

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

DESEMPENHO EM FADIGA DE ARAMES SUBMETIDOS AO PROCESSO  
DE SHOT PEENING

Cláudia Lisiane Fanezi da Rocha

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 30 de Agosto de 2010

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

DESEMPENHO EM FADIGA DE ARAMES SUBMETIDOS AO PROCESSO  
DE SHOT PEENING

Cláudia Lisiane Fanezi da Rocha  
Engenheira Metalúrgica

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE-3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre, 30 de Agosto de 2010

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Afonso Reguly

PhD. Thomas Gabriel Rosauo Clarke

Prof. Dr. Mário Wolfart Júnior

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M

Dedico esta dissertação a meus queridos pais.

*"Seja você quem for ou o que faça,  
quando quer com vontade alguma coisa,  
é porque este desejo nasceu na alma  
do Universo. É sua missão na Terra".*

*Paulo Coelho*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir este momento em minha vida;

A meus pais,

Ao CNPq;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Telmo R. Strohaecker;

Aos colegas do LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física) que contribuíram na realização dos ensaios;

Ao Eng. Ricardo Petersen, pelo suporte técnico relacionado ao shot peening;

A empresa Imer;

Ao Msc.Eng. Fabrício Santos, por todo o apoio técnico e paciência nos momentos complicados;

Aos colegas Msc.Eng. Toni R.S de Lima e Eng. Fabiano Bertoni, pela ajuda nos cálculos finais.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Fadiga.....	3
2.1.1.	Mecanismos de Falha por Fadiga.....	4
2.1.2.	Solicitações em fadiga.....	5
2.1.3.	Previsão da Vida em Fadiga com Base na Mecânica da Fratura.....	7
2.1.4.	Fatores que Influenciam na Vida em Fadiga.....	9
2.2	Tensões Residuais.....	10
2.2.1.	Origens das Tensões Residuais.....	10
2.2.2.	Classificação das Tensões Residuais.....	12
2.2.2.1	Tensões Residuais Macroscópicas (Tipo I).....	13
2.2.2.2	Tensões Residuais Microscópicas (Tipo II).....	13
2.2.2.3	Tensões Residuais Microscópicas (Tipo III).....	13
2.2.3.	Influência das Tensões Residuais na Vida em Fadiga do Material.....	15
2.2.4.	Métodos para Determinação de Tensões Residuais.....	16
2.2.5	Extensometria elétrica.....	19
2.2.6	Método do Furo Cego ( <i>Hole Drilling</i> ).....	21
2.3	O Processo de Shot Peening.....	28
2.3.1.	Principais Parâmetros.....	33
2.3.2.	Benefícios do Processo de Jateamento por Esferas na Vida em Fadiga.....	35
2.3.3.	Conceito de Intensidade de Jateamento.....	37
2.3.4.	Conceito de Cobertura e Saturação.....	39
2.3.5	Seleção dos Parâmetros para o Jateamento por Esferas.....	40
2.4	Rugosidade Superficial.....	42
2.4.1	Parâmetros Utilizados.....	43
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	44
3.1	Material Estudado.....	44
3.2	Ensaio Realizados.....	45
3.2.1	Caracterização Metalográfica.....	45
3.2.2	Ensaio de Tração.....	45
3.2.3	Ensaio de Tensão Residual – Método do Furo Cego.....	45
3.2.4	Ensaio de Fadiga.....	46
3.2.5	Medição de Rugosidade.....	46
3.2.6	Perfis de Microdureza.....	47
3.3	Aplicação do Jateamento.....	47
3.4	Cálculos Segundo a Teoria de Resistência dos Materiais.....	49



3.5	Perfis de Tensões ao Longo da Amostra .....	50
4	RESULTADOS .....	53
4.1	Caracterização Metalográfica .....	53
4.2	Ensaio de Tração .....	55
4.3	Ensaio de Tensão Residual – Método do Furo Cego.....	55
4.3.1	Amostra sem Jateamento .....	55
4.3.2	Amostra com Jateamento – Esfera S110 .....	56
4.3.3	Amostra com Jateamento – Esfera S280 .....	57
4.4	Curva de Fadiga.....	57
4.4.1	Condição sem Jateamento .....	57
4.4.2	Condição Jateamento - Esfera S110 .....	58
4.4.3	Condição Jateamento – Esfera S280 .....	59
4.5	Rugosidade .....	60
4.6	Perfil de Microdureza .....	61
4.7	Análise em MEV da Fratura e Superfície dos Arames.....	61
5	DISCUSSÃO .....	65
6	CONCLUSÕES.....	73
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	76
	ANEXOS.....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva de fadiga esquemática [BRANCO 1986].....	4
Figura 2.2 - Banda de deslizamento em fadiga [ASM HANDBOOK 1996]. .....	5
Figura 2.3 - Representação de tensão máxima, tensão média e tensão mínima. ....	6
Figura 2. 4 - Tipos de solicitações de fadiga [BRANCO 1986].....	7
Figura 2.5 - Representação esquemática de ensaios de fadiga. (a) Flexão rotativa com solicitação alternada pura (b) ensaio do tipo push/pull com solicitação flutuante .....	7
Figura 2. 6 - Diagrama esquemático da/dN vs $\Delta K$ , mostrando os três regimes de propagação [BRANCO 1986]. .....	8
Figura 2.7 - Diferentes tipos de tensões residuais [Physique & Industrie 2008].....	13
Figura 2.8 - Tensões residuais submicroscópicas [Physique & Industrie 2008]. .....	14
Figura 2.9 - Ponte de Wheatstone [ASM METALS HANDBOOK, Vol.17, 1996]. .....	20
Figura 2.10 - Quarto de ponte utilizado.....	21
Figura 2.11 - Diferentes tipos de rosetas [ASTM E 877 - 2002]. .....	21
Figura 2.12 - Detalhe do furo feito através do Método do Furo cego [FRY 2000].....	22
Figura 2. 13 - Equipamento para medição de tensão residual .....	23
Figura 2.14 - Roseta utilizando seis extensômetros de resistência elétrica .....	24
Figura 2. 15 - Esquema de funcionamento do método [KOCKELMANN 1993].....	28
Figura 2.16 - Deformação local causada pela esfera do shot peening.....	29
Figura 2.17 - Distribuição típica do perfil de tensões residuais compressivas introduzidas pelo jateamento por esferas [STEPHENS 2000].....	29
Figura 2. 18 - Diferentes sistemas para shot peening [OSK 2005]. .....	30
Figura 2. 19 - Impacto da esfera na superfície [Metal Improvement Company Inc 2001].	31
Figura 2. 20 - Influência da dureza da esfera na intensidade de tensões residuais.....	33
Figura 2. 21 - Tensão residual x profundidade com diversos tipos de esferas existentes [OSK 2005] .....	34
Figura 2. 22 - Mudanças na vida em fadiga do material com o uso do jateamento por esferas .....	35
Figura 2. 23 - Tensões residuais introduzidas no material pelo jateamento por esferas. ....	36
Figura 2. 24 - Intensidade do jateamento em função da espessura da camada com tensão residual compressiva desejada [OSK 2005]. .....	37
Figura 2. 25 - Conjunto de medição para o método Almen [Electronics Incorporated 2008]. .....	39
Figura 2. 26 - Superfícies com diferentes percentuais de cobertura [SILVA 2008]. .....	39
Figura 2. 27 - Curva de saturação [Zirtec 2008].....	40
Figura 2. 28 - Rugosidade medida em um componente fresado, antes e após o jateamento [OSK –Kiefer GmbH - Shot Peening and Shot Blasting Services 1995].....	42
Figura 2. 29 - Rugosidade em um componente polido antes e após o jateamento. ....	42
Figura 2. 30 - Rugosidade Rt.....	43
Figura 3. 1 – Perfil da seção do arame	44
Figura 3. 2 - Esquema de funcionamento do rugosímetro.....	47
Figura 3. 3 - Equipamento de jateamento por esferas. ....	48

