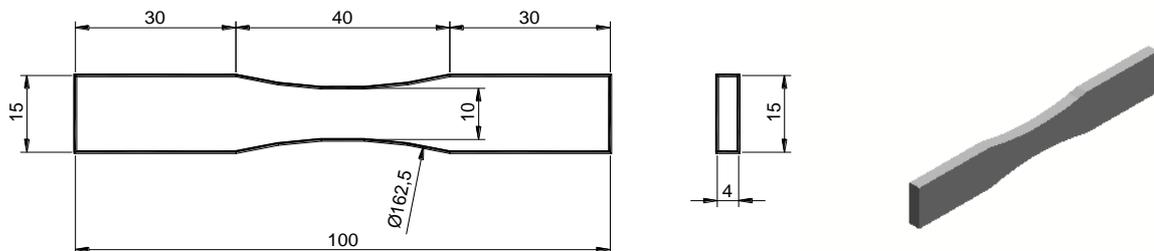
ESFERA	DIÂMETRO MÉDIO (mm)	PRESSÃO (psi)	DISTÂNCIA (mm)	INTENSIDADE ALMEN	COBERTURA (%)	RUGOSIDADE (μm)
Vidro	0,30 – 0,425	30	200	0,013N	120	2,09
Cerâmica	0,30 – 0,425	35	80	0,022 N	120	5,54

FONTE: CARVALHO, A. L. M. **Efeito das tensões residuais na fratura e resistência à fadiga da liga de alumínio 7050- T7451**. 2004, 213 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, Campus II, Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Guaratinguetá, 2004.

3.1.2 Ensaio de fadiga axial

Os ensaios de fadiga foram realizados conforme a norma ASTM-466, como mostra a figura 3.2, com acabamento superficial com retífica na condição de razão de carregamento $R=0,1$ na frequência de 30Hz e temperatura ambiente.

FIGURA 3.2 - Corpo de prova para fadiga axial



FONTE: CARVALHO, A. L. M. **Efeito das tensões residuais na fratura e resistência à fadiga da liga de alumínio 7050- T7451**. 2004, 213 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, Campus II, Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Guaratinguetá, 2004.³¹

Os ensaios de fadiga axial foram realizados nas seguintes condições:

Direção longitudinal

- a) Material base na condição tratada termicamente ,condição T7451 (MBL).
- b) Material base com tratamento mecânico de *shot peening* com esfera de vidro (SPVL).
- c) Material base com tratamento mecânico de *shot peening* com esfera de cerâmica (SPCL).

Direção transversal

- a) Material base na condição tratada termicamente, condição T7451 (MBT).
- b) Material base com tratamento mecânico de *shot peening* com esfera de vidro (SPVT).
- c) Material base com tratamento mecânico de *shot peening* com esfera de cerâmica (SPCT).

3.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A presente pesquisa combina os métodos de ataque eletrolítico e a difração de raios X para avaliar o perfil de relaxação de tensões residuais em 13 amostras de alumínio sob as condições de fadiga axial, *shot peening* de cerâmica e vidro, transversais e longitudinais, quando comparado ao perfil original de comportamento das amostras. A Figura 3.3 ilustra um corpo de prova fraturado por fadiga axial utilizado nesse trabalho.

FIGURA 3.3: Corpo de prova com *shot peening* de cerâmica, direção de laminação longitudinal(SPCL), após fadiga axial



FONTE: A autora

O perfil de tensões residuais das amostras foi determinado pela remoção eletrolítica de camadas e posterior determinação de raios-X de tensões residuais. O perfil de tensão residual ao longo da profundidade foi obtida ao longo da profundidade após cada remoção de material. O procedimento de remoção eletrolítica seguido de difração de raios X é usado extensivamente para revelar gradientes de tensão em superfícies endurecidas e usinados.

3.2.1 Ataque eletrolítico

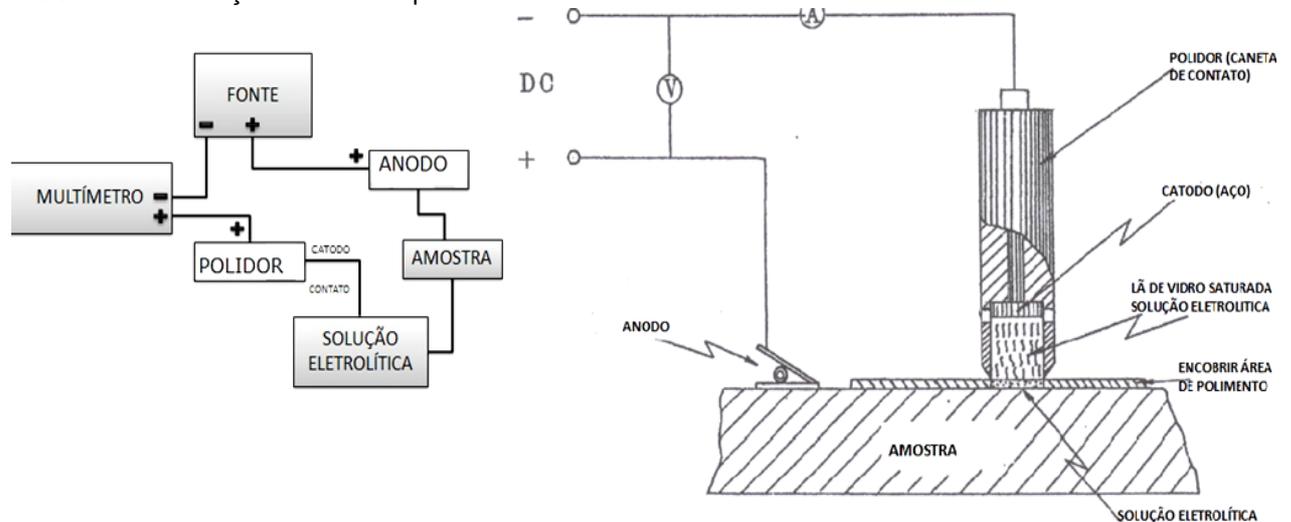
O método de medição de tensões residuais a partir da remoção de material baseia-se no equilíbrio da distribuição de tensões no material e ao princípio de superposição de tensões.²⁶

Qualquer técnica mecânica ou usinagem de descarga elétrica (EDM) usada para remover as camadas superficiais induzirá tensões residuais, alterando o campo de tensão inicial da superfície. Deste modo tais métodos devem ser evitados.³⁸

Dessa forma, o polimento eletrolítico foi o método mais adequado para traçar o perfil de relaxação das amostras, foram efetuadas medidas de tensão residual ao longo da profundidade das amostras sob as diferentes condições apresentadas no tópico 3.1.

O polimento eletrolítico foi realizado em um aparelho polidor eletrolítico Rikagu. A figura 3.4 ilustra um esboço do circuito utilizado para realizar o ataque eletrolítico para remoção de espessura da liga de alumínio.

FIGURA 3.4: Esboço sistema ataque eletrolítico



FONTE: Adaptado de RIKAGU Corporation. Electropolishing system Instruction manual. 2013.

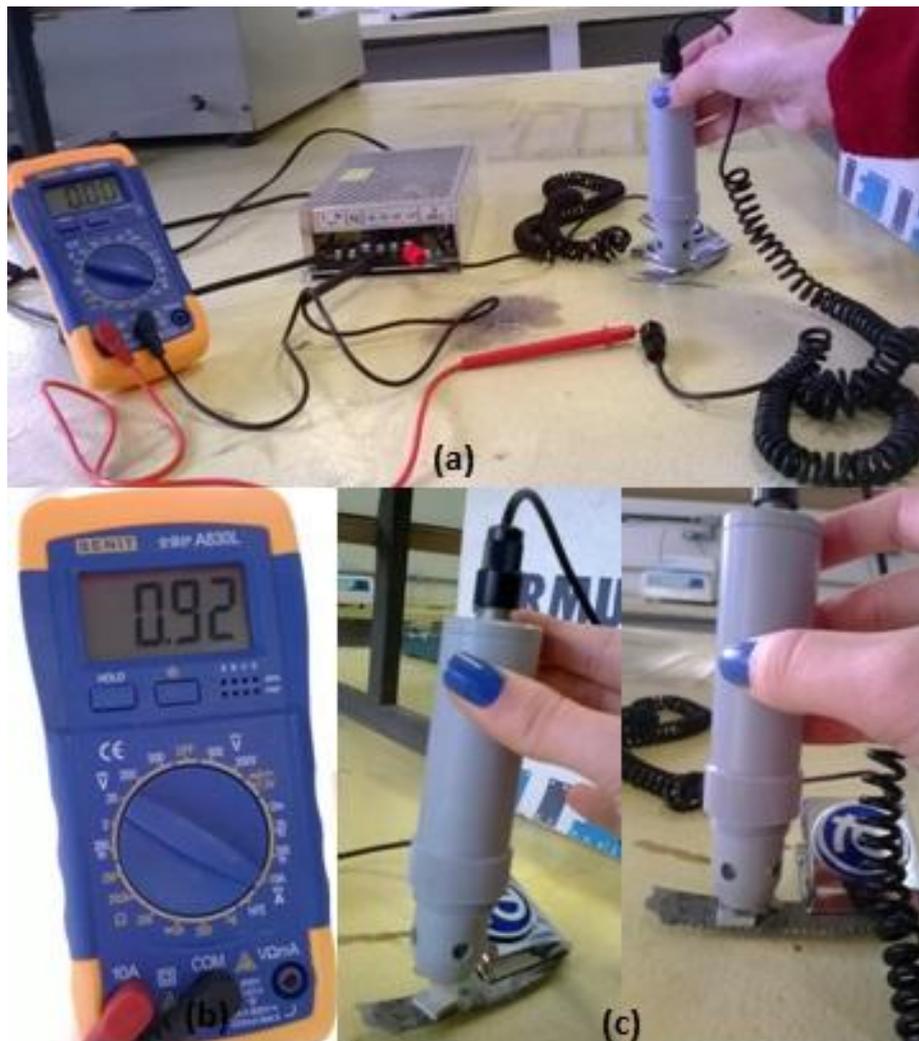
A ponta do bastão do polidor é totalmente preenchida com lã de vidro e eletrólito.

Condições do polimento:

- catodo: aço inoxidável;
- eletrólito: 10 mL de ácido fosfórico + 3 mL de ácido nítrico (60%) + 4 mL de ácido sulfúrico;
- voltagem: 12 V;
- tempo: 3 minutos para cada camada.

A corrente variou em até 1A, controlada pelo multímetro, de acordo com a quantidade de solução presente no polidor.

FIGURA 3.5 : Sistema utilizado para o polimento eletrolítico: (a) circuito eletrolítico montado para remoção de espessura do alumínio, (b) multímetro indicando corrente alcançada pelo circuito e (c) contato entre a solução eletrolítica presente no polidor e a amostra.



FONTE: A autora

Foi escolhido um ponto da superfície em cada amostra, nos quais foram realizadas as análises por difração de raios X. Para obter o perfil de tensão residual, procurou-se estabelecer uma distância mínima da superfície de fratura para as camadas serem removidas.

O contato da lã de vidro embebida com a solução eletrolítica deve ser acima da superfície da amostra a ser polida e de forma perpendicular à posição da mesma durante o tempo suficiente para a remoção da superfície do material estudado conforme apresenta a Figura 3.5(c).

As camadas removidas para a obtenção do perfil das tensões residuais de relaxação variam entre 0,01 e 0,03 mm de espessura. Após cada retirada de camada, era realizada a difração de raios X para obter a tensão residual do referido ponto.

Diversos autores discutem sobre a correção dos valores de tensões residuais como ilustrado no capítulo 2. No caso do estudo em questão, as camadas retiradas das amostras representam menos de 5% da espessura total, utilizando apenas o primeiro termo da equação 5, sem a necessidade de incremento das derivadas das tensões provenientes nas camadas anteriores. A utilização do primeiro termo da equação não resultou em diferença significativa no valor de tensão residual medida pelo aparelho de difração de raios X.

3.2.2 Difração de raios X

O método de difração de raios X é 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 atrativa para a caracterização mecânica de superfícies⁴⁸. A penetração em torno de 25 μm no caso de tubos de cobre em ligas alumínio⁵³. É um método não destrutivo em medições superficiais e pode ser aplicado a peças com qualquer forma estando apenas limitado pela acessibilidade do ponto de incidência e difração dos raios X.⁶²

Para efetuar a caracterização de um material em profundidade é possível remover sucessivas camadas do material através de polimento eletrolítico ou químico, sendo considerado, neste caso, um método destrutivo.¹

As análises de tensões residuais foram realizadas no Laboratório Multiusuário da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) utilizando o aparelho da marca **RIGAKU**, modelo ULTIMA IV, com tubo anodo de Cr. (FIGURA 3.6)

FIGURA 3.6: Difratorômetro de raios X



FONTE: DAIRIX, Equipamentos analíticos.

O ângulo 2θ foi fixado em $137,8^\circ$ referente aos planos (311). Para a determinação de tensões residuais ao longo da profundidade foi aplicado o método $\sin^2\psi$. Nesse método o comprimento de onda é constante para as medidas de difração e o ângulo θ de incidência dos raios X é fixo, variando apenas o ângulo ψ resultando em medidas de deformação em uma única família de planos, que é previamente escolhida por apresentar melhor resolução do ângulo θ de difração.

A radiação do cromo foi utilizada pois apresenta excelente relação do pico-BG na região do plano (311) do alumínio com o 2θ em $137,8^\circ$. BG é uma abreviação para o termo *background* relativa à intensidade de fundo na posição de pico.

As demais especificações do aparelho de difração de raios X utilizado para as amostras seguem na tabela 3.2.

TABELA 3.2: Condições de varredura utilizadas para a difração de raios x.

Voltagem (mA)	Potência no tubo (Kv)	Step Scan	Velocidade (°/min)	Faixa
30	40	0,02	0,5	133 a 140 (Alumínio)

FONTE: A autora

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO *SHOT PEENING* NA VIDA EM FADIGA

Considera-se para o presente trabalho, ao caracterizar os níveis de tensão a que as amostras foram submetidas, fadiga de baixo ciclo entre 10^3 e 10^4 ciclos; médio ciclo quando envolvem tensões a 10^5 ciclos e alto ciclo quando aplicado de 10^6 a 10^7 ciclos.

Após os tratamentos mecânicos de *shot peening* de vidro e cerâmica e ensaios de fadiga axial nas diferentes direções de laminação descritos no item 3.1, foi possível estabelecer relações entre o aumento da resistência a fadiga com o tipo de *peening* e intensidade de carregamento.

Para avaliar a influência do *shot peening* na resistência à fadiga axial as Figuras 4.1 e 4.2 ilustram o comportamento das amostras com *shot peening* de vidro e cerâmica, respectivamente comparado ao material base nos diferentes níveis de carregamento.