Figura 3. 4 - Viga em flexão a quatro pontos [Budynas 2006].	49
Figura 3. 5 - Diagrama de Momento Fletor [Budynas 2006]	50
Figura 3. 6 - Perfis de tensões esperados ao longo do arame	51
Figura 3. 7 - Perfil de tensões residuais – material jateado.	51
Figura 3. 8 - Perfil de tensões residuais juntamente com perfil de	51
Figura 3. 9 - Perfil de tensões residuais, tensões máximas aplicadas e tensões efetivas esperados para o material submetido ao jateamento	52
Figura 4. 1 - Microestrutura – aumento 500x – reagente nital 2%.	53
Figura 4. 2 - Microestrutura do material com superfície descarbonetada.	54
Figura 4. 3 : Superfície após o jateamento. Reagente nital 2%. Aumento 200x.	54
Figura 4. 4 - Tensões longitudinal e tangencial – amostra sem jateamento	56
Figura 4. 5 - Tensões longitudinal e tangencial - amostra com jateamento.	56
Figura 4. 6 - Tensões longitudinal e tangencial - amostra com jateamento.	57
Figura 4. 7 - Curva de fadiga – material sem jateamento.	58
Figura 4. 8 - Curva de fadiga – material com jateamento (esfera S110)	59
Figura 4. 9 - Curva de fadiga – material com jateamento (esfera S280)	60
Figura 4. 10 - Perfil de microdureza.	61
Figura 4. 11 - Aspecto da fratura – material sem jateamento, na região lateral da amostra.	62
Figura 4. 12 - Aspecto da fratura – material sem jateamento, na superfície reta.	62
Figura 4. 13 - Fratura do material com jateamento na esfera S110 e 100% de cobertura.	63
Figura 4. 14 - Superfície submetida ao shot peening com esfera S110 e 100% de cobertura	63
Figura 4. 15 - Superfície sob cobertura de 500% e esfera S110.	64
Figura 5. 1 – Comparação entre as curvas de fadiga obtidas para o material sem jateamento e com jateamento nas esferas S110 e S280 na condição de cobertura 100%.	66
Figura 5. 2 - Gráfico de comparação das tensões residuais longitudinais no material sem jateamento e com jateamento com as esferas S110 e S280.	67
Figura 5. 3 - Gráfico de comparação das tensões residuais, tensões efetivas e tensões máximas calculadas para amostra sem jateamento.	69
Figura 5. 4 - Gráfico de comparação das tensões residuais, tensões efetivas e tensões máximas calculadas para amostra com jateamento – esfera S110.	70
Figura 5. 5 - Gráfico de comparação das tensões residuais, tensões efetivas e tensões máximas calculadas para amostra com jateamento- esfera S280.	71
Figura I. 1– Perfil de tensões residuais após ensaio. [HOLZAPFEL et al 1996]	83
Figura I. 2 – Perfil de tensões residuais. [TURNBULL 2008]	83
Figura I. 3 – Perfil de tensões residuais após 130000 ciclos [TURNBULL 2008].	84
Figura I. 4 – Perfil de tensões residuais em função de diferentes amplitudes de tensões [SCHULZE et al 1996].	85
Figura I. 5 – Efeito Bauschinger. [ZHUANG 2001]	85
Figura I. 6 – Tensões residuais longitudinais e tangenciais após dois milhões de ciclos.	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Mecanismos básicos de geração de TR em diferentes processos.[OGATA 2003]	12
Tabela 2.2: Classificação e principais métodos de medições de tensões residuais. ....	17
Tabela 2.3: Comparação entre as principais técnicas de medição de tensões residuais. [LU 1996].....	18
Tabela 2.4: Comportamento dos principais métodos com relação à problemas microestruturais possíveis [LU 1996]. ....	19
Tabela 2.5: Tamanho nominal dos principais tipos de esferas. ....	34
Tabela 2.6: Plaquetas padronizadas para o método Almen. ....	38
Tabela 3.1: Composição química do material estudado.....	44
Tabela 3.2 : Condições de cobertura e intensidades de saturação. Esfera S110.....	48
Tabela 3.3 : Condições de cobertura e intensidades de saturação. Esfera S280.....	49
Tabela 4.1 – Resultados de rugosidades medidas nas diversas condições. ....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$a$	Comprimento de trinca;
$a$	distância entre os apoios inferior e superior;
$b$	base (da seção retangular da amostra)
$C$	Constante de propagação de trinca;
$D_{ext}$	Diâmetro externo do anel;
$D_f$	Diâmetro médio do furo;
$D_{int}$	Diâmetro interno do anel;
$D_m$	Diâmetro médio do extensômetro tipo roseta;
$da/dN$	Taxa de propagação de trinca em fadiga;
$E$	Módulo de elasticidade;
$ERE$	Extensômetro de resistência elétrica;
$F$	força;
$H$	Profundidade final do furo no Método do Furo;
$h$	altura (da seção retangular da amostra);
$K_I$	Fator de intensidade de tensões para o modo I de deformação;
$K_{II}$	Fator de intensidade de tensões para o modo II de deformação;
$K_{III}$	Fator de intensidade de tensões para o modo III de deformação;
$K_{IC}$	Fator de intensidade de tensões crítico;
$K_t$	Fator de concentração de tensões;
$\Delta K$	Variação do fator de intensidade de tensões;
$\Delta K_{TH}$	Limiar de propagação de trinca por fadiga;
$\Delta K_{eff}$	Variação efetiva do fator de intensidade de tensões;
$K_{min}$	fator de intensidade de tensões mínimo;
$K_{max}$	fator de intensidade de tensões máximo;
$K_{res}$	fator de intensidade das tensões residuais;
$m$	Expoente de propagação de trinca;
$M$	Momento fletor máximo;

$N$	Número de ciclos;
$R$	Razão de carregamento;
$R_{eff}$	Razão de carregamento efetiva;
$\Delta R$	Varição da resistência elétrica;
$x$	profundidade da superfície até a linha neutra da amostra;
$\sigma$	Tensão aplicada;
$\sigma_{Máx}$	Tensão máxima do ciclo de fadiga;
$\sigma_{Máx\ calc}$	Tensões máximas calculadas;
$\sigma_{Mín}$	Tensão mínima no ciclo de fadiga;
$\sigma_{Méd}$	Tensão média do ciclo de fadiga;
$\sigma_{residual}$	Tensões residuais medidas;
$\sigma_a$	Amplitude de tensões;

## RESUMO

Este trabalho foi estruturado visando apresentar os efeitos causados pelo shot peening (jateamento por esferas) em componentes mecânicos. Este processo introduz tensões residuais compressivas na superfície do material, o que retarda a nucleação de trincas de fadiga, promovendo aumento na vida em fadiga.

O material utilizado foi o aço SAE 1060, laminado, com um perfil de 15 por 5mm. Para o jateamento foram selecionados dois tamanhos de esferas de aço: S110 e S280. Para cada tamanho foram realizadas três condições de cobertura superficial no material: 80%, 100% e 500%.

Foram realizados metalografia, ensaio de tração, análise de tensões residuais, curvas de fadiga, rugosidade, perfil de microdureza e efetuadas análises da fratura e da superfície do material com e sem jateamento.

Os resultados apontaram uma melhoria significativa no desempenho em fadiga com a esfera S110 na condição de 100% de cobertura associado às tensões residuais compressivas obtidas.

## ABSTRACT

This work study the effects of shot peening on mechanical components. This process introduces compressive residual stresses in the surface of the material, and cause delays the nucleation of cracks of fatigue, promoting increase in the life fatigue.

The material used was SAE 1060 steel, cold rolled, with section of 15x5mm. For the shot peening two sizes of steel spheres had been selected: S110 and S280. For each size three conditions of superficial covering in the material had been carried through: 80%, 100% and 500%.

Had been realized analysis of metallography, tensile test, analysis of residual stresses, fatigue test, analysis of roughness, hardness test, surface analysis in the material with and without shot peening.

The results indicated a significant improvement in the fatigue performance with the S110 sphere in the 100% of covering condition associated with the compressive residual stresses.



## 1 INTRODUÇÃO

Está bem estabelecido o fato de que fadiga é um processo que depende tanto das condições de superfície quanto da tensão efetiva aplicada, de forma que a maioria das técnicas empregadas para aumentar a vida em fadiga almejam produzir um campo de tensão residual compressivo na superfície [GRANT 2002], procurando retardar a nucleação de trincas, ou ainda, passando estas de superficiais para subsuperficiais.

O shot peening é um processo no qual o material é exposto ao jateamento por esferas, deformando plasticamente a superfície, o que resulta em um campo de tensões residuais compressivo na mesma, aumentando a vida em fadiga. Esta tensão residual gerada é benéfica [WHITERS 2001], inclusive para componentes que sofrem corrosão sob tensão, como por exemplo, molas helicoidais e planas, barras estabilizadoras de automóveis, engrenagens de caixa de câmbio, coroas e pinhões de transmissão, peças de aviões, brocas de perfuração de petróleo e mineradoras.

Cada vez mais tem-se estudado os efeitos benéficos deste processo. A medição das tensões residuais impostas é uma maneira de quantificar os ganhos. Por outro lado, este mesmo processo pode trazer efeitos deletérios ao material, caso os parâmetros envolvidos sejam mal selecionados ou controlados, muitas vezes danificando a superfície metálica, proporcionando o surgimento de trincas mais rapidamente. Sendo assim, torna-se importante um estudo prévio das propriedades do material e das condições de trabalho as quais o componente será submetido, analisando os níveis de tensões presentes e, então, selecionar o tamanho de esfera e os parâmetros que devem ser utilizados, como intensidade e tempo de exposição, garantindo assim, a seleção do parâmetro ótimo para o caso [Metal Improvement Company Inc 2001].

Este trabalho tem como objetivo o estudo dos efeitos causados pelo processo de shot peening na vida em fadiga de arames perfil 15X5mm do aço SAE 1060. Para alcançar este objetivo foram realizados ensaios de medições das tensões residuais no material sem o jateamento e com o jateamento. Também foram medidas as rugosidades superficiais e ainda levantadas curvas de fadiga, lembrando que todos estes ensaios foram realizados em três

condições de cobertura da superfície estudadas, que serão devidamente descritas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Fadiga

Um dos tipos de falhas estruturais mais encontrados em componentes mecânicos é a fadiga. Definida como o fenômeno de ruptura progressiva de materiais sujeitos a ciclos repetidos de tensão ou deformação, seu estudo é de fundamental importância em projetos de máquinas e estruturas. Caracteriza-se pela geração e propagação lenta e gradual de trincas, que leva à ruptura ou, ainda, ao colapso súbito do componente [FERREIRA 2002].

Os primeiros relatos sobre fadiga datam o ano de 1829, quando W.A.J Albert [SURESH 1998] publicou alguns resultados de testes realizados em correntes de ferro submetidas a carregamentos cíclicos. No período de 1852 a 1869, em Berlim, Augusto Wohler estudou a ruptura de eixos ferroviários, nos quais as falhas eram imprevisíveis na época.

Os experimentos de Wohler tinham como objetivo determinar uma faixa de tensão alternada na qual não haveria falha do material. Wohler projetou aparelhos, desenvolveu métodos para medições das cargas de serviço e introduziu o conceito do limiar de fadiga em metais – tensão abaixo da qual não ocorreria falhas por fadiga – e definiu o que viriam a ser as curvas S-N (variação de tensão x número de ciclos) ainda hoje utilizadas no cálculo de vida em fadiga (Figura 2.1).

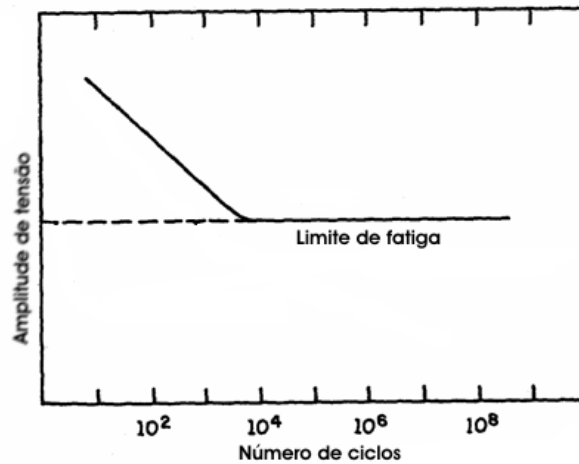


Figura 2.1 - Curva de fadiga esquemática [BRANCO 1986]

Utilizando os dados levantados por Wohler, Bauschinger em 1885, estudou a variação nas propriedades elásticas dos materiais em função do carregamento cíclico [SCHUTZ 1996], o que passou a ser denominado efeito Bauschinger. Por volta de 1910, Basquin, também utilizando o trabalho de Wohler como base, apresentou as primeiras curvas log S x Log N.

A falha do material solicitado dinamicamente pode ocorrer bem abaixo da tensão de falha sob carregamento estático, sendo a amplitude de tensões o parâmetro mais importante na vida em fadiga, embora tendo a máxima tensão de tração grande importância.

#### 2.1.1.1. Mecanismos de Falha por Fadiga

Fundamentalmente o processo de falha por fadiga está dividido em três partes: iniciação da trinca, propagação e ruptura final.

O início das micro-trincas, que ocorrem na superfície do material, geralmente se desenvolve através de irregularidades presentes devido ao processo de fabricação ou de manufatura, ou ainda, em inclusões e vazios, por exemplo, que agem como micro-concentradores de tensões geométricos. O nível de carregamento pode influenciar no número de ciclos de cada fase de uma fratura por fadiga. Além deste fator, existem outros, podendo-se citar os defeitos metalúrgicos preexistentes, que podem reduzir drasticamente o estágio de iniciação [HERTZBERG 1996].

Conforme as tensões oscilam, pode ocorrer escoamento localizado, causando deformação plástica e, por conseqüência, distorções e bandas de deslizamento, com intrusões e extrusões da ordem de 0,1  $\mu\text{m}$  [FUCKS 1980], conforme a Figura 2.2

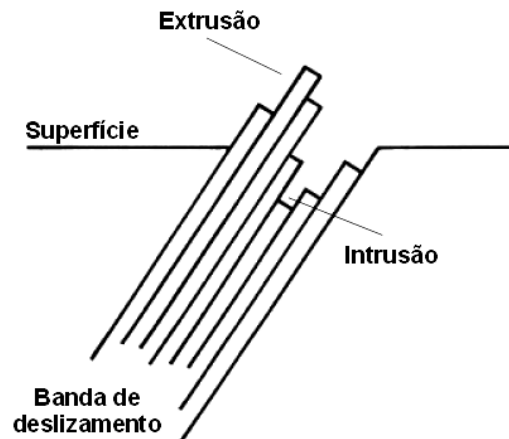


Figura 2.2 - Banda de deslizamento em fadiga [ASM HANDBOOK 1996].

As intrusões e extrusões criam concentradores de tensões maiores, desenvolvendo assim uma zona plástica em sua extremidade (ponta da trinca) e a cada ciclo de tensão poderá ocorrer um aumento do tamanho da mesma. A trinca tende a crescer até tornar-se grande o suficiente e atingir um valor crítico, nessa situação a falha vai ocorrer quase instantaneamente.

#### 2.1.2. Solicitações em fadiga

Falhas por fadiga são causadas por solicitações alternadas, onde tensões ou deformações variam com o tempo. Desta forma, é importante definir os diferentes tipos de carregamentos alternados que podem ocorrer. A Figura 2.3 mostra um carregamento alternado esquemático com as principais grandezas que o definem.

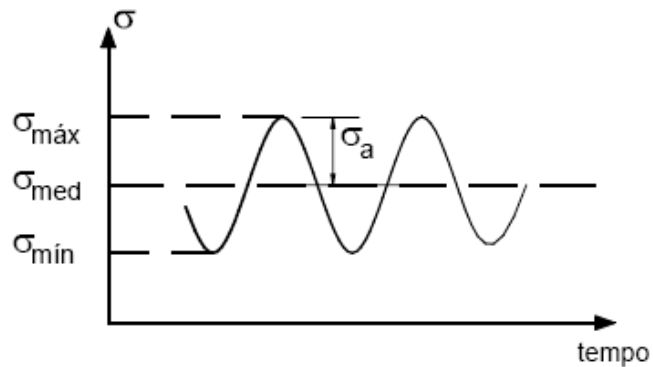


Figura 2.3 - Representação de tensão máxima, tensão média e tensão mínima.  
[ASM HANDBOOK 1996]

A tensão média,  $\sigma_{méd}$  e a amplitude da tensão  $\sigma_a$ , estão definidas, matematicamente, na equação 2.1 e equação 2.2, respectivamente.