A Figura 4.1 exemplifica a relação de efeito benéfico do *shot peening* para o aumento da vida em fadiga, quando se compara o material base com as amostras que possuem *shot peening* com esfera de vidro nas direções longitudinal e transversal à laminação. É possível observar que o comportamento de vida em fadiga das amostras com *shot peening* de vidro, aumentou de maneira significativa em todos os níveis de tensão.

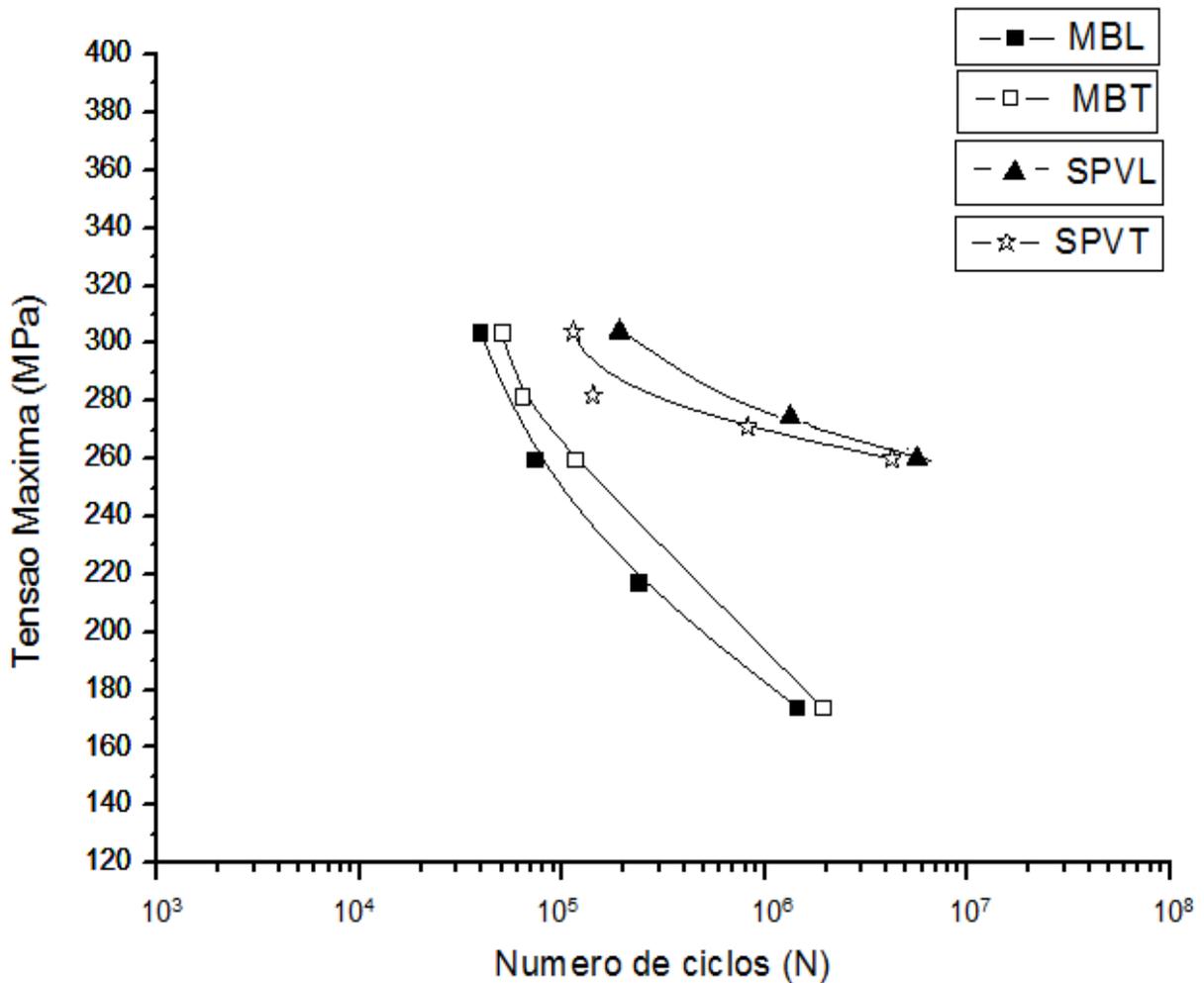
Na tensão de 304 MPa por exemplo, enquanto o material base obteve valores de probabilidade de falha em fadiga de (5×10^5 ciclos), com *shot peening* obteve (2×10^6 ciclos).³¹

Conforme Dieter, o *shot peening* é o método mais efetivo de aumentar o desempenho em fadiga de um componente consiste na formação de um campo de tensão residual compressiva na superfície do material. As tensões residuais podem ser consideradas como tensões aprisionadas, que estão presentes numa parte não submetida a uma força externa.³

Comparando as amostras de *shot peening* de vidro entre si, pode-se notar que a direção longitudinal (SPVL) obteve valores de vida em fadiga superiores em relação à direção transversal (SPVT), nos três níveis de tensão (baixo, médio e alto

ciclo). Já para o material base, foi na direção transversal que houve aumento de vida em fadiga comparado com a direção longitudinal.

FIGURA 4.1 – Curvas σ N de fadiga axial, entre material base e *shot peening* com esfera de vidro nas direções L e T, respectivamente



FONTE: A autora

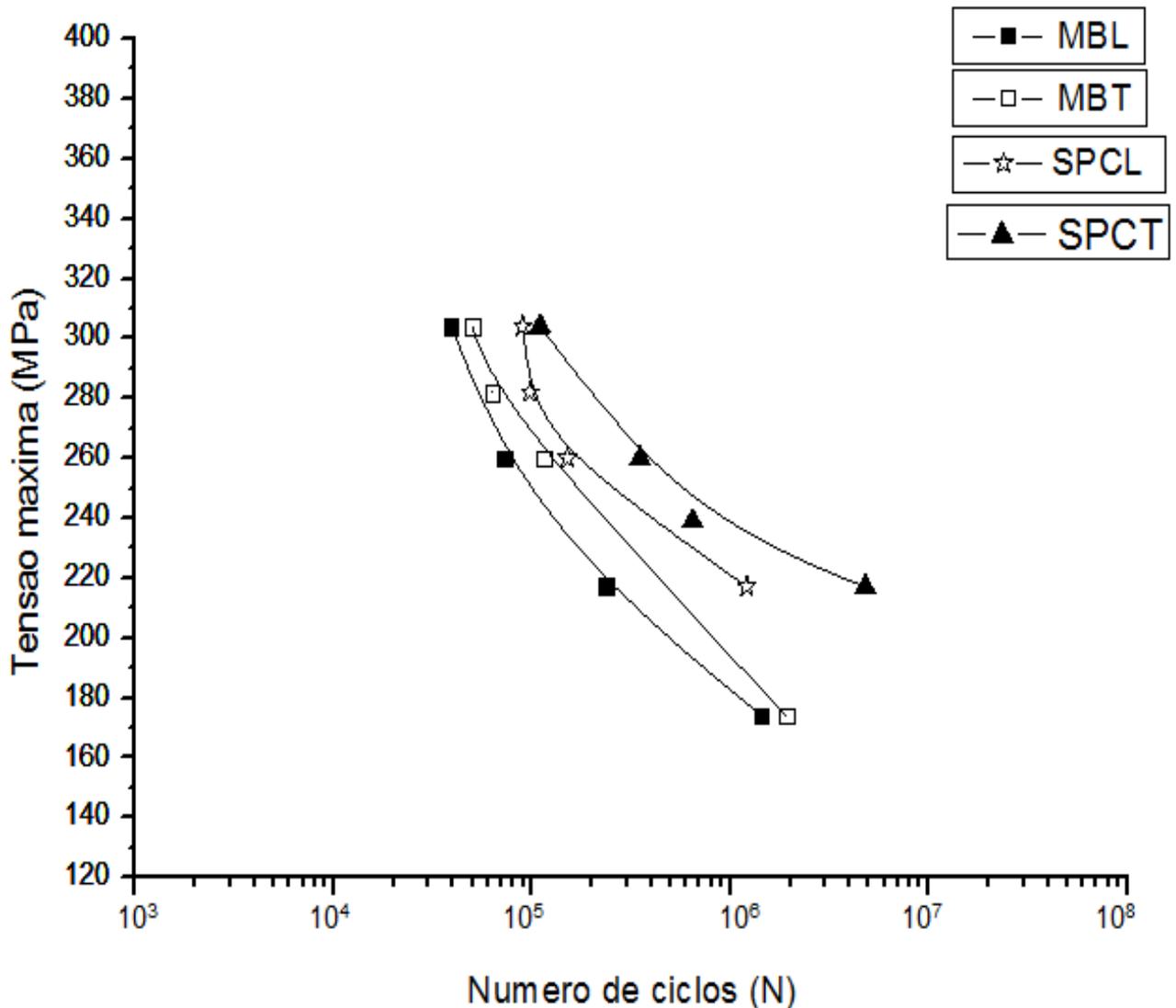
Para as amostras com *shot peening* com esfera de cerâmica nas direções longitudinal e transversal, como mostra a Figura 4.2, é possível observar que o processo de *shot peening* aumentou a vida em fadiga em relação ao material de base nas direções L e T, semelhante ao que aconteceu com as amostras com *shot peening* de vidro (Figura 4.1).

Na tensão de 304 MPa, o material com *shot peening* a probabilidade de falha para a vida em fadiga é de (100.178 ciclos) enquanto no material base o valor é de (49.983 ciclos). No regime de médio ciclo na tensão de 260 MPa, a probabilidade de falha para o *shot peening* é de (224.817 ciclos) enquanto no metal

base é de (105.794 ciclos). No regime de alto ciclo na tensão de 217 MPa, o *shot peening* aumentou o valor para (2.814.024 ciclos), enquanto no material base o valor de probabilidade de falha é de (1.146.423 ciclos).

Além disso, é possível constatar a relação entre a quantidade de carregamento cíclico e tensão. Quanto maior a tensão, menor a quantidade de ciclos necessários para o material romper. O número de ciclos de tensão que um metal pode suportar antes de se romper aumenta com o decréscimo da tensão. A não ser que haja indicação em contrário, N é tomado como sendo o número de ciclos de tensão necessários para causar a fratura completa do corpo de prova.³

FIGURA 4.2 – Curvas σ N de fadiga axial, entre material base e *shot peening* com esfera de cerâmica nas direções L e T, respectivamente



Outro ponto interessante se refere ao fato de as amostras com *shot peening* de cerâmica na direção transversal obterem um melhor comportamento em fadiga comparado a amostra com *shot peening* de cerâmica na direção longitudinal nos diferentes níveis de carregamento.

Para as amostras com *shot peening* de vidro (Figura 4.1) o comportamento foi inverso: houve aumento de vida em fadiga nas amostras com *shot peening* de vidro longitudinal comparado com o *shot peening* de vidro transversal.

Tanto as esferas de cerâmica como as esferas de vidro ofereceram um ganho significativo no comportamento de resistência à fadiga (25% e 50%) respectivamente, conforme Carvalho.³¹

O melhor desempenho dos espécimens com *shot peening* de vidro nas direções longitudinal e transversal em comparação com o *shot peening* de cerâmica foi associado à menor rugosidade para a condição com esfera de vidro ²⁸. Já que a intensidade do *peening* para cerâmica e vidro foram diferentes, ou seja, os valores de rugosidade; $R_a = 2,09 \mu\text{m}$ para a esfera de vidro e $R_a = 5,54 \mu\text{m}$ para a esfera de cerâmica conforme mostra a tabela 3.1.

O tratamento da superfície tem grande influência para o início da fadiga, já que a superfície é um local comum para nucleação da trinca. O tratamento superficial de *shot-peening* eleva a resistência mecânica e à fadiga. Podem causar diferentes graus de rugosidade na superfície, e provocar diferentes acúmulos de tensão que induzem a diferentes níveis de resistência a fadiga.⁶⁴ Os diferentes graus de rugosidade induzidos pelo vidro e a cerâmica explicam a divergentes deformações da superfície das amostras, influenciando na intensidade da vida em fadiga.

A intensidade de *shot peening* que produz melhores resultados na vida em fadiga é influenciada por vários fatores: relaxação do campo de tensão residual compressivo; condições criadas pelo *shot peening* e a possibilidade do campo de tensão residual compressiva retardar a propagação da trinca da superfície.⁶⁵

4.2 ESTUDO DA RELAXAÇÃO DAS TENSÕES PROVOCADO PELO PROCESSO DE FADIGA AXIAL

O aumento da vida em fadiga nas amostras estudadas após o tratamento mecânico superficial com *shot peening* de vidro e cerâmica nas diferentes direções

de laminação em fadiga axial mostrou o efeito benéfico desse tratamento nas amostras estudadas quando comparadas ao material de base.

Contudo, Prevey ⁶⁶ afirmou que para caracterizar o efeito do *shot peening* em um corpo não basta a medida das tensões residuais na sua superfície uma vez que, a história termomecânica do material pode induzir tensões na superfície na ordem daquelas obtidas pelo *shot peening*. Portanto, a medida da tensão residual na superfície para a caracterização do *shot peening* é uma condição necessária, mas não suficiente; uma vez que as tensões desenvolvidas na superfície a partir do histórico termomecânico e a induzida pelo processo de *shot peening* são muito próximas.

Compreender e quantificar com precisão o relaxamento de tensão residual e redistribuição sob carga mecânica cíclica ainda permanecem desafios para os pesquisadores. ⁶⁷

Para investigar o campo de tensões residuais induzidas pelo *shot peening* de vidro e cerâmica após o processo de fadiga para diversos níveis de tensão (baixo, médio e alto ciclo); foi observado a relaxação de tensões causado pelo carregamento cíclico axial ao longo da profundidade para obtenção dos perfis de relaxação e análise concreta dos efeitos envolvendo o *shot peening* na tensão residual, e conseqüentemente, na vida em fadiga dos materiais. Assim, a principal contribuição deste trabalho foi obter o perfil de relaxação das tensões residuais nas direções L e T com processo de fadiga axial, conseqüentemente, estudar a influência do regime de carregamento cíclico na relaxação do CTRC.

4.2.1 Estudo do campo de tensão residual das amostras com *shot peening* com esfera de vidro

A tabela 4.1 mostra os valores de tensões residuais obtidos com a remoção de cada camada ao longo da espessura do corpo de prova, a tensão máxima aplicada no teste de fadiga nos regimes de baixo, médio e alto ciclo; para as amostras de *shot peening* com esfera de vidro.