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{máx} + \sigma_{mín}}{2} \quad \text{Equação 2.1}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{máx} - \sigma_{mín}}{2} \quad \text{Equação 2.2}$$

Outro parâmetro importante no carregamento é a razão de carregamento R, sendo definida pela equação 2.3 abaixo.

$$R = \frac{\sigma_{Mín}}{\sigma_{Máx}} \quad \text{Equação 2.3}$$

Dependendo do valor da tensão média  $\sigma_m$ , a solicitação será designada alternada pura, alternada, repetida ou flutuante, como mostra a Figura 2. 4.

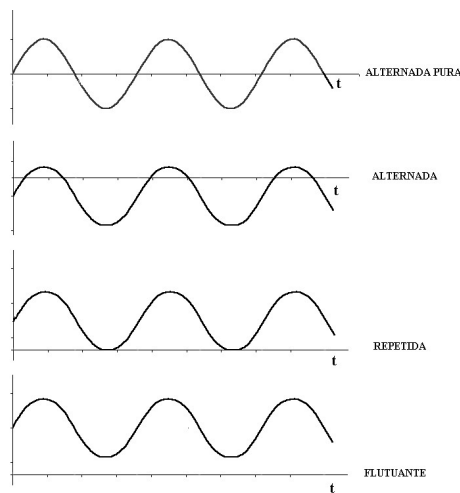


Figura 2. 4 - Tipos de solicitações de fadiga [BRANCO 1986].

Primeiramente os ensaios de fadiga eram realizados em máquinas de flexão rotativa, conforme ilustra a Figura 2.5-a. Logo, a solicitação em fadiga neste ensaio é do tipo alternada pura, sendo a curva de Wohler construída em termos da amplitude de tensão ( $\sigma_a$ ) por número de ciclos. Atualmente, é comum ensaios de fadiga do tipo tração/compressão (*push/pull*), como na Figura 2.5-b, com uso de solicitação flutuante com uma determinada razão de carregamento.

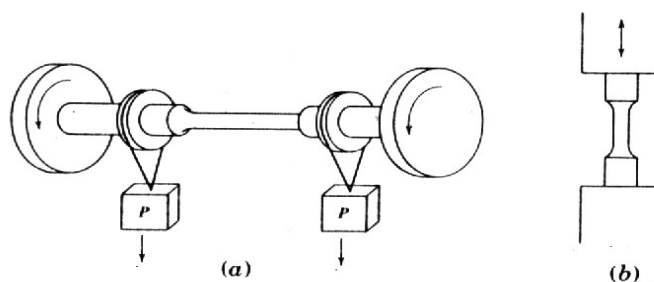


Figura 2.5 - Representação esquemática de ensaios de fadiga. (a) Flexão rotativa com solicitação alternada pura (b) ensaio do tipo push/pull com solicitação flutuante [BRANCO 1986].

### 2.1.3. Previsão da Vida em Fadiga com Base na Mecânica da Fratura

Os testes de fadiga convencionais consistem em ensaiar corpos de prova lisos e polidos com diferentes tipos de solicitações e carregamentos (tração, flexão, flexão rotativa

etc). Este tipo de ensaio não distingue a etapa de nucleação e propagação, sendo apenas medido o número de ciclos total para a falha. Desta forma seria aplicável a um componente considerado livre de defeitos superficiais, o que pode superestimar a vida em fadiga [ANDERSON 1995].

Resultados dos estudos da mecânica da fratura originaram uma teoria de projeto em que se assume que o material não é um meio contínuo e que pode conter defeitos originados, por exemplo, nos processos de fabricação. Esta abordagem consiste em um modelo quantitativo do comportamento de componentes com defeitos observados ou cuja existência se suspeita. O resultado deste estudo é o diagrama  $da/dN$  (taxa de propagação de trinca por número de ciclos) por  $\Delta K$  (fator de intensidade de tensões).

As curvas  $da/dN$  vs  $\Delta K$  são normalmente representadas em coordenadas logarítmicas, apresentando três regiões distintas de regime de propagação I, II e III ( Figura 2. 6).

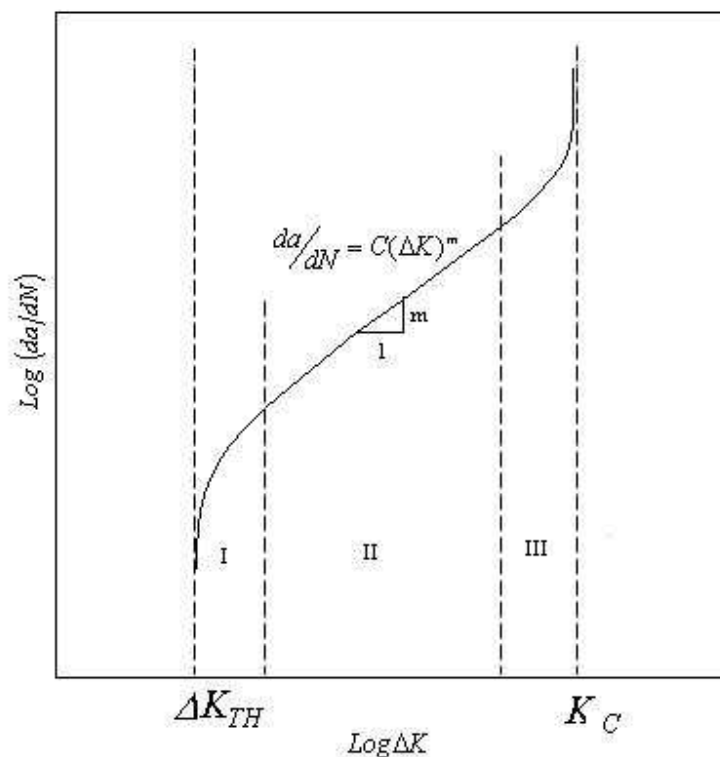


Figura 2. 6 - Diagrama esquemático  $da/dN$  vs  $\Delta K$ , mostrando os três regimes de propagação [BRANCO 1986].



Regime I: Nesta zona, a velocidade de propagação depende fortemente do fator de intensidade de tensões. A curva é limitada por um valor de  $\Delta K$  abaixo do qual não se dá a propagação da trinca, ou então  $da/dN$  é inferior a  $10^{-7}$  mm/ ciclo. Esse valor limite  $\Delta K_{th}$  denomina-se limiar de propagação da trinca.

Regime II: A relação  $da/dN$  vs  $\Delta K$  tem um andamento linear quando representado num gráfico logarítmico. A Lei de Paris (Equação 2.4) descreve a propagação nesta zona para um valor fixo de R.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \text{Equação 2.4}$$

Regime III: A velocidade de propagação da trinca acelera. O valor de  $K_{m\acute{a}x}$  aproxima-se do valor crítico  $K_C$ .

Estas curvas são utilizadas na seleção de materiais, onde as propriedades requeridas são descritas pelos parâmetros  $m$ ,  $C$  e  $\Delta K_{TH}$ . Em geral, para um bom desempenho do componente, deseja-se:

- Valores baixos do expoente  $m$  e da constante  $C$ ;
- Valor elevado de  $\Delta K_{TH}$ ;
- Valor elevado de  $K_C$ .

#### 2.1.4. Fatores que Influenciam na Vida em Fadiga

Entre os principais fatores que afetam a vida em fadiga de um componente mecânico pode-se citar:

- Acabamento superficial: quanto melhor o acabamento superficial, maior a vida em fadiga dos materiais, pois a rugosidade da superfície tem grande influência na formação de concentradores de tensões que, por sua vez, levam à geração das trincas de fadiga;

- Temperatura: em temperaturas elevadas pode-se ter uma menor resistência à fadiga, pois o processo de deformação plástica do material é facilitado, o que não ocorre em temperaturas baixas.
- Efeito da microestrutura: materiais com maior limite de escoamento possuem maior resistência à fadiga, já que para a inicialização das trincas de fadiga é necessário que ocorra localmente uma deformação plástica. A quantidade de inclusões no material também influencia negativamente.
- Concentradores de tensões: são causadores do aumento de tensão localizada, levando ao surgimento das trincas, por isso é importante analisar a geometria do componente, para que não possua, por exemplo, entalhes e furos que possam gerar estes concentradores.
- Tensões residuais: podem ser benéficas, aumentando a vida em fadiga do material quando compressivas na superfície, ou ainda deletérias, quando trativas, diminuindo a vida em fadiga do material. Este assunto será melhor descrito no item 2.2.

## 2.2 Tensões Residuais

São tensões remanescentes em um sólido na ausência de cargas externas e gradientes térmicos [WITHERS 2001]. As tensões residuais são causadas por diversos mecanismos inerentes ao processamento dos materiais e as suas origens podem ser térmicas, metalúrgicas ou mecânicas. Estas tensões chegam como uma resposta elástica do material a uma distribuição de deformações não elásticas, tais como deformações plásticas, precipitação, transformações de fase, deformações por expansão térmica, erros de montagem, etc.

### 2.2.1. Origens das Tensões Residuais

#### 2.2.1.1 Origens Térmicas

As tensões residuais de origens térmicas resultam da distribuição não-uniforme de temperatura em uma dada região do componente. Isso pode ocorrer pela variação não-uniforme de temperatura, ou pela diferença nos coeficientes de expansão térmica entre fases adjacentes, por exemplo, que provocam a ocorrência de deformação plástica

localizada em algumas regiões do componente durante um dado ciclo térmico [HAUK 1997, LU 1996].

#### 2.2.1.2 Origens Metalúrgicas

Neste caso, as tensões residuais ocorrem devido às diferenças entre as propriedades elásticas e cristalinas de fases adjacentes, logo são tensões residuais associadas às mudanças de volume, decorrentes de reações químicas ou transformações de fases no material [HAUK 1997, LU 1996].

Quase sempre ocorre o desenvolvimento de tensões residuais na transformação de fases como consequência da dilatação volumétrica localizada [FRY 2001] a não ser que a transformação seja completamente homogênea.

#### 2.2.1.3 Origens Mecânicas

As tensões residuais de origens mecânicas ocorrem devido à deformação plástica não-uniforme em alguma região do material, causada por um processo de conformação mecânica. A Tabela 2.1 mostra diferentes origens e processos nos quais podemos obter tensões residuais.

Tabela 2.1: Mecanismos básicos de geração de TR em diferentes processos.[OGATA 2003]

ORIGEM	PROCESSO	OBSERVAÇÕES
Deformação Mecânica Diferencial	Conformação	Laminação, Estampagem, Extrusão, estiramento
	Autofretagem	Armas, vasos de pressão
	Conformação Superficial	Jateamento
	Processos de Usinagem	Torneamento, Fresamento, Retificação, Furação
Transformação de fase do material	Soldagem	Todos os Tipos
	Tratamento Térmico	Têmpera, Normalização
Contração ou Expansão Térmica Diferencial	Processos de Usinagem	Torneamento, Fresamento, Retificação, Furação
	Soldagem	Todos os Tipos
	Tratamentos Térmicos	Têmpera, Normalização
	Fundição	Grandes dimensões
	Tratamento Termoquímico	Cementação, Nitretação
Desigualdades Estruturais	Montagem e Ajustes	Estruturas, desalinhamento de Uniões
	Bimateriais	Peças Bimetálicas
Microestrutura Diferencial	Materiais Compósitos	Todos
	Materiais Agregados à Superfície	Deposições por Plasma, Revestimentos Protetores, Antidesgaste
	Tratamentos Térmicos	Têmpera, Normalização

### 2.2.2. Classificação das Tensões Residuais

As tensões residuais podem ser classificadas, segundo o sistema alemão, em tensões tipo I (de primeira ordem), tipo II (de segunda ordem) e tipo III (de terceira ordem).

### 2.2.2.1 Tensões Residuais Macroscópicas (Tipo I)

São as tensões residuais que se distribuem em larga escala e se equilibram por todo o componente. São originadas pelos processos de manufatura e se superpõem às tensões externas aplicadas no componente. Portanto, estas são as tensões de maior interesse em estudos [Physique & Industrie 2008].

### 2.2.2.2 Tensões Residuais Microscópicas (Tipo II)

São as tensões que se distribuem em pequena escala, relativo a um certo número de grãos que têm origem na heterogeneidade e a anisotropia de cada cristal ou grão de um material policristalino [Physique & Industrie 2008].

### 2.2.2.3 Tensões Residuais Microscópicas (Tipo III)

São as tensões residuais existentes na escala atômica, correspondente a ação criada por todos os diferentes tipos de defeitos cristalinos, como os apresentados na Figura 2.7 e Figura 2.8 e que podem ser chamadas de tensões residuais submicroscópicas.

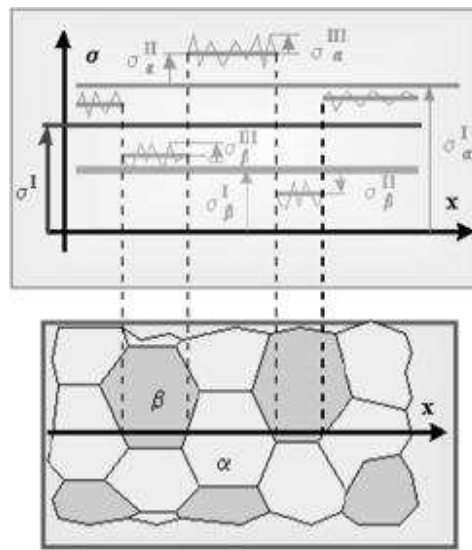


Figura 2.7 - Diferentes tipos de tensões residuais [Physique & Industrie 2008].

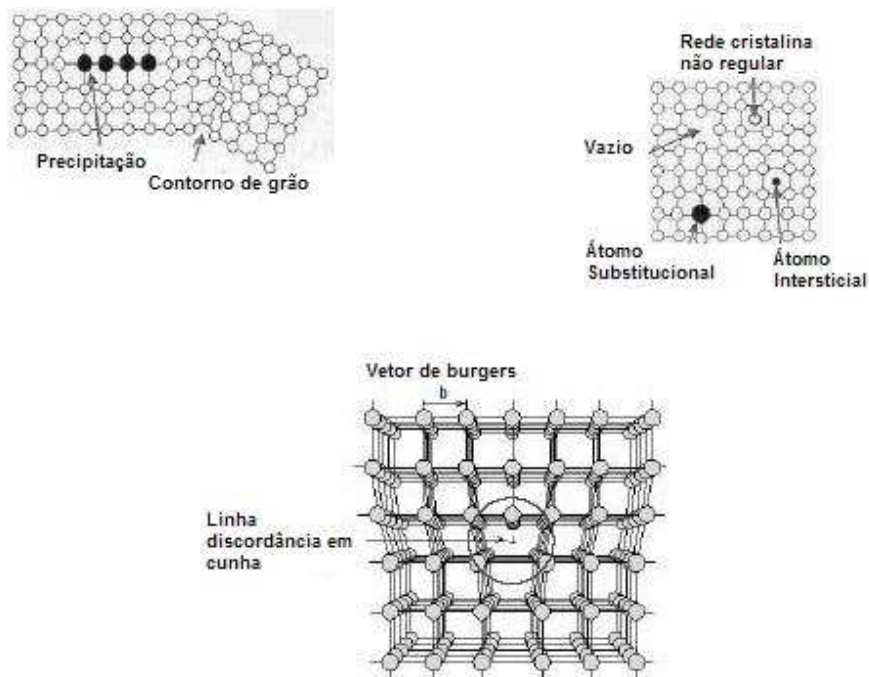


Figura 2.8 - Tensões residuais submicroscópicas [Physique & Industrie 2008].

Os processos de deformação mecânica que causam deformações plásticas em camadas superficiais do material, tais como retificação, usinagem, e ainda as deformações de origem térmicas e de transformação de fase diferencial, provocadas pelo tratamento térmico, causam tensões residuais [GRANT 2002]. Estas são resultantes das interações entre macro-regiões do material e são chamadas de macro-tensões residuais, que se estendem por regiões extensas quando comparadas com o tamanho de grão do material.