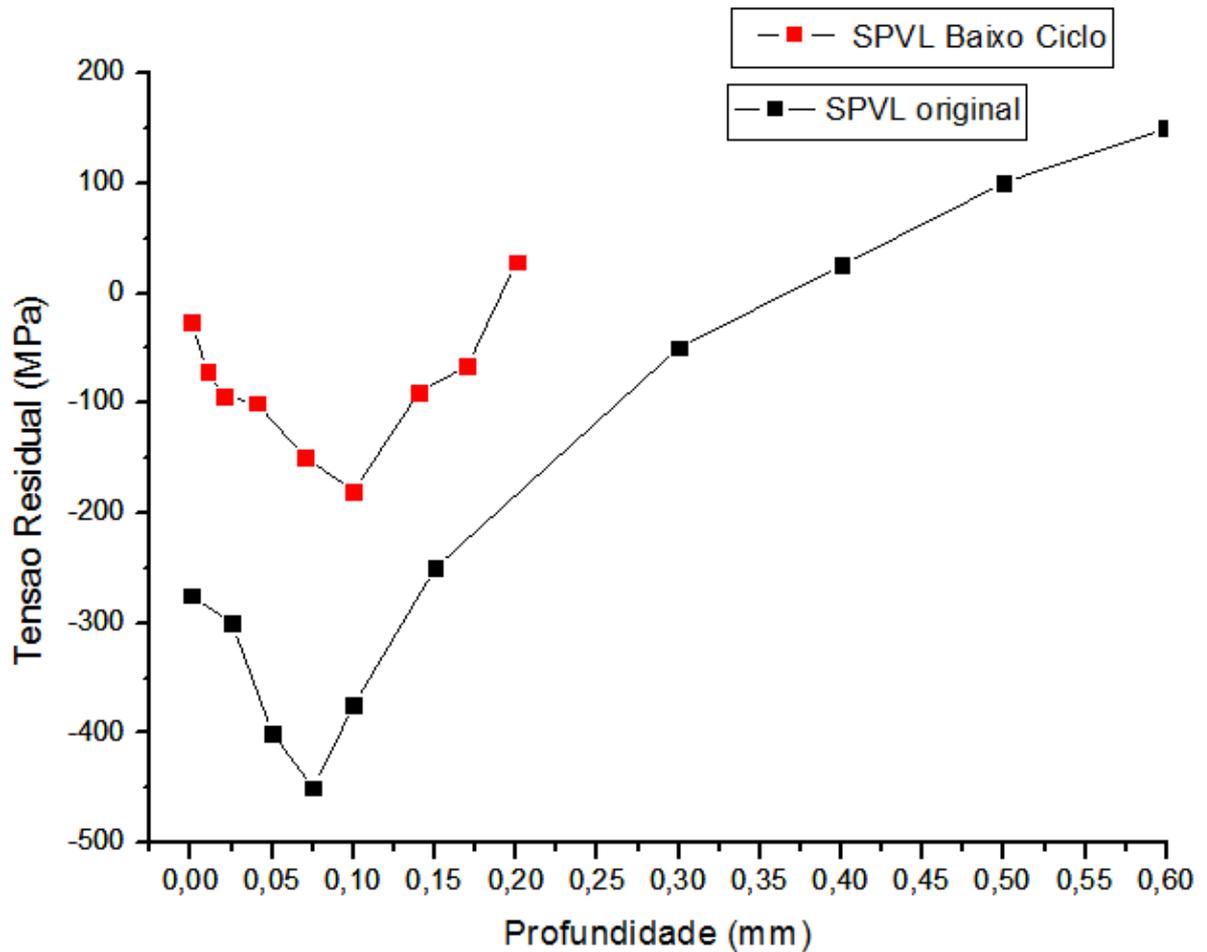
TABELA 4.1 – Resultados dos valores de tensão residual ao longo da profundidade para material base com shot peening com esfera de vidro nas direções L e T

<i>Shot peening</i> com esfera de vidro longitudinal (SPVL)				<i>Shot peening</i> com esfera de vidro transversal (SPVT)			
Ciclos	Tensão (MPa)	Profundidade Camada (mm)	Tensão Residual (MPa)	Ciclos	Tensão (MPa)	Profundidade Camada (mm)	Tensão Residual (MPa)
Baixo 9×10^4 ciclos	304	0	-27	Baixo 8×10^4 ciclos	304	0	-117
		0,01	-71			0,02	-126
		0,02	-94			0,05	-146
		0,04	-100			0,08	-211
		0,07	-149			0,12	-194
		0,11	-198			0,15	-150
		0,14	-90			0,18	-88
		0,17	-66			0,22	-32
Médio 3×10^5 Ciclos	282	0	-118	Médio 3×10^5 ciclos	304	0	-207
		0,01	-135			0,01	-208
		0,03	-211			0,04	-303
		0,06	-274			0,07	-234
		0,09	-288			0,09	-167
		0,13	-173			0,12	-74
		0,15	-111			0,15	-50
		0,18	-70			0,2	-23
Médio 6×10^5 Ciclos	282	0	-80	Alto 5×10^6 ciclos	260	0	-148
		0,03	-128			0,01	-209
		0,04	-194			0,04	-240
		0,07	-237			0,06	-281
		0,09	-176			0,08	-385
		0,12	-154			0,11	-238
		0,18	-105			0,13	-137
		0,2	-62			0,15	-81
Alto 5×10^6 ciclos	260	0,23	31			0,18	22
						0,22	73
						0	-153
						0,01	-161
						0,03	-194
						0,06	-215
						0,08	-274
						0,11	-312
		0,13	-166				
		0,15	-89				
		0,18	-32				
		0,2	9				

FONTE: A Autora

A figura 4.3 mostra o perfil de tensão residual original introduzida pelo *shot peening* com esferas de vidro na direção longitudinal após o processo de fadiga axial sob uma tensão de 304 MPa no regime de baixo ciclo (9×10^4 ciclos) e consequentemente o campo de tensão original.

FIGURA 4.3 – Perfil de tensões residuais por *shot peening* com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em baixo ciclo, direção longitudinal à laminação



FONTE: A autora

Pode-se observar na Figura 4.3 que o carregamento em fadiga axial influencia no perfil de tensão residual, isto é, ocorre uma redistribuição em todo o campo de tensão residual compressivo em relação ao campo original durante o carregamento cíclico. Ou seja, os máximos valores de tensões compressivas na superfície, na profundidade e na profundidade na qual as tensões residuais mudam de sinal sofreram uma redistribuição: de (-280 MPa) passou para (-27MPa), (-458 MPa em 0,1 mm) para (-198 MPa) e acima de (0,17 mm) tornou-se tensão positiva respectivamente. Neste caso, a relaxação de tensão residual correspondeu quase 100% na superfície e 57% na máxima profundidade do campo residual quando comparado ao campo original.

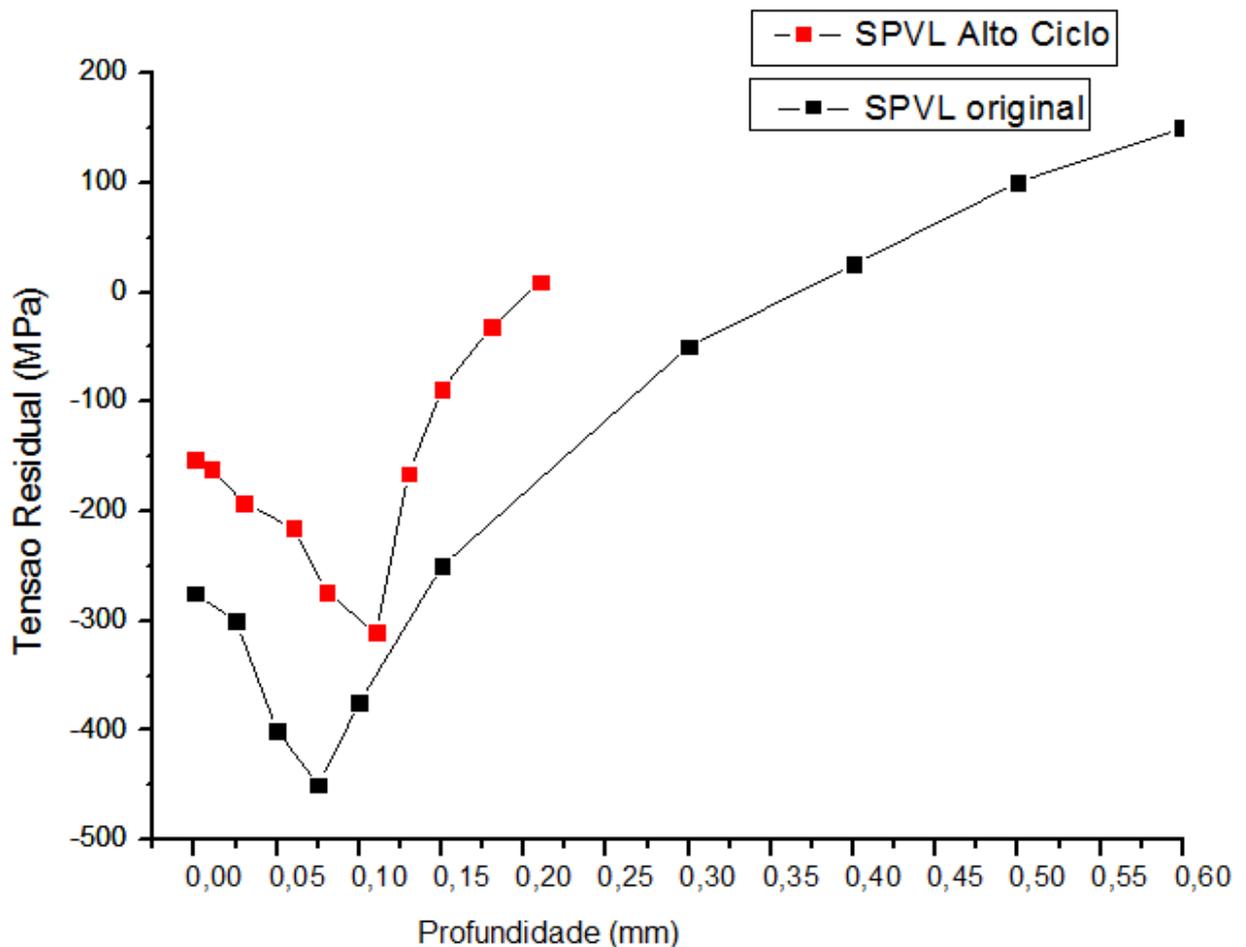
A Figura 4.4 mostra o campo de tensão residual de uma amostra também com *shot peening com esfera* de vidro na direção longitudinal, no regime de alto ciclo (5×10^6 ciclos) na tensão de 260 MPa. É possível observar na Figura que a

redistribuição do campo de tensão residual também ocorreu, na superfície a tensão residual passou de -280 MPa para (-150 MPa) resultando em uma relaxação de 46% na superfície, enquanto que a máxima de (-458 MPa) foi para (-312 MPa), correspondendo uma relaxação de 31% em relação ao campo de tensão residual original.

Isso pode ser explicado por Bignonnet ⁶⁸ que mostrou que a relaxação das tensões é proporcional ao número de ciclos e a intensidade do carregamento aplicado.

Uma vez que o relaxamento é associado com o movimento de discordâncias, por conseguinte, está correlacionada com o acúmulo de deformação plástica, ou seja, com o número de ciclos. ³²

FIGURA 4.4 · Perfil de tensões residuais por *shot peening* com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em alto ciclo, direção longitudinal à laminação

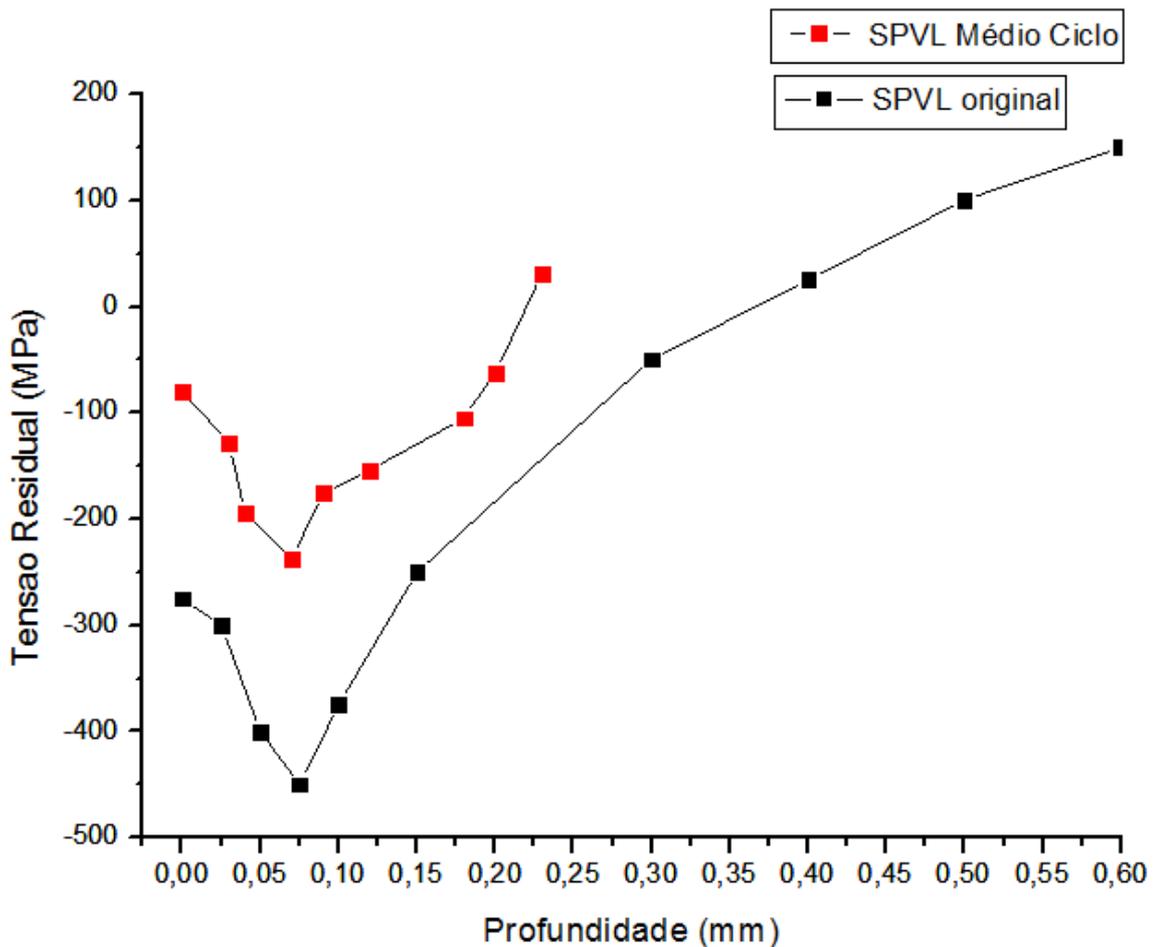


FONTE: A autora

As Figuras 4.5 e 4.6 mostram amostras com as mesmas condições das anteriores SPVL; porém ambas do regime de médio ciclo, na tensão de 282 MPa, intermediário às tensões das amostras relativas às Figuras 4.3 e 4.4, nas tensões 304 e 260 MPa respectivamente.

Na Figura 4.5 a redistribuição do campo de tensão residual na superfície passou de -280 MPa para (-118 MPa) e -458 MPa para (-288 MPa) em 0,09mm, correspondente à máxima profundidade do campo de tensão residual. Isso resultou em 58% de relaxação na superfície e 48% na região próxima a um décimo de milímetro.