As tensões residuais microscópicas atuam em áreas do tamanho de alguns grãos do material e são causadas em materiais com grãos aleatoriamente orientados, pelo escoamento que ocorre primeiro nos grãos cujos planos de deslizamento coincidem aproximadamente com os planos de tensão de cisalhamento. Após a remoção das cargas, os grãos que não escoaram tendem a retornar a sua geometria inicial e os que sofreram escoamento tendem a manter a sua deformação 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, e também não são direcionais a nível

macroscópico, mas podem ser detectadas através da largura dos picos característicos no raio-X.

As tensões residuais submicroscópicas são resultantes de imperfeições da rede cristalina, ocorrendo principalmente próximo a uma discordância. O equilíbrio ocorre ao longo de pequenas frações de um grão. Estas tensões não são direcionais em nível macroscópico e não influem diretamente no comportamento mecânico macroscópico [LU 1996].

As tensões em serviço serão a soma das tensões residuais com as tensões aplicadas sobre a peça, por isso torna-se importante identificar as tensões residuais presentes no componente [GRANT 2002].

### 2.2.3. Influência das Tensões Residuais na Vida em Fadiga do Material

Tensões residuais podem causar efeitos deletérios ou benéficos nos materiais, dependendo de sua disposição, magnitude, profundidade e distribuição [TORRES 2002, WEISS 1987], pois estas tensões podem agir em conjunto, de maneira elástica, em materiais deformáveis plasticamente, sendo que em cargas estáticas são algebricamente somadas [WITHERS 2001].

Trincas de fadiga surgem, em geral, na superfície do componente. Existindo localmente tensões residuais compressivas, estas podem retardar o surgimento de tais trincas, mas caso existam tensões residuais trativas, ao contrário, podem contribuir para o surgimento e propagação das trincas [WEBSTER 2001, LI 1994].

Mesmo para componentes trincados onde aplica-se a mecânica da fratura, na presença de tensões residuais compressivas na superfície, pode ocorrer a elevação do valor de  $\Delta K_{Th}$  do material, já que estas alteram a razão de carregamento (R) do componente para um valor efetivo ( $R_{eff}$ ) segundo a equação 2.5, que indica a superposição das tensões residuais com as tensões máximas e mínimas aplicadas durante o ciclo de carregamento, sendo que  $K_{min}$  é o fator de intensidade de tensões mínimo,  $K_{max}$  o fator de intensidade de tensões máximo e  $K_{res}$  é o fator de intensidade das tensões residuais [FUCKS 1980, WEBSTER 2001].

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} \quad \text{Equação 2.5}$$

Sendo assim, a curva de taxa de crescimento de trinca em fadiga, nestas condições, será dada pela equação 2.6, sendo que  $da/dN$  é a taxa de propagação de trinca,  $C$  e  $m$  constantes,  $\Delta K_{eff}$  é o valor efetivo da variação do fator de intensidade de tensões (Equação 2.7), onde considera-se a superposição de tensões externas e tensões residuais, com  $a$  sendo o tamanho de defeito crítico) [WEBSTER 2001]:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{eff}^m \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde:

$$\Delta K_{eff} = (\sigma_{Ext} + \sigma_{TR})(\pi a)^{1/2} \quad \text{Equação 2.7}$$

Como consequência, a distribuição das tensões residuais no interior do componente torna-se importante para a caracterização do mesmo e o estudo da influência que estas tensões exercem em suas propriedades [MORDFIN 1980].

#### 2.2.4. Métodos para Determinação de Tensões Residuais

Existem várias técnicas de medição de tensões residuais, sendo classificadas como destrutivas, semidestrutivas e não destrutivas.

Para a análise de tensões residuais as seguintes premissas são assumidas:

- O material é isotrópico;
- As técnicas de medição não introduzem novas tensões residuais;
- O campo de tensões é uniforme;
- Existência de um estado plano de tensões.

A escolha de um método específico depende de vários fatores como a natureza do campo da tensão residual, do tempo disponível para a medição, da incerteza requerida, da



extensão da região de interesse, etc. Os métodos conhecidos e mais utilizados são apresentados na Tabela 2.2 abaixo.

Tabela 2.2: Classificação e principais métodos de medições de tensões residuais.

CLASSIFICAÇÃO	PRINCIPAIS MÉTODOS	OBSERVAÇÕES
Semidestrutivos	Método do furo cego	Execução de um furo( $\varnothing$ 0,8 a 3,2mm), normalizado pela ASTM E-837
Destrutivos	Método de remoção de camadas (Método de deflexão)	Camadas retiradas por ataque químico. Pode estar aliada ao método de difração de raio X(método não destrutivo).
	Método do seccionamnto	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças axissimétricas,(ex.:cilindros)
Não destrutivo	Difração de raio X	Variação das distâncias entre os planos atômicos. Técnica normalizada pela SAE J784a
	Difração de nêutrons	Semelhante ao método de raio X, porém com inspeção em todo o volume.
	Método ultrassônico	Variação da velocidade das ondas ultrassônicas no interior do material.
	Método magnético	Relação entre propriedades magnéticas, permeabilidade, indução e efeito Barkhausen.

Selecionar o melhor método de medição requer atenção quanto aos níveis práticos, econômicos e técnicos disponíveis. Conforme este enfoque, um estudo foi realizado [LU 1996], onde as diferentes técnicas foram comparadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Comparação entre as principais técnicas de medição de tensões residuais. [LU 1996]

Descrição	Furo cego	Deflexão	Seccionamento	Raio X	Difração de nêutrons	Ultrassom	Magnético
Hipóteses básicas	Tensão biaxial e uniforme na superfície do furo	Tensão biaxial e uniforme de um retângulo de dimensões grandes em comparação com a espessura	Campos de tensão 3D	Material policristalino de grãos finos, isotrópico e homogêneo	Material policristalino, isotrópico e homogêneo	Material isotrópico e homogêneo, tensão homogênea no caminho acústico entre o transmissor e o receptor.	Material ferromagnético
Tipo de tensões residuais analisado	Macroscópica	Macroscópica	Macroscópica	Macroscópicas e microscópicas	Macroscópica e microscópica	Macroscópica, Microscópica e submicroscópica.	Macroscópica Microscópica e submicroscópica
Parâmetros medidos	Deformação ou Deslocamento superficial	Deformação ou deflexão.	Deformação ou deslocamento superficial	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino	Variação da velocidade da onda ultrassônica	Amplitude de ruído Barkhausen ou Permeabilidade magnética
Área de análise mínima	0,5mm <sup>2</sup>	1000mm <sup>2</sup> 100mm <sup>2</sup> (para strain gages)	100mm <sup>2</sup>	0,5mm <sup>3</sup>	4mm <sup>2</sup>	0,1mm <sup>2</sup> (em alta frequência) e 30mm <sup>2</sup> (frequência mais baixa)	1mm <sup>2</sup> (Barkhausen) e 100mm <sup>2</sup> (permeabilidade)
Mínima profundidade analisada	20um	20um	1 a 2 mm	Dezenas de micrometros	1 mm	15um a 300um	100um
Custo do equipamento(US\$)	10.000 a 50.000	1000	15.000	100.000 a 200.000	Alguns milhões	40.000 a 200.000	10.000 a 60.000
Sistema portátil de medição	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Incerteza típica	+ 20MPa	+ - 30 MPa	+ - 10MPa	+ - 20MPa	+ - 30MPa	+ - 10 a 20MPa	+ - 10 a 20MPa
Tempo de preparação	2 hs	8 hs	5 a 200 hs	8 hs	1 semana	20 min.	10 min.
Tempo de medição	40 min.	30 min.	40min.	20 min.	2 hs.	alguns minutos	instantâneo
Profundidade de inspeção	0,02 a 15 mm	0,1 a 3 mm	Até 1mm	1 a 50 um(não destrutivo) 10mm (destrutivo)	2 a 50 mm	0,15 a 3 mm	0,1 a 1mm

Outra preocupação que deve-se ter na seleção da melhor técnica é analisar as propriedades do material em questão, e ainda possíveis problemas que este pode apresentar em sua microestrutura, conforme aborda a Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Comportamento dos principais métodos com relação à problemas microestruturais possíveis [LU 1996].

Descrição	Furo cego	Deflexão	Seccionamento	Raio X	Difração de nêutrons	Ultrassom	Magnético
Problemas para o caso de estruturas com grãos grandes	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim	Sim
Sensibilidade à deformação ao encruamento	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Alta	Alta
Análise de material de múltipla fase	Tensão média em todas as fases	Tensão média em todas as fases	Tensão média em todas as fases	Tensão em cada fase (se a menor fase exceder uma certa fração de volume)	Tensão em cada fase (se a menor fase exceder uma certa fração de volume)	Tensão média em todas as fases	Tensão média em todas as fases ferromagnéticas
Medidas de tensão em materiais amorfos	Possível	Possível	Possível	Impossível	Impossível	Possível	Possível em fases ferromagnéticas
Medidas e partes com baixo raio de curvatura	Possível $r > 5\text{mm}$	Possível com o método de Sachs	Difícil	Possível $r > 5\text{mm}$	Possível, medidas abaixo da superfície	Difícil, necessidade de sensor especial	Possível $r > 5\text{mm}$
Medidas em camadas (espessuras de camadas)	$> 50\mu\text{m}$	2 a 3 $\mu\text{m}$	$> 2\mu\text{m}$	Todas as espessuras	$> 2\text{mm}$	0,1 a 3mm	0,01 a 1mm

Neste trabalho foi utilizado o Método do Furo Cego (*Hole Drilling Method*) que é baseado na técnica de extensometria elétrica.

### 2.2.5 Extensometria elétrica

Pequenas variações na dimensão do material, devido ao furo que será usinado na superfície, são transmitidas ao extensômetro, que as transforma em variações de sua resistência elétrica (por esta razão os extensômetros são definidos como transdutores). O

transdutor é o elemento que faz a conversão da grandeza a ser medida, através de um efeito físico, pela alteração das condições monitoradas no circuito de medição.

Para a determinação dos alongamentos gerados em um determinado ponto de uma estrutura ou corpo será necessária, então, a colagem de um extensômetro na região e a conexão deste em uma ponte resistiva. No momento em que for realizada a solitação mecânica, os alongamentos superficiais irão deformar o extensômetro, com isto haverá uma alteração de sua resistência elétrica ( $\Delta R$ ), que causará um desbalanceamento da ponte resistiva. Essa variação poderá ser observada pela indicação das leituras do galvanômetro, podendo-se determinar com precisão o valor de tal variação. Conhecido o valor da variação da resistência elétrica do extensômetro, poderemos calcular os alongamentos [ASM METALS HANDBOOK 1996].

Pode-se definir o Fator Gage como uma constante de proporcionalidade entre a variação relativa de resistência elétrica e o alongamento. Uma vez que o fator gage e a resistência elétrica do extensômetro são conhecidos, para determinar o alongamento deve-se conhecer a grandeza  $\Delta R$ , que chega a ser extremamente pequena, da ordem de aproximadamente  $10^{-5}$  Ohms. Devido a seu valor ser extremamente baixo, utilizam-se circuitos especiais, que podem ser usado para aplicações tanto estáticas como dinâmicas. A função de um circuito de ponte é converter uma pequena mudança de resistência em voltagem elétrica. Neste caso, temos a ponte de Wheatstone, mostrada na Figura 2.9. Dizemos que a ponte de Wheatstone está equilibrada quando a leitura no galvanômetro é nula.

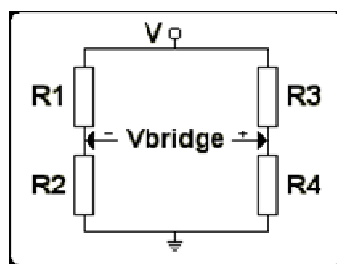


Figura 2.9 - Ponte de Wheatstone [ASM METALS HANDBOOK, Vol.17, 1996].

Existem várias configurações para se utilizar a ponte de Wheatstone, como um quarto de ponte, meia ponte e ponte inteira. O esquema de ligação em um quarto de ponte é mostrado na Figura 2.10, consistindo na utilização de um extensômetro posicionado em um

dos braços, o qual estará colado no material a ser ensaiado e de resistores de precisão nos demais braços.

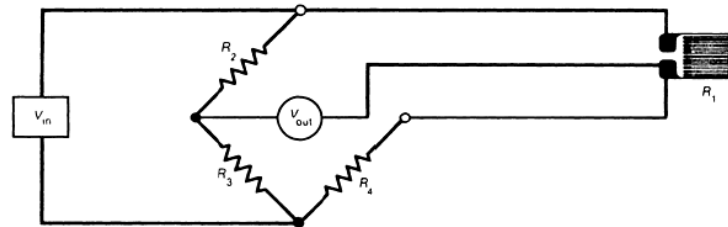


Figura 2.10 - Quarto de ponte utilizado [ASM METALS HANDBOOK, Vol.17, 1996].

Neste trabalho, utilizou-se extensômetros do tipo roseta, onde é possível obter as deformações em três direções. Existem vários tipos de rosetas, conforme apresenta a Figura 2.11.

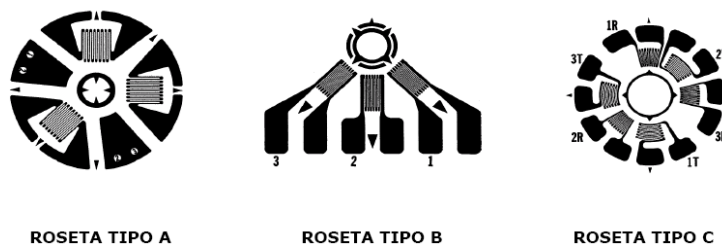


Figura 2.11 - Diferentes tipos de rosetas [ASTM E 877 - 2002].

A roseta tipo A é a mais utilizada em geral, a roseta tipo B se utiliza em certas geometrias, como cordões de solda, pois possui maior sensibilidade. Já a roseta tipo C está indicada em situações onde se necessita também de estabilidade térmica, sendo que apresenta um aumento de sensibilidade de até 100%, segundo citado em trabalhos [GRANT 2001]. Para a seleção do tamanho e tipo de extensômetro mais adequado, deve-se considerar o tamanho da área disponível para a medição,

### 2.2.6 Método do Furo Cego ( *Hole Drilling* )

Com a utilização de equipamentos comercialmente disponíveis e das recomendações da Norma ASTM E837, o método do furo pode ser aplicado rotineiramente, podendo ser aplicado em qualquer laboratório ou no campo sobre corpos de prova, peças ou componentes com grande variedade de tamanho e forma. A técnica é referida como

“semidestrutiva”, uma vez que o pequeno furo mostrado na Figura 2.12, em muitos casos, não provoca danos significativos na integridade estrutural do objeto que está sendo testado.

O furo tem, tipicamente, de 0,8 a 4,8 mm de diâmetro e profundidade igual a 20% superior a este diâmetro para campos de tensão uniformes e 50% superior para campos de tensão não uniformes. Para um grande número de objetos testados pode-se, na maioria das vezes, remover o furo após o teste com uma lixadeira manual.

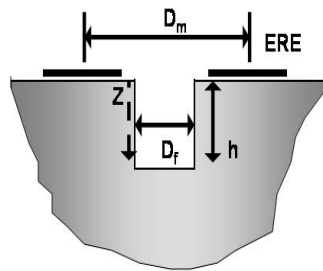


Figura 2.12 - Detalhe do furo feito através do Método do Furo cego [FRY 2000].

A introdução de um furo, mesmo de diâmetro pequeno, em um corpo com tensões residuais relaxa a tensão naquela localização. Isto ocorre porque é perpendicular a uma superfície livre, que é um eixo principal no qual as tensões de cisalhamento e normal são zero. Neste caso o eixo está representado pelo furo na superfície. A eliminação destas deformações, na superfície do furo, muda as tensões na região ao redor do furo, causando a correspondente mudança nas deformações locais na superfície do objeto testado.

A Figura 2. 13 apresenta um equipamento para medição de tensões residuais.