FIGURA 4.5 – Perfil de tensões residuais por *shot peening* com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em médio ciclo, direção longitudinal à laminação - (Amostra 1)



FONTE: A autora

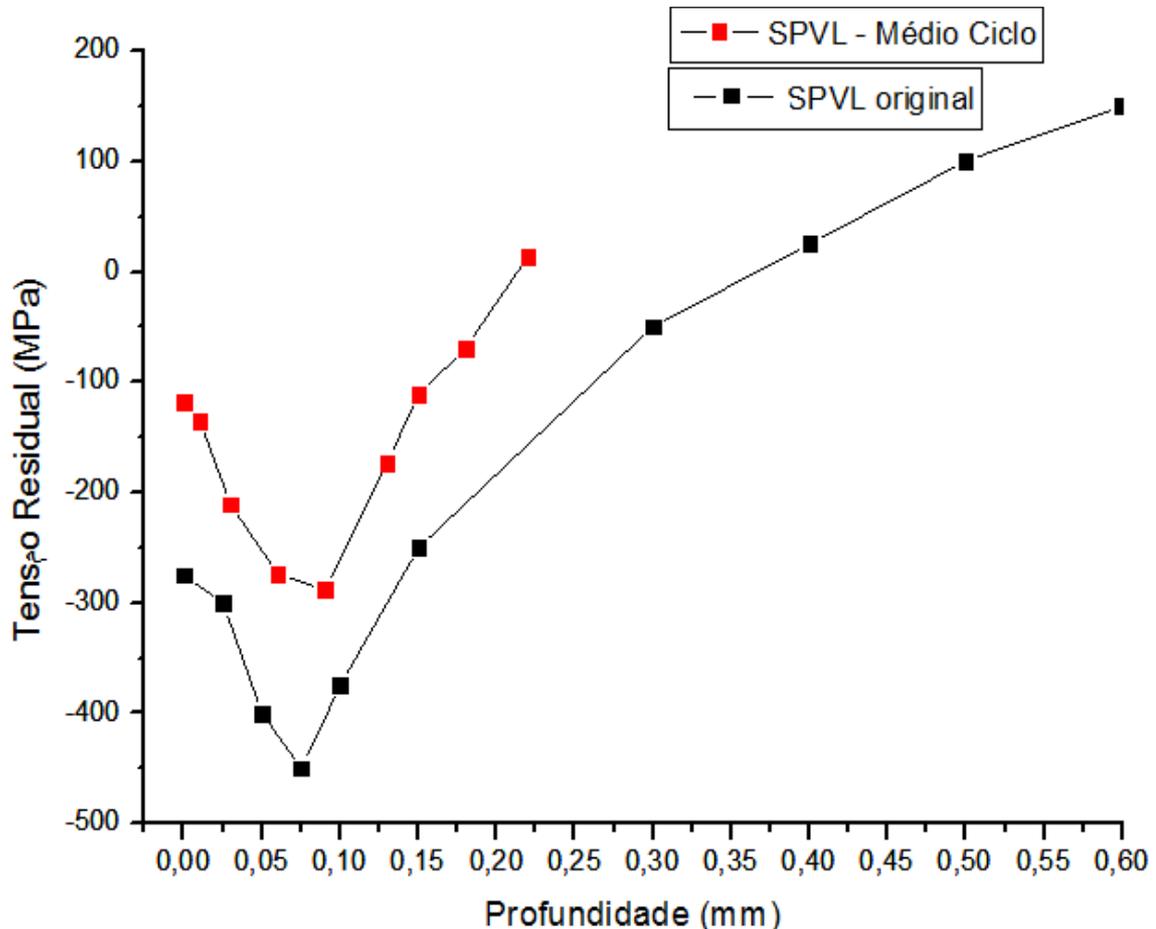
Para a Figura 4.6 que constitui uma amostra com submetida a mesma tensão que a Figura 4.5 (282 MPa), os valores de tensão residual passaram de -280 MPa para (-80 MPa) sem remoção de camadas e (-458 MPa) para (-237 MPa em

0,07mm). A relaxação na superfície chegou a 70% enquanto na profundidade máxima obteve 37% de relaxação.

Neste caso, a largura do campo residual compressivo foi similar para ambas às condições e apresentaram tensão positivas na profundidade de 0,22 mm

. No entanto, para os valores de máxima tensão residual ocorreu diferença, no primeiro caso, a tensão residual relaxou 48% em relação ao campo original, enquanto a segunda foi de 37%. Conseqüentemente, o gradiente de tensões compressivas na superfície e ao longo da profundidade para ambos é bem menor do que o campo original. Os valores de redistribuição de tensão residual na superfície também diferiram (58% e 70%).

FIGURA 4.6: Perfil de tensões residuais por *shot peening* com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em médio ciclo, direção longitudinal à laminação - (Amostra 2).



FONTE: A autora

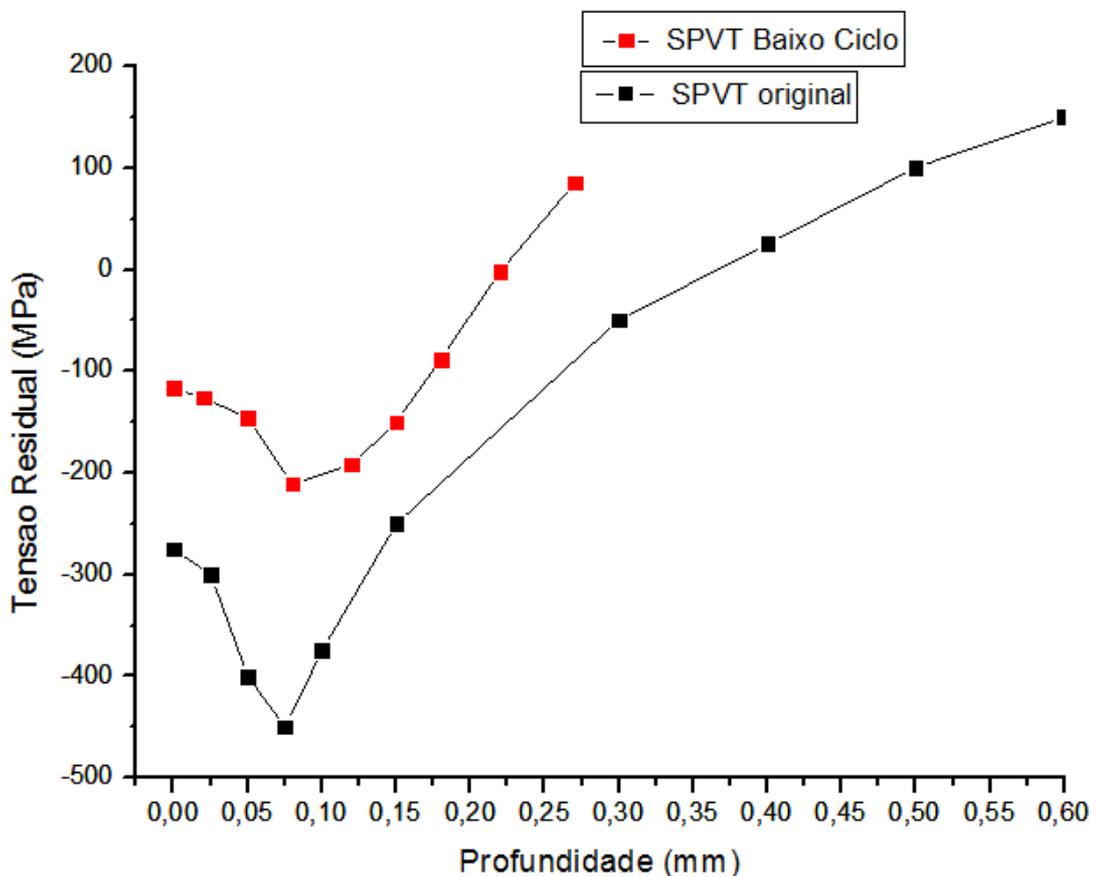
As amostras com *shot peening* de vidro na direção longitudinal à laminação ocorreu uma maior relaxação para os espécimes submetidos a uma quantidade maior de carregamento (Figura 4.3 – 304 MPa), uma menor redistribuição de

tensões para as amostras com maior intensidade de carregamento cíclico (Figura 4.4 – 260 MPa) e relaxação intermediária para as amostras com carregamento em 282 MPa (Figuras 4.5 e 4.6) tanto na superfície como na máxima tensão de profundidade.

Vale ressaltar o comportamento homogêneo das tensões residuais compressivas apresentado após o *shot peening* mesmo havendo redistribuição do campo de tensão residual nas amostras em comparação com o original, não diminuiu o efeito benéfico do *shot peening* na vida em fadiga.⁶⁹

Mattson e Coleman⁷⁰ há muitos anos também observaram que mesmo com um relaxamento parcial da tensão residual de compressão, em amostras com tratamentos superficiais, existe um efeito benéfico sobre vida em fadiga. Eles concluíram que a vida de fadiga ficou abaixo das previsões se o relaxamento de tensões residuais não for levado em consideração.³²

FIGURA 4.7 - Perfil de tensões residuais por *shot peening* com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em baixo ciclo, direção transversal à laminação.



FONTE: A autora

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 mostram o perfil de tensões residual de amostra com *shot peening* de vidro na direção transversal nos regimes de baixo, médio e alto ciclos, respectivamente.

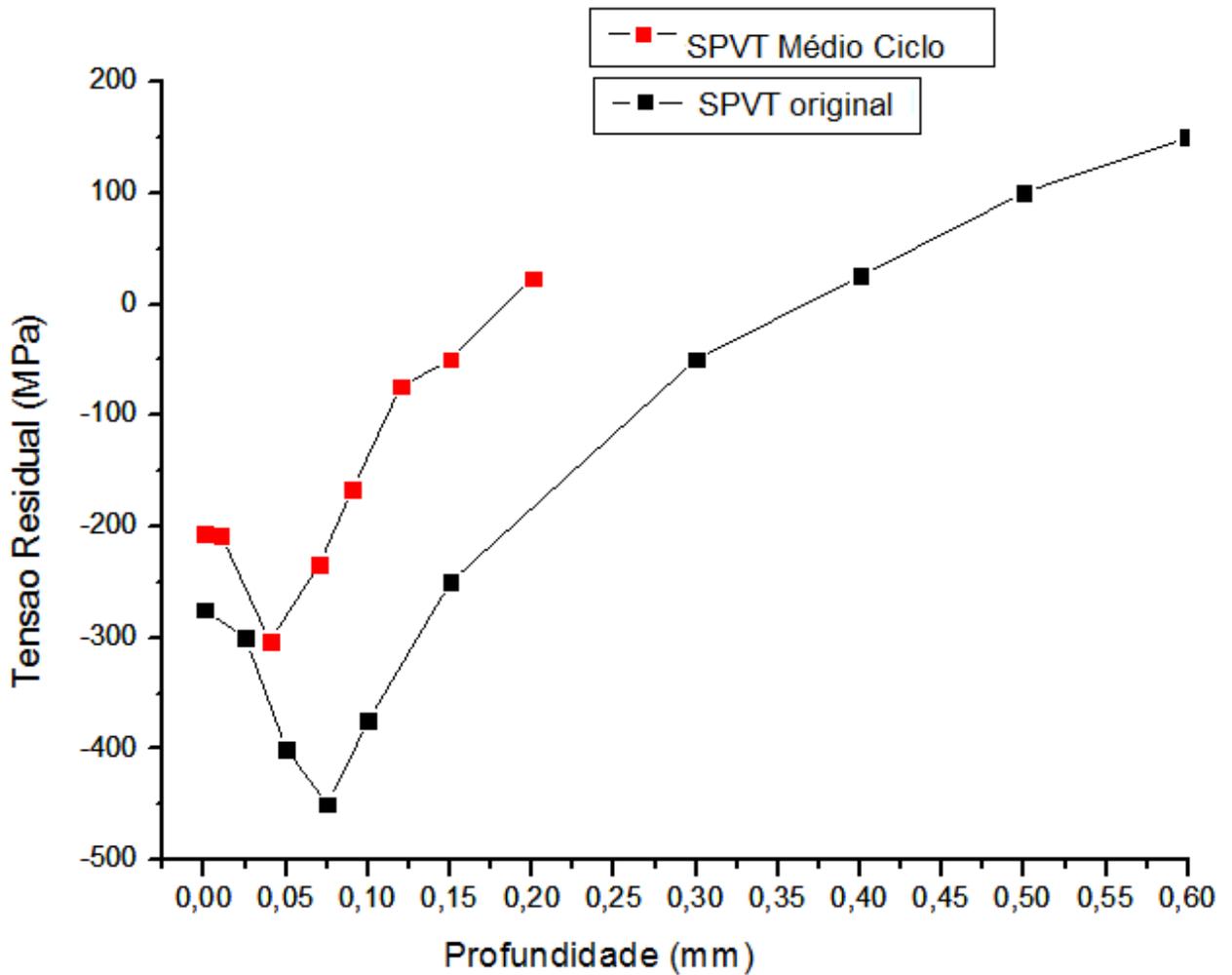
A figura 4.7 mostra a influência do carregamento e da tensão aplicada para a redistribuição do perfil do campo de tensão residual compressivo em amostra com 1×10^4 ciclos aplicados na tensão 304 MPa. A redistribuição das tensões residuais chegou mais da metade comparada com o perfil original da amostra, passando de (-458 MPa) para (-211 MPa) resultando em 54% de relaxação da tensão residual máxima (0,08mm). Importante também salientar que essa relaxação de tensão residual produziu um perfil de tensão menos profundo quando comparada ao perfil original. Para a superfície a redistribuição de tensões residuais compressivas foi de 58%.

Analisando a Figura 4.7 em conjunto com a Figura 4.8 temos as duas amostras que tiveram tensões aplicadas de 304 MPa . A diferença de comportamento de ambas tem como motivo a quantidade de ciclos durante o carregamento. A maior quantidade de ciclos (3×10^5) da Figura 4.8 obteve uma menor redistribuição de tensões residual, ou seja, o perfil do campo de tensão foi mais profundo porém mais estreito quando comparado amostra da Figura 4.7.

Se o resultado da superposição de tensões for suficientemente grande, existe então deformação plástica e conseqüentemente, uma redistribuição das tensões causando o relaxamento do campo de tensão residual compressiva (CTRC) original. Devido ao relaxamento de tensões, a soma algébrica das tensões irá diminuir. Com isso, a partir de determinado momento, espera-se que o nível da superposição de tensões fique abaixo de escoamento cíclico do material e torne o campo de tensão residual compressivo estável.⁷¹

O campo de tensão residual compressiva para a Figura 4.8 na superfície, passou de (-280 MPa) para (-207 MPa) e na máxima profundidade de - 458 MPa para (-303 MPa). A relaxação da tensão residual na máxima profundidade correspondeu a 34% em relação ao perfil do campo original, enquanto na superfície conferiu 26% de relaxação de tensões residuais.

FIGURA 4.8 - Perfil de tensões residuais por *shot peening* com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em médio ciclo, direção transversal à laminação.



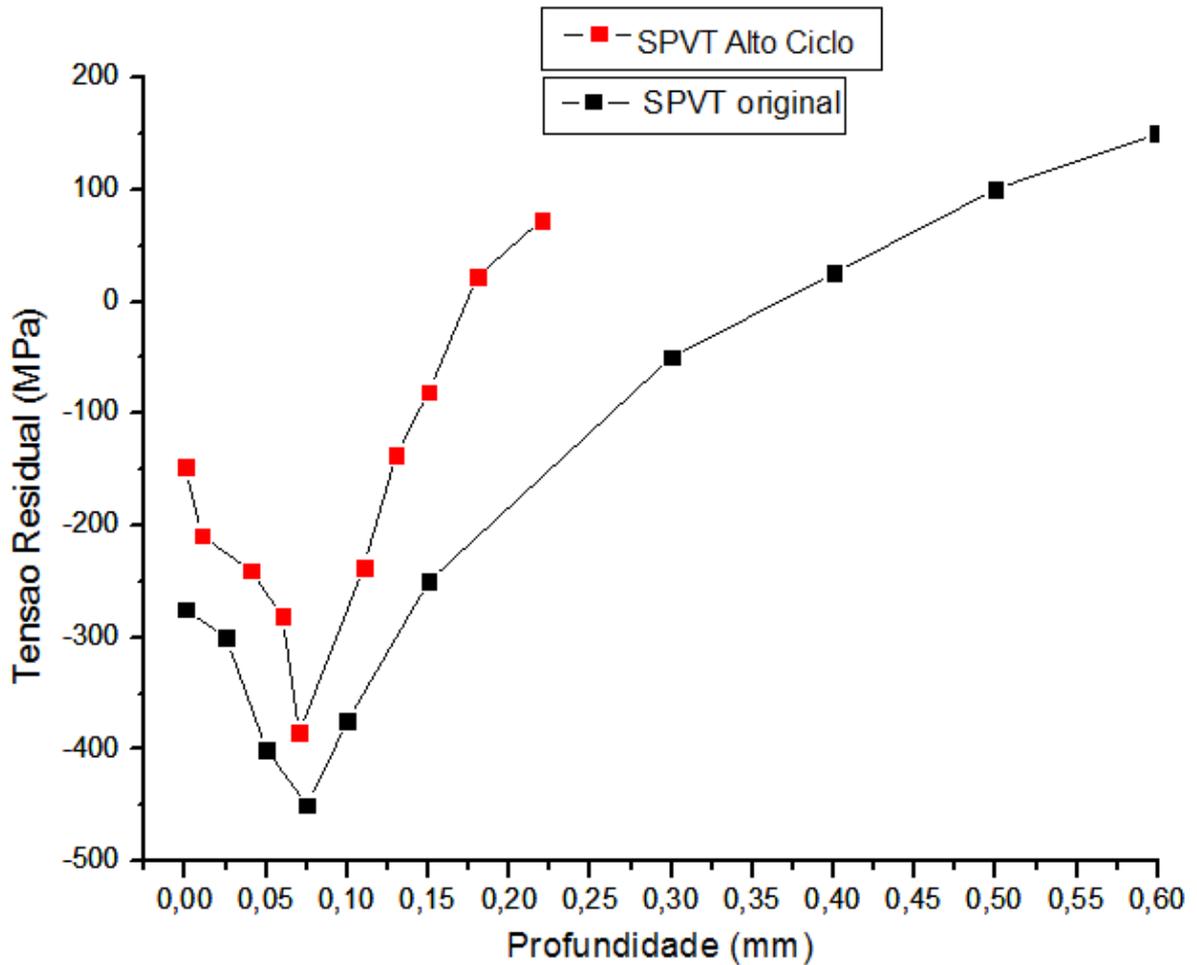
FONTE: A autora

A Figura 4.9 mostra o perfil de tensão residual de amostra com *shot peening* com esfera de vidro na direção transversal no regime de alto na tensão de 260 MPa que fraturou com 5×10^6 ciclos.

É possível notar na Figura 4.9 que a redistribuição de tensões para esta amostra (alto ciclo) aconteceu passando de um valor de -280 MPa para (-148 MPa) na superfície, de (-458 MPa) para (-385 MPa) na máxima profundidade e (-225MPa) para 22 MPa em 0,18 mm quando a tensão se torna positiva.

Em relação ao campo original, a relaxação na superfície foi de 46%, no entanto, a tensão residual máxima na profundidade de 0,08 mm sofreu somente 16% quando comparado ao campo original.

FIGURA 4.9 – Perfil de tensões residuais por *shot peening* com esfera de vidro sobre o processo de fadiga em alto ciclo, direção transversal à laminação.



FONTE: A autora

Ao confrontar as análises de relaxação das tensões residuais ocorridas entre as amostras *shot peening* com esfera de vidro no sentido longitudinal (Figuras 4.3 – 4.6) com os espécimes no sentido transversal (Figuras 4.7 - 4.9) é possível observar que a condição de *shot peening* com esfera de vidro longitudinal obteve maior relaxação em todos os ciclos de carregamento estudados (baixo, médio e alto ciclo).

Segundo Zhuang⁷², dependendo do nível de sobreposição, as tensões residuais na superfície sofrerão vários graus de redistribuição de tensões, ou seja, ocorrerá uma relaxação nas tensões residuais compressivas.

4.2.2 Estudo do campo de tensão residual das amostras com *shot peening* com esfera de cerâmica

A relaxação sob regime cíclico é afetado principalmente pela magnitude inicial e gradiente do campo de tensão residual, trabalho a frio, amplitude da tensão de fadiga, que significa relação entre tensão, número de ciclos, resposta do material à carga cíclica e do grau de encruamento cíclico ou amolecimento.⁶⁷

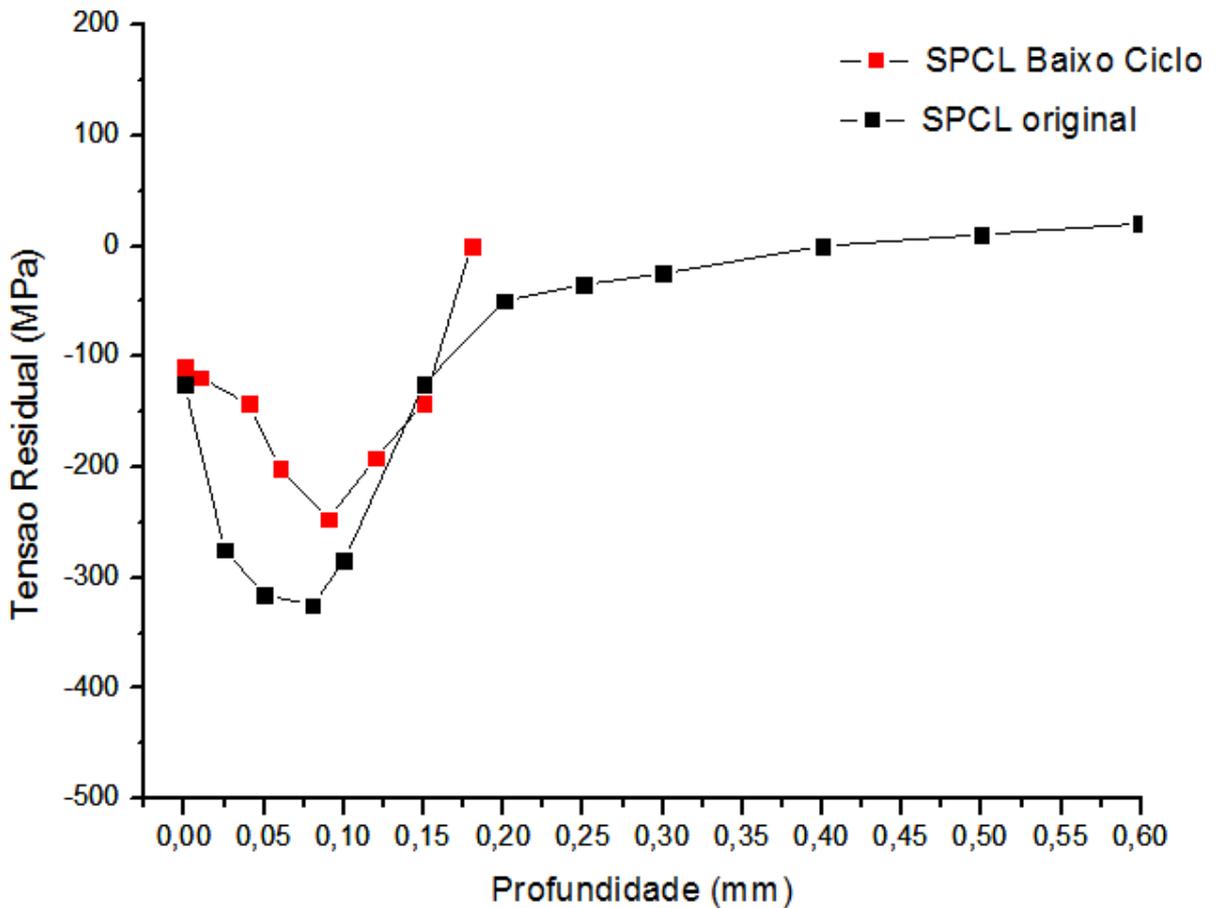
A tabela 4.2 mostra os valores de tensões residuais obtidos com a remoção de cada camada ao longo da espessura do corpo de prova, a tensão máxima aplicada no teste de fadiga nos regimes de baixo, médio e alto ciclo, para as amostras de *shot peening* com esfera de cerâmica.

TABELA 4.2 – Resultados dos valores de tensão residual ao longo da profundidade para material base com esfera de *shot peening* de cerâmica nas direções L e T à laminação

<i>Shot peening</i> com esfera de cerâmica longitudinal (SPCL)				<i>Shot peening</i> com esfera de cerâmica transversal (SPCT)			
Ciclos	Tensão (MPa)	Profundidade Camada (mm)	Tensão Residual (MPa)	Ciclos	Tensão (MPa)	Profundidade Camada (mm)	Tensão Residual (MPa)
Baixo 8×10^4 Ciclos	304	0	-110	Baixo 2×10^4 ciclos	260	0	-118
		0,01	-119			0,03	-185
		0,04	-143			0,07	-232
		0,06	-201			0,09	-256
		0,09	-247			0,13	-194
		0,12	-192			0,15	-137
		0,15	-142			0,19	-63
		0,18	-77			0,22	13
		0,21	24				
Médio 1×10^5 Ciclos	260	0	-160	Médio 4×10^5 ciclos	239	0	-173
		0,01	-170			0,01	-187
		0,04	-187			0,04	-200
		0,07	-265			0,07	-214
		0,09	-269			0,11	-294
		0,12	-199			0,14	-233
		0,15	-171			0,17	-186
		0,18	-83			0,2	-97
		0,22	-2			0,24	38
0,26	30						
Alto 8×10^6 Ciclos	239	0	-45	Alto 2×10^6 ciclos	217	0	-121
		0,01	-87			0,01	-137
		0,04	-121			0,04	-212
		0,07	-205			0,07	-241
		0,11	-243			0,1	-303
		0,13	-286			0,13	-254
		0,16	-163			0,16	-172
		0,19	-91			0,2	-85
		0,23	5			0,22	27
0,28	23	0,3	93				

FONTE: A autora

FIGURA 4.10 - Perfil de tensões residuais por *shot peening* com esfera de cerâmica sobre o processo de fadiga em baixo ciclo, direção longitudinal à laminação.



FONTE: A autora

A Figura 4.10 ilustra o perfil de tensão residual de relaxação de uma amostra com *shot peening* com esfera de cerâmica em regime de baixo ciclo (8×10^4 ciclos) correspondente ao nível de tensão aplicada de 304 MPa. Observe que na figura a tensão de compressão máxima da amostra evidentemente menor que a original, demonstrando 26% de relaxamento do campo de tensão residual compressivo, passando de (-325 MPa) do campo original para (-247 MPa) na máxima profundidade. Para a superfície a redistribuições de tensões residuais foi de 12%.

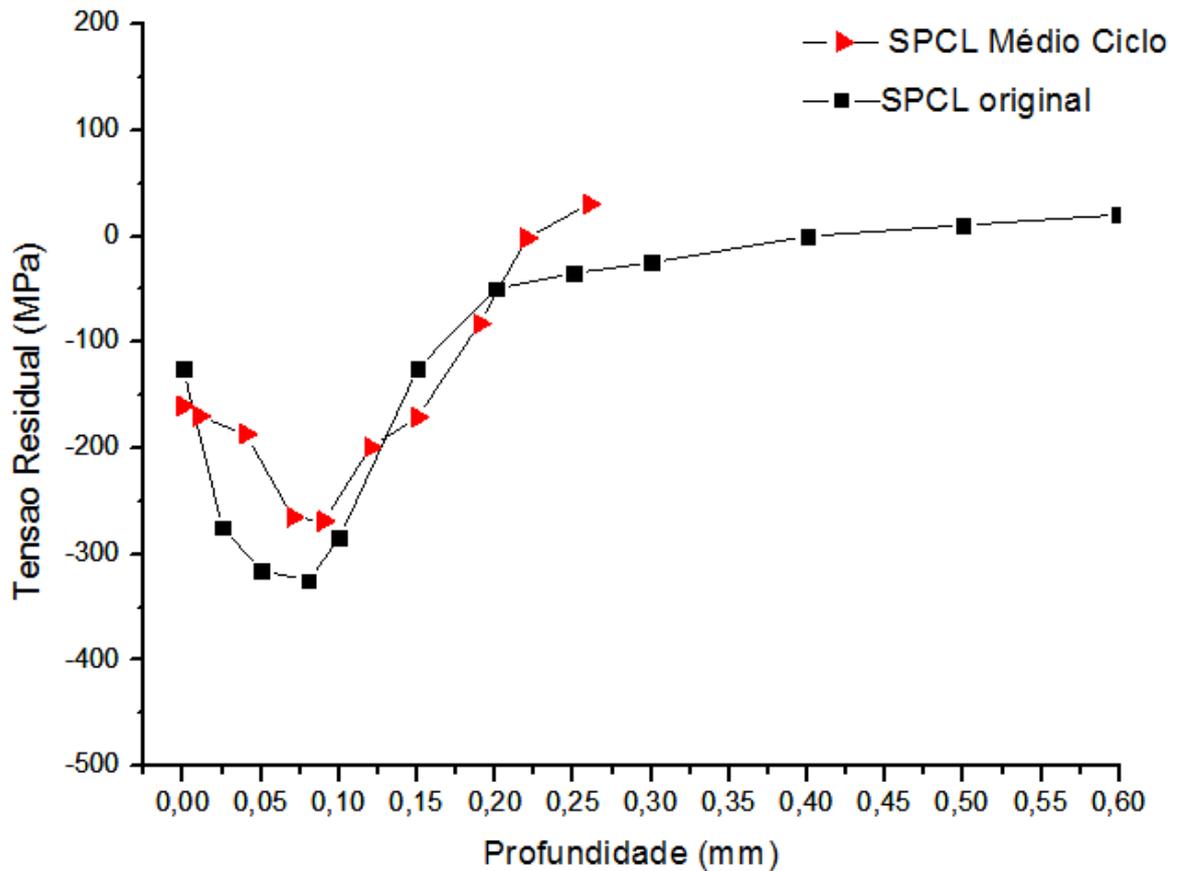
Já a Figura 4.11 se caracteriza por uma tensão de 260 MPa no regime de médio ciclos (10^5 ciclos). A redistribuição de tensões residuais do campo compressivo na máxima profundidade equivalente a 0,09mm se altera de (-325 MPa) para (-269 MPa), conferindo a mesma apenas 17% de alívio de tensões residuais.

Comparando a tensão de compressão máxima de ambas, é possível perceber que para a amostra de fadiga de baixo ciclo, a tensão de compressão máxima é menor comparada a uma amostra com maior quantidade de ciclos. De acordo com Torres que mostrou que a redistribuição das tensões recebe influência direta do carregamento cíclico e do nível de tensão aplicado.

É interessante observar que a relaxação das tensões residual se concentra somente abaixo da superfície.

Como o melhor desempenho da vida em fadiga é uma consequência do perfil do campo de tensões residuais compressivas induzidas por *shot peening*, era esperado encontrar um aumento na vida em fadiga axial a condição com maior campo de tensão residual compressivo ⁷³ e, isso ocorreu para a condição com esfera de vidro em relação à esfera de cerâmica.

FIGURA 4.11: Perfil de tensões residuais por *shot peening* com esfera de cerâmica sobre o processo de fadiga em médio ciclo, direção longitudinal à laminação.



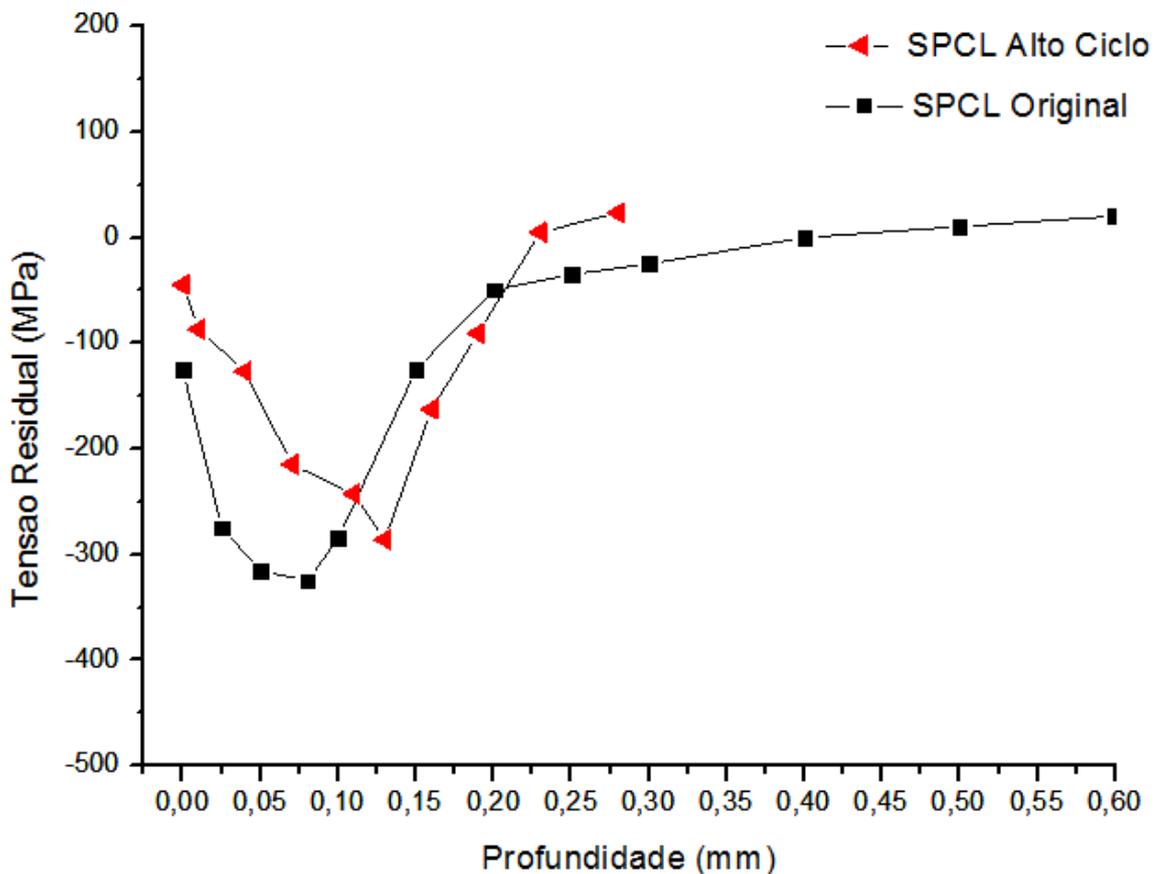
FONTE: A autora.

O espécime com *shot peening* com esfera de cerâmica na direção longitudinal no regime de alto ciclo (8×10^6 ciclos) sob tensão de 239 MPa, é mostrado na figura 4.12. Com uma tensão menor que as amostras com as mesmas condições de *peening* anteriores (304MPa e 260 MPa, respectivamente), e uma quantidade de ciclos maior, a redistribuição de tensões do campo de tensão residual compressiva foi menor, inferior a 15% quando comparado ao campo original.

O campo de tensão residual compressivo induzido pelo *shot peening* de cerâmica modificou o perfil original na superfície passando de (-125 MPa) para (-45 MPa), na máxima profundidade alterou de (-325 MPa) para (-286 MPa), transformando-se em tensão trativa em 0,23mm (passando de -50 MPa para 5 MPa).

A relaxação da amostra SPCL em profundidade foi de 12%, enquanto na superfície o valor de redistribuição de tensões foi 64%. Já para o ponto onde a tensão se torna positiva, a redistribuição de tensões chegou a 10 %.

FIGURA 4.12: Perfil de tensões residuais por *shot peening* com esfera de cerâmica sobre o processo de fadiga em alto ciclo, direção longitudinal à laminação .



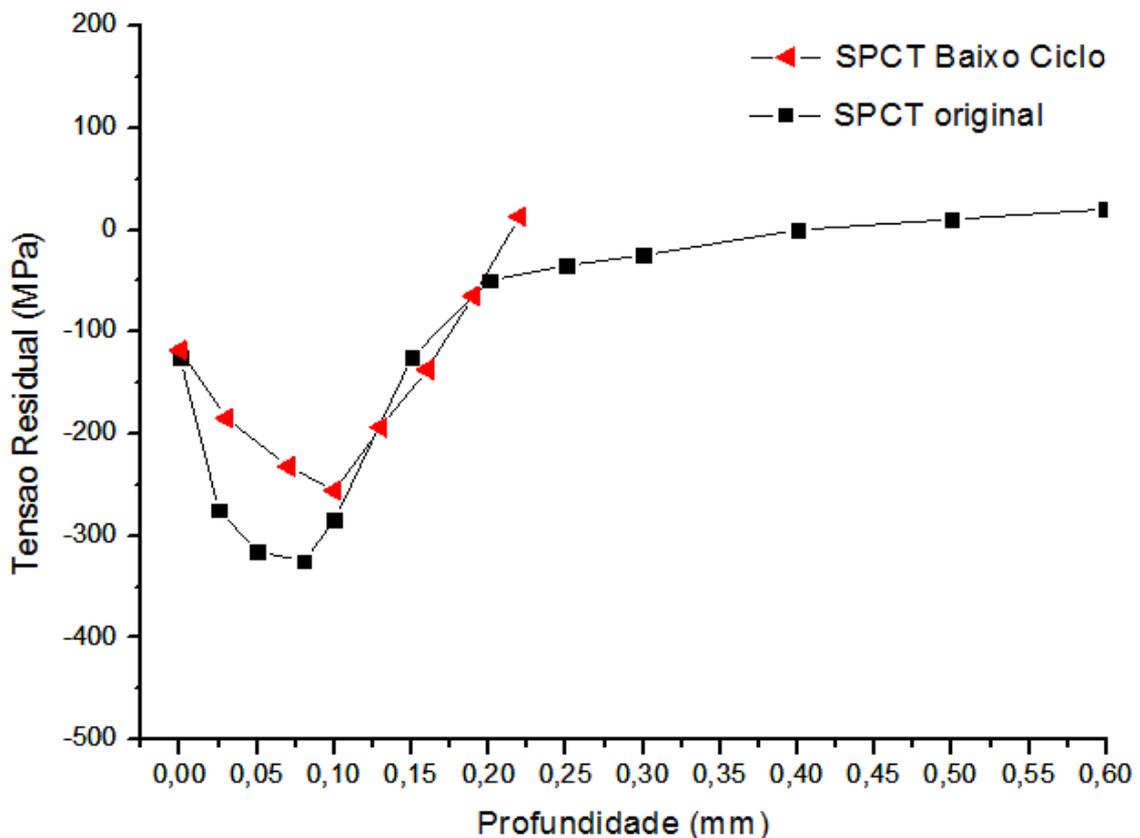
FONTE: A autora

A Figura 4.13 mostra o perfil de relaxação do campo de tensão residual de compressão de um corpo de prova em regime de baixo ciclo (2×10^4 ciclos) com tensão de carregamento aplicada de 260 MPa.

Analisando a Figura 4.13 se constata a redistribuição de tensões residuais do campo compressivo comparado ao original quando a tensão varia de (-325 MPa) para (-256 MPa) na máxima profundidade. O corpo de prova SPCT da Figura 4.13 apresentou relaxação de 21%, quando comparado ao campo original. Entretanto, quando se compara com a amostra de *shot peening* de cerâmica longitudinal (SPCL), Figura 4.10, a mesma obteve uma relaxação inferior; visto que no sentido longitudinal a relaxação foi de 22%.

No que tange a tensão residual da superfície, o campo compressivo se alterou de forma mínima. A tensão compressiva passou de (-125 MPa) para (- 118 MPa) resultando em uma relaxação de 5 %.

FIGURA 4.13: Perfil de tensões residuais por *shot peening* com esfera de cerâmica sobre o processo de fadiga em baixo ciclo, direção transversal à laminação.



Observa-se para as amostras de *shot peening* de cerâmica transversal para todos os níveis de carregamento (baixo, médio e alto ciclo) as tensões residuais se tornam positivas a partir de 0,22mm de profundidade.

Como as tensões residuais induzidas pelo *shot peening* são tensões do tipo 1 (macroscópica), elas estão balanceadas ao longo de todo o corpo. Considerando que a profundidade da camada afetada compressivamente pelo *shot peening* é muito pequena em comparação com a espessura do corpo de prova utilizado, é de se esperar que as tensões trativas permaneçam aproximadamente constantes e em um valor bastante pequeno ao longo da espessura do corpo de prova.⁷⁴

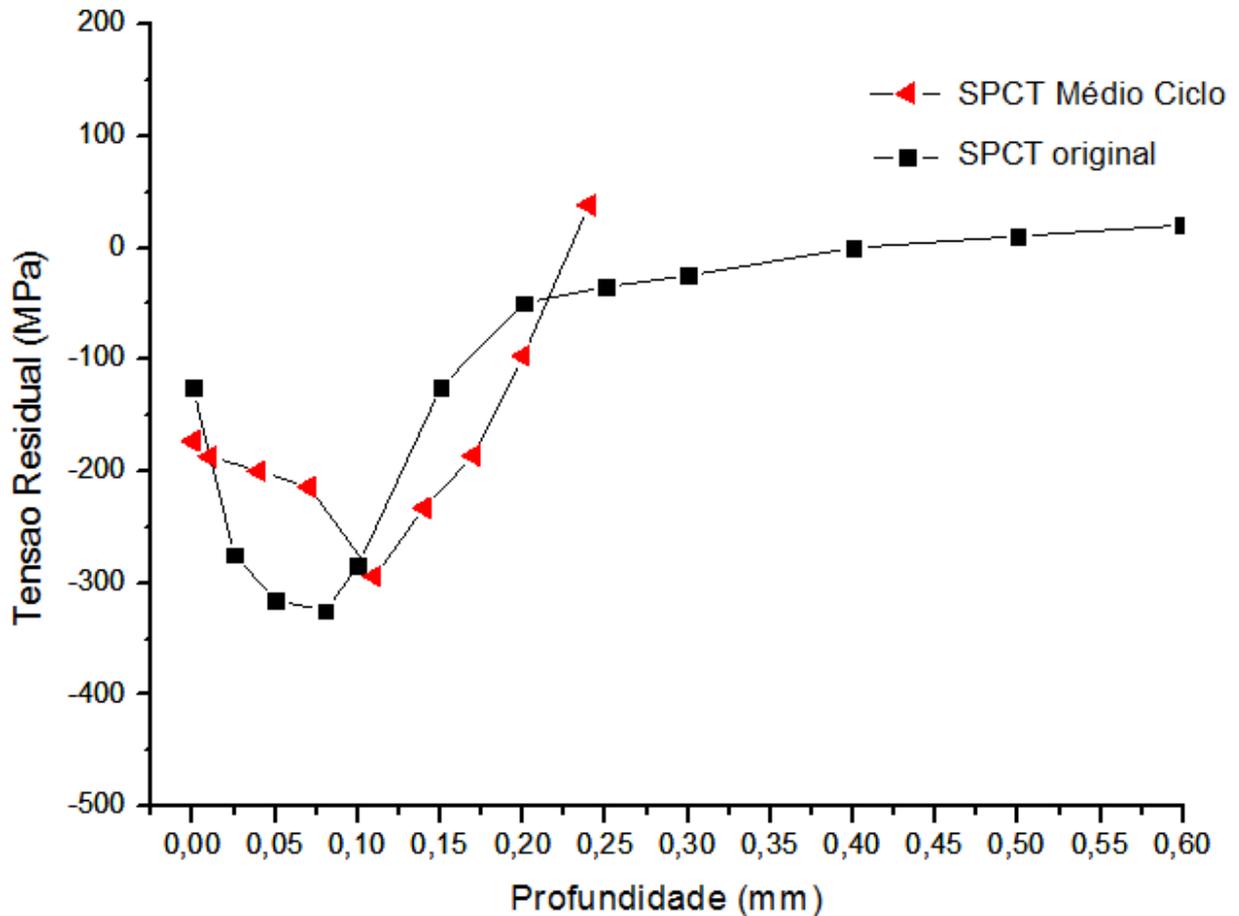
É interessante notar as Figuras 4.14 e 4.15 das amostras de *shot peening* de cerâmica transversal no regime de médio e alto ciclo na tensão de 239 MPa e 217 MPa, respectivamente, que o perfil de tensão residual na superfície não ocorreu redistribuição de tensão, situação análoga ao espécime de *shot peening* de cerâmica transversal longitudinal em médio ciclo (Figura 4.11).

Hammond e Potter^{75, 76} em suas pesquisas, não observaram nenhum comportamento de relaxamento de tensões residuais em amostras de alumínio 7075-T6 com *shot peening* durante flexão rotativa ensaios de fadiga.

A redistribuição de tensão residual ocorreu apenas ao longo da profundidade para a Figura 4.14, com *shot peening* de cerâmica transversal em regime de médio ciclo, passando de (-325 MPa) para (-294 MPa) na máxima profundidade do campo residual e de (-50 MPa) para (38 MPa) na profundidade em que a tensão se torna positiva, alcançando 9% no primeiro caso, e 23% para o segundo.

A Figura 4.15 ilustra a redistribuição de tensões residuais para o espécime SPCL submetido a uma maior quantidade de ciclos (2×10^6 ciclos) e tensão inferior (217 MPa) comparado com as amostras com *shot peening* de cerâmica longitudinal. A relaxação envolvendo essa amostra é de 7% ao longo da profundidade, valor inferior a relaxação das Figuras 4.13 e 4.14, reiterando a relação entre intensidade de tensão e quantidade de ciclos para a relaxação do campo de tensão residual compressivo pós fadiga axial.

FIGURA 4.14: Perfil de tensões residuais por *shot peening* com esfera de cerâmica sobre o processo de fadiga em médio ciclo, direção transversal à laminação.



FONTE: A autora

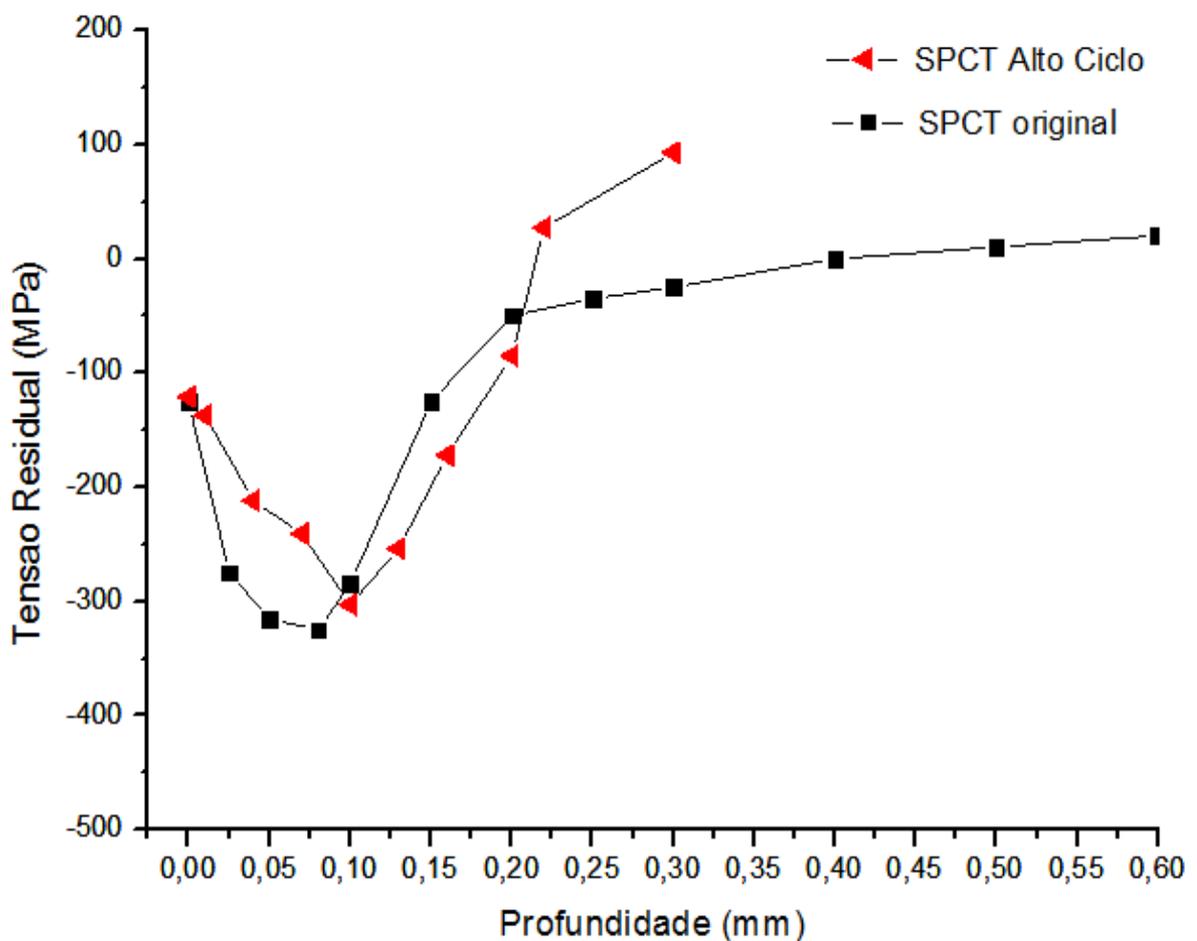
As amostras de *shot peening* de cerâmica sofreram relaxação em locais mais afastados da superfície ao longo da profundidade em comparação com as amostras com *shot peening* com esfera de vidro, como por exemplo nas Figuras 4.12 e 4.14, que pode ser explicado pela maior rugosidade das amostras com *shot peening* com esfera de cerâmica.

As modificações produzidas na superfície pelo tratamento de *shot peening* são: (a) rugosidade na superfície; (b) um aumento, próximo à superfície, da densidade das discordâncias (encruamento); e (c) o desenvolvimento de um perfil característico de tensão residual. Curtis-De los Rios⁷⁷ analisou que a rugosidade na superfície acelera a nucleação e antecipa a propagação das trincas, mas o encruamento retarda a propagação da mesma, devido o aumento da resistência à deformação plástica, e o perfil de tensão residual proporciona uma correspondente tensão de fechamento da trinca que reduzirá a força motriz de propagação.

Sendo assim, o menor gradiente de tensões residuais para a esfera de cerâmica que sofrem o efeito da relaxação ocorre em regiões mais afastadas da superfície, de modo a minimizar o efeito de maior rugosidade.

Como Carvalho ³¹ constatou em seu trabalho, mostrando que a condição de *shot peening* com esfera de cerâmica obteve um maior dano na superfície e um menor perfil de campo de tensão residual compressivo quando comparado à esfera de vidro, relacionado ao fato da intensidade de *peening* da cerâmica ser sido superior ao do vidro (Tabela 3.1).

FIGURA 4.15: Perfil de tensões residuais por *shot peening* com esfera de cerâmica sobre o processo de fadiga em alto ciclo, direção transversal à laminação.



FONTE: A autora

Ao confrontar os percentuais de redistribuição de tensões residuais compressivas para ambos os casos, *shot peening* com esfera de cerâmica nos sentidos longitudinal e transversal à laminação pode-se perceber que: as amostras deformadas com esferas de cerâmica no sentido longitudinal à laminação tiveram

um relaxamento superior às amostras no sentido transversal em todos os níveis de carregamento cíclico.

Para condições de carregamentos considerados de baixo ciclo, enquanto a amostra SPCL relaxou 26%, a amostra no sentido transversal sofreu relaxamento de 22%.

Para condições de médio e alto ciclo, os corpos de prova SPCL relaxaram, 17% e 12% respectivamente, ao passo que a condição *shot peening* com esfera de cerâmica transversal tiveram 9% (regime de médio ciclo) e 7% (baixo ciclo).

Por outro lado, as amostras com tratamento superficial de *shot peening* com esfera de vidro, nos três regimes de carregamentos cíclicos, a condição de *shot peening* de vidro longitudinal apresentou uma redistribuição de tensões residuais superior ao sentido transversal. Ou seja, as amostras de *shot peening* com esfera de vidro no sentido longitudinal obteve 57% redistribuição de tensão, enquanto na transversal foi 53% redistribuição de tensão; sob o regime de baixo ciclo. A redistribuição de tensões residuais compressivas na profundidade máxima no espécime de *shot peening* com esfera de vidro transversal foi menor.

Assim, comparando as amostras no sentido da laminação, entre as condições de *shot peening* de vidro longitudinal com as amostras de cerâmica longitudinal, os corpos de prova com *shot peening* de vidro tiveram um relaxamento maior em relação com as amostras com *shot peening* com esfera de cerâmica. O mesmo aconteceu quando a análise envolveu corpos de prova com *shot peening* com esfera de vidro e cerâmica no sentido transversal.

Sob o regime de baixo ciclo, as amostras SPVL obtiveram uma redistribuição de tensões residual 57%, enquanto as amostras SPCL tiveram 26%. No regime de médio ciclo, amostras deformadas com esfera de vidro relaxaram entre 35-50%, contra 9% das amostras com esfera de cerâmica. No regime de alto a (10^6 ciclos) os espécimes de *shot peening* com esfera de cerâmica longitudinal relaxaram 7% enquanto os *shot peening* com esfera de vidro na mesma direção tiveram relaxamento de 31%,

Estabelecendo relações entre os espécimes analisados na direção transversal, as amostras com *shot peening* com esfera de vidro apresentaram um campo de tensão residual compressivo mais relaxado comparado com as amostras deformadas pela cerâmica em todos os regimes cíclicos. Was e colaboradores ⁷⁸, em suas pesquisas, mostraram que uma melhor vida em fadiga é conseguida com

uma menor intensidade Almen no *shot peening*. Isso pode ser comprovado quando são estabelecidas relações entre o *shot peening* de vidro e cerâmica para este trabalho, já que para o vidro a intensidade Almen foi menor que para a cerâmica (0,011N para vidro e 0,022N para a cerâmica).

Isto indica que o valor de intensidade aplicado com esfera de cerâmica (praticamente o dobro), não representa a melhor condição de intensidade, de modo a produzir um aumento do campo de tensão residual compressivo e, conseqüentemente, uma maior vida em fadiga axial para material base com processo de *shot peening* com esfera de cerâmica. Esta observação indica também, que pode ter ocorrido um excesso de intensidade (*overpeening*) na qual produziu dano (crateras e dobras) na superfície do material base diminuindo a resistência à fadiga para a condição com esfera de cerâmica.^{79, 80}

No regime de baixo ciclo o campo de tensão residual máxima compressiva das amostras SPVT diminuiu em 54%, enquanto para a cerâmica (SPCT), a relaxação chegou apenas a 22%. Em médio e baixo ciclo, os espécimes com *shot peening* de vidro relaxaram 34 e 16%, respectivamente. Para as mesmas condições envolvendo corpos de prova com *shot peening* com esfera de cerâmica, a redistribuição do campo de tensão residual compressivo não ultrapassou a décima parte do perfil original, 9 % em médio ciclo e 7% para amostras com *shot peening* com esferas de cerâmica em baixo ciclo.

Além disso, afirmaram também que as tensões residuais na superfície foram maiores para as menores intensidades de *peening*. Com isso, para os valores envolvendo a relaxação das tensões residuais compressivas na superfície das amostras, foi possível estabelecer que todas as amostras estudadas (com *shot peening* de vidro ou cerâmica, nos sentidos de laminação longitudinal e transversal) em regime de baixo ciclo, ou seja, submetidos a tensões mais elevadas, obtiveram uma redistribuição de tensões residuais mais acentuadas comparados aos carregamentos médios e altos.

Do total de amostras analisadas da liga de alumínio T7451 que sofreram fadiga axial a condição de *shot peening* com esfera de vidro na direção longitudinal foi a que obteve maior redistribuição do campo de tensões residual sob as intensidades de carregamento estudadas.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizada a análise da relaxação de tensões residuais em amostras de liga de alumínio T7451 sob fadiga axial em regime de baixo, médio e alto ciclo.

As amostras diferiam umas das outras além da quantidade de ciclos de fadiga, pelo tratamento superficial de *shot peening* (cerâmica ou vidro) e sentido de laminação (longitudinal e transversal).

As amostras SPVL em fadiga de baixo ciclo sofreu um relaxamento de 57%, enquanto a amostra SPVL (alto ciclo) apresentou 31% de relaxação. Com relação aos dois espécimes do regime de médio ciclo nessas mesmas condições, a relaxação foi de 37% e 45% respectivamente.

Para os corpos de prova com *shot peening* com esfera de vidro transversal (SPVT), como o esperado o comportamento de relaxação em relação à quantidade de ciclos foi inversamente proporcional, assim como nas amostras SPVL. Para fadiga em regime de alto ciclo relaxação de 16%, em médio ciclo 34% e para amostras que foram submetidas a menor quantidade de ciclos 53% de relaxação.

Na condição com sentido de laminação transversal, a amostra de SPCL em alto ciclo teve seu campo de tensão residual compressiva diminuída 12%, para regime de médio ciclo esse valor passou para 17% e em alto ciclo subiu para 26%.

Corpos de prova com *shot peening* com esfera cerâmica longitudinal para regime de baixo ciclo relaxou 22%, enquanto para médio e alto ciclo a relaxação do campo de tensão residual compressiva correspondeu a 9% e 7%, respectivamente.

Os espécimes de *shot peening* com esfera de cerâmica não apresentaram redistribuição de tensões residuais na superfície nos regimes cíclicos em ambas as direções de laminação estudadas; com exceção apenas para a amostra de SPCL com maior quantidade de ciclos.

Para as amostras com *shot peening* com esfera de cerâmica, a relaxação ocorreu em regiões mais afastadas da superfície se comparado com os espécimes de *shot peening* com esfera de vidro. A maior intensidade de *peening* (jateamento) das esferas de cerâmica provocou um aumento na rugosidade das amostras, que pode ter influenciado diretamente no perfil de redistribuição das tensões residuais no material.

A relaxação de tensões residuais da liga de alumínio 7050 na condição T7451 demonstrou a importância de se levar em conta, não só os parâmetros do processo do *shot peening*, mas possíveis redistribuições do campo de tensões residuais compressivas durante a deformação plástica e o tipo de carregamento a que o material foi submetido durante sua vida em fadiga.

REFERÊNCIAS

- 1 YUNG, D. **Métodos, mecanismos e modelos de relaxação de tensões residuais em materiais metálicos.** 2008, 78 f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Aeronáutica) – Instituto Tecnológico Aeronáutico, São José dos Campos, 2008.
- 2 CARNEIRO, M. A. **Influência da Fração de Martensita Revenida a Vida em Fadiga de um Aço Estrutural com Aplicações em Sistemas de Ancoragem.** 2002,95 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2002.
- 3 DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy.** 2. ed. London: SI Metric, 1988. 751 p.
- 4 MANSUR, T.R. et. al. Estudo das tensões residuais em juntas soldadas de materiais dissimilares e determinação dos limites de resistência à fadiga dos metais de base. **Soldag. Insp.**, São Paulo, v.16, n.3, p. 274-284, Julho/Set 2011.
- 5 KANDIL F. A. et.al. **A Review of Residual Stress Measurement Methods: A Guide to Technique Selection.** Reino Unido: National Physical Laboratory, 2001.42p.
- 6 RIBEIRO, J.; VAZ, M.; PILOTO, P. Medição de campos de tensões residuais – Estudo preliminar. In: XII CONGRESSO DE MECÂNICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 12., 2003, Évora. **Anais...** Évora: 2003.
- 7 SOUSA, D.; NEVES, T.; TAYER, S. Estudo do efeito dos parâmetros do processo nas tensões residuais através da simulação da extrusão a frio. In: NONO SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 9., 2010., São João Del Rey. **Anais...** São João Del Rey: 2010.
- 8 TORRES, M.A.S. et.al. Considerações sobre a relaxação das tensões residuais induzidas por *shot peening* durante o processo de fadiga do aço AISI 4340. In: Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. 8,2007, Cusco. **Anais...** Cusco,08,2007.
- 9 TORRES, M. A. S. **Uma avaliação do efeito de shot peening na fida em fadiga do aço ABNT 4340 com e sem revestimento de cromo duro.** 2002. 223 f.Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2002.
- 10 OLIVEIRA, R.R. **Avaliação da tensão residual em alumínio 7050 conformadas pelo processo *peen forming*.** 2011, 128 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de tecnologia nuclear) – IPEN, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

11 CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 5ªed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002. 408 p.

12 TOTTEN, G.; MACKENZIE, S. **Handbook of Aluminum**, v. 1, USA: CRC Press, 2003.p. 81-82.

13 ASTM. **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture testing**. E 823-96, 2000.

14 MANDAI, J.T. **Determinação dos parâmetros para crescimento de trincas em ligas metálicas: modelagem e experimentação**. 2010. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010

15 COLOSIO, M. A. **Uma abordagem da vida em fadiga em barra estabilizadora automotiva considerando defeito superficial fisicamente pequeno**. 2003. 224 f. Tese (Doutorado em Ciências na área de tecnologia nuclear) – IPEN, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

16 FONTES, F. A., **Previsão do Desempenho de Componentes para Sistemas de Ancoragem Sob Carregamentos Monotônicos e Cíclicos**. 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2008.

17 VALE, R. A. **Efeito da Carga de Prova na Curva de Fadiga do Gancho de Ancoragem para Conexão Remota em Amarras de Fundo**. 2011. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

18 SHAMES, I. H. **Introdução a mecânica dos sólidos**. Editora Prentice Hall do Brasil, 1983. 558p.

19 SIQUEIRA, C. P. **Influência da Nitretação na Resistência à Fadiga do Aço ABNT 4340**. 2002. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2002.

20 SALERNO, G. **Influência da deformação média na previsão de vida em fadiga de baixo ciclo da liga AA7175-T1**. 2005. 224 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

21 MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical Behaviour of Materials**. 2ª ed. New York: Cambridge University Press, 2009. 882p.

- 22 WEBSTER, G.A.; EZEILO, A. N. Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes. **International Journal of Fatigue**. v.23, p.375–383. 2001.
- 23 SHEN, S.; ATLURI, S.N. An Analytical Model for Shot-Peening Induced Residual Stresses. **CMC**, v. 4, n..2, p.75-85, 2006.
- 24 CAMARGO, J. A. M. **A Influência do shot peening e das anodizações crômica, sulfúrica e dura sobre a resistência à fadiga da liga Al 7050 – T 7451 de uso aeronáutico.**). 2007. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2007.
- 25 U, W.; WANG, C. H.; BARTER,S. **Analysis of cyclic mean stress relaxation and strain ratchetting behaviour of aluminium 7050.** Australia: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory,1999.
- 26 LU, J. **Handbook on Measurement of Residual Stresses** 1^aed. Society for Experimental Mechanics, The Fairmont Press, 1996. 238 p.
- 27 CAMPOS, M. F.; MACHADO, R.; HIRSCH, T. **Tensões residuais em aços avaliados por difração de raio X: diferença entre macro e micro tensões residuais.** In: WORKSHOP SOBRE TEXTURA, 3.,2006, São Paulo. **Resumos...** São Paulo: USP. p. 115-131.
- 28 DAMASCENO, D. **Análise das tensões residuais após torneamento e retificação do aço ABNT 52100 endurecido.** 1993. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.
- 29 OGATA, H. T. S. **Determinação da influência das tensões residuais nas propriedades de fadiga em aço SAE 6820 processado com diferentes profundidades de camada de cementação.** 2004. 143 f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual do Paraná, Curitiba, 2004.
- 30 SOARES, M. C. B. V. **Influência das tensões residuais no comportamento em fadiga e fratura de ligas metálicas.** 1998, 126 f. Tese (Doutorado em Ciências na área de reatores nucleares de potência e tecnologia do combustível nuclear) – IPEN, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- 31 CARVALHO, A. L. M. **Efeito das tensões residuais na fratura e resistência à fadiga da liga de alumínio 7050- T7451.** 2004, 213 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, Campus II, Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Guaratinguetá, 2004
- 32 LAAMOURE, A.; SIDHOM, H.; BRAHAM, C. Evaluation of residual stress relaxation and its effect on fatigue strength of AISI 316L stainless steel ground

surfaces: Experimental and numerical approaches. **International Journal of Fatigue**. v.48. p. 109-121. 2013.

33 NOBRE, J. P. et. al. Use of the Hole-drilling Method for Measuring Residual Stresses in Highly Stressed Shot-peened Surfaces. **Experimental Mechanics**. v. 40, n.3, p. 289-297, 2000.

34 RIBEIRO, J. E.. **Caracterização Experimental e Numérica de Campos de Tensões Residuais Provocadas por Processos de Fabrico**. 2006. 278 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, 2006.

35 MARTINS, C.O.D. et al. Comparação entre técnicas de análise de tensões residuais em anéis de rolamento do aço ABNT 52100. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 23-31, 2004.

36 CARVALHO, F. S. G. **Extrusão a Quente de Tubos: Análise experimental da distribuição de tensões residuais na parede do tubo**. 2013, 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2013.

37 BIRLEY, S. S.; OWENS, A. Blind Hole Drilling Technique for Residual Stress Measurement Application in NDT. **NDT International**, v.13. n.2. p 3-9. 1980

38. FITZPATRICK, M. E. et. al. **Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction**. National Physical Laboratory. n.52, v.2. Teddington, Middlesex, United Kingdom, 2005.

39 MOORE, M. G.; EVANS, W. P. Mathematical correction for stress in removed layers in X-ray diffraction, residual stress analysis. **SAE Trans**, v.66, p. 340-345, 1958.

40 TOTTEN, R. G.; HOWES, M.; INOUE, T. Handbook of residual stress and deformation of steel. **ASM International**. 2002.

41 SIKARSKIE, D. L. On a series form of correction to stresses measured using X-ray diffraction. **AIME Transactions**, v 239, p. 577-580. 1967.

42 CARDOSO, F. A. A. **Medição de tensões residuais a partir de um ensaio de flexão em quatro pontos**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.

43 LOUREIRO, A. L.C. D. **Determination of the strain distribution in the adhesive joints using Fiber Bragg Grating(FBG)**. 2011. Dissertação (Mestrado

Integrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.

44 BRAGA, A. P. V. **Análise de ligas de alumínio aeronáuticas conformadas por jateamento com granalhas – caracterização e previsão de deformação.** 2011, 267 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

45 TORRES, M. A. S.; VOORWALD, H. J .C. An Evaluation of Shot Peening, Residual Stress and Stress Relaxation on the Fatigue Life of AISI 4340 Steel. **Int. Journal of Fatigue**, v. 24, p. 877-886, 2002.

46 GUAGLIANO, M.; VERGANI, L. An approach for prediction of fatigue strength of shot peened components. **Engineering Fracture Mechanics**. v. 71, p. 501-512, 2004.

47. SCURACCHIO, B. G. **Tensões induzidas por shot peening e durabilidade de molas em lâmina.** 2012. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia metalúrgica e de Materiais) – Universidade Politécnica , Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

48. SIQUEIRA, C. P. **Influência da Nitretação na Resistência à Fadiga do Aço ABNT 4340.** 2002. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2002.

49. SONG, P.S.; WEN, C. C. Crack closure and crack growth behavior in shot peened fatigued specimen. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 63, p.295-304, 1999.

50. BARRAGÁNZ, S. F. et al. Kinetics of tri-axial and spatial residual stress relaxation: Study by synchrotron radiation diffraction in a 2014Al alloy. **Journal of Alloys and Compounds**. n.523 ,p. 94– 101, 2012.

51. CHOUDHRY, M. A.; ASHRAF, M. Effect of heat treatment and stress relaxation in 7075 aluminum alloy .**Journal of Alloys and Compounds**. n.437 ,p.113–116, 2007.

52 BERGER, M. O.; GREGORY, J. K. Residual stress in shot penned timetal 21s. **Materials Science & Engineering**, v. 263, p. 200-204, 1999

53 HOLZAPFEL, H. et. al. Residual stress relaxation in an AISI 4140 steel due to quasiastic and cyclic loading at higher temperatures. **Materials Science and Engineering A**,v.248, p.9-18, 1998.

- 54 SEPPI, F.L.. Relief of shot-peened compressive layer by fatigue loading. **Proceedings of a Workshop on Nondestructive Evaluation of Residual Stress**, 1975.
- 55 BATHIAS, C.; LEBRUN, J. L.; BONNAFE, J.P. X-ray diffraction and acoustic emission study of fatigue damage in aluminum alloys. **ASTM STP 1004**, p.25-36, 1988.
- 56 ZINN, W.; SCHOLTES, B. Mechanical surface treatments of lightweight materials-effects on fatigue strength and near surface microstructure. **J. Mater**, v. 8, p.145-151. 1999.
- 57 FONTANARI F. et. al. **Analysis of residual stress distribution in shot peened al 6082 T5 alloy subjected to fatigue loading**. Surface Treatment 5: Proceedings of the 5th International Conference on Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Treatment Effects. United Kingdom: WIT Press, 2001.
- 58 ARAUJO, B. A. et al. Estudo das Tensões Residuais de Juntas Soldadas de Aço API 5L X80. **Soldag. Insp.** São Paulo. v.18. n. 03. p.217-226. Jul/Set 2013.
- 59 SILVA, A. M. **Caracterização do processo de degradação de uma fibra de poliamida utilizada como meio filtrante na indústria mineral**. 2006. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, 2006.
- 60 ROCHA, A., NUNES M R.; HIRSCH, T. Comparação entre difração de raios X e "método do furo cego" para medição de tensões residuais em barras cilíndricas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 14. n. 3,. p. 1-14, 2009.
- 61 RIKAGU Corporation. **Electropolishing system Instruction manual**. 2013
- 62 ROCHA, A. S.; NUNES, R. M.; FERLAUTO, E. M. Avaliação dos efeitos de tensões residuais através da remoção de material. **Estudos Tecnológicos**, v.4, n.3. p.157-169.set/dez 2008
- 63 DAIRIX, Equipamentos analíticos. Disponível em < <http://www.dairix.com.br/products/view/72>> Acesso em: 28/06/2014
- 64 LIBERTO, R. C. N. **Vida em fadiga de aços carbono com estrutura bifásica ferrita-martensita**. Projeto de Iniciação Científica. LABMAT, FEI – Faculdade de Engenharia Industrial, 2001. Disponível em < http://fei.edu.br/~rodrmag/PROJETOS_IC/Liberto.pdf> Acesso em 13/03/2014.
- 65 GUROVA, T. T.; et. al. Study of the residual stress state during plastic deformation under uniaxial tension in a 5.0 Cr e 0,5 Mo steel. **Scripta Mater**. v.36, n.9,1997.

- 66 PREVEY, P. S. X-ray Diffraction Characterization of Residual Stresses Produced by Shot Peening. In: INTERNATIONAL SHOT PEENING CONFERENCE, 1990, Detroit. **Proceedings...** Detroit, 1990.
- 67 ZAROOG, O. S.; SAHARI, B.B.; ZAHARI, R. Modeling of residual stress relaxation of fatigue in 2024-T351 aluminium alloy. **International Journal of Fatigue**. v. 33, p. 279–285, 2011.
- 68 BIGNONNET, A. Fatigue of shot-peened grade 35 NCD 16 steel. Variation of residual stress introduced by shot peening according to tipe of loading. In: INTERNATIONAL CONFERENCES ON SHOT PEENING, 3., 1987, Garmisch-Partenkirchen. **Proceedings...** Garmisch-Partenkirchen,, 1987, p.659-666.
- 69 FONSECA, M. P. C. et. al. Estudo das propriedades mecânicas e tensões residuais em juntas soldadas de aço ARBL bifásico usado na indústria automobilística. In: CONGRESSO IBERMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA. 8,2007, Cusco. **Anais...** Cusco: PUC, 2007.
- 70 MATTSON, R.L.; COLEMAN,W. S. Effect of shot peening variables and residual stresses on fatigue life of leaf spring specimens. **Trans Soc Automot Eng**. v.62, p.546–56,1954.
- 71 FUCHS, H.O.; STEPHENS, R.I. **Metal Fatigue em Engineering**. USA: Wiley & Sons, 1980, 318p.
- 72 ZHUANG, W. Z.; HALFORD, G. R. Investigation of Residual Stress Relaxation under cyclic load. **International Journal of Fatigue**, n.23, p. S31-S37, 2001.
- 73 TURNBULL, A., et. al. Improving the fatigue crack resistance of waspaloy by shot peening. **Fatigue of Engineering Materials & Structures**. v.21, p.1513-1524, 1998.
- 74 CARVALHO, A. L. M.; VOORWALD, H. J. C. Influence of shot peening and hard chromium electroplating on fatigue strength of 7050-t7451 aluminum alloy. **International Journal of Fatigue**. v.27, p. 1282-1291, 2007.
- 75 HAAMOND, D. W.; MEGUID, S. A. Fatigue fracture and residual stress relaxation in shot peened components. **Surface Engineering**, 1990.
- 76 POTTER, J. M.; MILLARD, R. A. The effect of temperature and load cycling on the relaxation of residual stresses. **Proceedings of the 25th Conference on Application of X-Ray Analysis**, 1976.
- 77 DE LOS RIOS, E. R. et. al. Short crack growth behavior under variable amplitude loading of shot peened surfaces. **Fatigue of Engineering Materials & Structures**, 19, p. 175-184, 1996.

78 WAS, G.S., PELLOUX, R.M. FRABOLOT, M.C . Effect of Shot Peening Methods on the Fatigue Behavior of Alloy 7075-T6. In: ICSP CETIM PERGAMON PRESS. 1981, Paris. **Anais...** Paris, 1981. P.448-454.

79 TEKELI, S. Enhancement of Fatigue Strength of SAE 9245 Steel by Shot Peening, **Materials Letters**, 57, p. 604-608,2002.

80 MUTOH, Y., et. al. The effect of residual stresses induced by shot-peening on fatigue crack propagation in two high strength aluminum alloys. **Fatigue Fracture of Engineering Materials & Structures**, v.10, n.7, p.261-272, 1987.