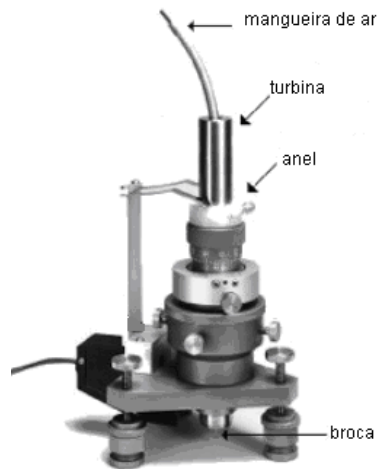


Figura 2. 13 - Equipamento para medição de tensão residual  
Método do furo cego [VISHAY 2010].

O Método do Furo data do trabalho de Mathar (1934), que utilizou um extensômetro mecânico para a medida das deformações decorrentes do alívio de tensões nas vizinhanças de um furo passante em uma chapa fina de um material contendo tensões residuais.

Soete e Vancrombrugge (1950) obtiveram grande melhoria na precisão do método através da utilização de extensômetros de resistência elétrica para a medida das deformações ao invés do extensômetro mecânico.

Kelsey publicou a primeira investigação da variação das tensões residuais através do método do furo em 1956.

As aplicações modernas do método do furo datam do trabalho de Rendler e Vigness (1966). Eles desenvolveram o método do furo cego em um procedimento sistemático, reproduzível e também definiram a geometria dos extensômetros tipo roseta estabelecida na norma ASTM E 837, conforme já apresentado na tabela 2.2.

Bizark e Zochowski foram os primeiros a descreverem um método reproduzível para a medida das tensões residuais não uniformes em 1978.

Em 1981, Schajer apresentou a calibração por elementos finitos para o cálculo das tensões residuais.

Flaman utilizou a turbina de alta velocidade pela primeira vez em 1982.

Schajer, em 1988, apresentou os métodos da Integral e das Séries de Potências, destinado ao cálculo das tensões residuais distribuídas de maneira não uniforme com a profundidade.

Em 1993, Kockelmann apresentou um método alternativo para o cálculo das tensões residuais distribuídas de maneira não uniforme com a profundidade, através da utilização de dados experimentais para a calibração.

Neste mesmo ano, a empresa Micro Measurements lançou a Nota Técnica TN-503-4, indicando um procedimento básico para a determinação das tensões residuais uniformes em componentes mecânicos. Este método, segundo a Measurements Group, é indicado para a medição de tensões residuais que não ultrapassem a 60% da tensão de escoamento do material, pois quando estas estiverem próximas a tensão de escoamento do material, pode ocorrer concentração de tensão devido ao furo e, dessa forma, ocorrer um escoamento localizado, alterando a medição. [Measurements Group 1993].

Schajer e Tootoonian apresentaram em 1997 um novo modelo de roseta extensométrica utilizando seis extensômetros de resistência elétrica ao invés dos três utilizados na roseta normalizada. Neste caso, os extensômetros estão dispostos três a três nas direções radial (R) e circunferencial (C), conforme a Figura 2.14.

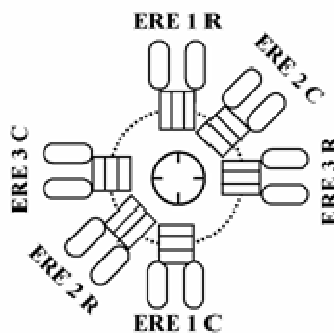


Figura 2.14 - Roseta utilizando seis extensômetros de resistência elétrica [SCHAJER 1997].

Este modelo combina a sensibilidade à resposta da deformação na superfície, através da utilização dos extensômetros radiais, com a resposta aos efeitos no interior do material, melhor medidos pelos extensômetros circunferenciais. Utilizando-se este tipo de extensômetro, consegue-se um aumento na sensibilidade do método de aproximadamente 2,3 vezes quando comparado ao modelo normalizado. A sensibilidade à profundidade máxima também será aumentada em 1,3 vezes com esta roseta.



Rendler e Vignes observaram que a precisão do método do furo para aplicações em campo será diretamente relacionada com a habilidade do operador em posicionar a broca precisamente no centro do extensômetro tipo roseta.

Estudos recentes mostram que para uma excentricidade de 0,025 mm, o erro associado é inferior a 3%. Quando a excentricidade é maior, o erro pode alcançar de 20 a 30 % dos valores medidos, provando que a calibração do equipamento deve ser efetuada periodicamente.

Na maioria das aplicações práticas do método, o furo não é passante, por isso se fala em técnica do furo cego, com uma profundidade aproximadamente igual ao diâmetro que deverá ser muito pequena comparada com a espessura do objeto testado. Como a geometria do furo cego, em função dos efeitos de borda e deformação é muito complexa, não há um cálculo direto para a determinação da tensão residual a partir da teoria da elasticidade.

A incerteza de medição desta técnica está entre 10 e 20% do valor medido ou 10% da tensão de escoamento. Um erro de 15% pode ser esperado quando a magnitude de tensões residuais for superior a 70% do limite de escoamento, de acordo com trabalhos publicados [PROCTER 1982]. Erros na ordem de 20% podem ser contabilizados quando as tensões residuais apresentam valores próximos a 90% do limite de escoamento do material [BEGHINI 1998]. Considerando-se grande o volume de material removido, o método do furo cego é sensível apenas a medida das macrotensões residuais [SHAJER 1996]. Como a formulação clássica considera a existência de campos de tensões residuais uniformes, nos casos em que a tensão varia com a profundidade, a tensão calculada é sempre menor do que a tensão máxima.

Tem-se os seguintes métodos para avaliação dos valores medidos:

#### Método da Integral:

Grande variação com a profundidade;  
Calibração por simulação numérica.

#### Método de Kockelmann:

Grande variação com a profundidade;  
Calibração através de ensaios experimentais.

### Método das Séries de Potências:

Tensões residuais variam suavemente com a profundidade;  
Calibração através da simulação numérica.

Um dos métodos mais sensíveis para o cálculo das tensões residuais em componentes mecânicos é o Método de Kockelmann, que foi apresentado por Kockelmann, em 1993, como uma opção para o cálculo das tensões residuais não uniformes, que apresentam grande variação com a profundidade [KOCKELMANN 1993] e que será utilizado neste trabalho.

As constantes de calibração para todos os métodos são calculadas assumindo que o material é homogêneo. Quando isto não ocorre (para materiais endurecidos, por exemplo) um decréscimo na precisão do método pode ser esperado [SCHAJER 1988].

Para avaliar a uniformidade da tensão ao longo da espessura e garantir o uso correto dos coeficientes de calibração é recomendada a realização da furação de maneira incremental, registrando-se as deformações ou deslocamentos bem como a respectiva profundidade.

A calibração é realizada uma vez através da usinagem de um pequeno furo em um corpo de prova que apresenta um estado conhecido de tensões residuais não uniformes, sujeito a um carregamento uniaxial, sendo as deformações registradas a cada passe.

As funções de calibração  $K_x(\xi)$  e  $K_y(\xi)$  (equação 2.8 e equação 2.9) são calculadas através de simulação numérica, considerando-se o carregamento uniaxial ( $\sigma$ ) e as constantes elásticas do material, sendo que  $\xi$  corresponde a razão entre a profundidade do incremento ( $Z$ ) e o diâmetro final do furo ( $D_o$ ) (Equação 2.10).

$$K_{x(\xi)} = \frac{E}{\sigma} \frac{d\varepsilon_{x(\xi)}}{d\xi} \quad \text{Equação 2.8}$$

$$K_{y(\xi)} = -\frac{E}{\nu\sigma} \frac{d\varepsilon_{y(\xi)}}{d\xi} \quad \text{Equação 2.9}$$

$$\xi = Z/D_o$$

Equação 2.10

As tensões residuais atuando na direção de cada ERE são obtidas através das equações abaixo:

$$\sigma_a(\xi) = \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - \nu^2 (K_y(\xi))^2} \left[ K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \nu K_y(\xi) \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right] \quad \text{Equação 2.11}$$

$$\sigma_b(\xi) = \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - \nu^2 (K_y(\xi))^2} \left[ K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \nu K_y(\xi) \left( \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \frac{d\varepsilon_b(\xi)}{d\xi} - \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right) \right] \quad \text{Equação 2.12}$$

$$\sigma_c(\xi) = \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - \nu^2 (K_y(\xi))^2} \left[ K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} + \nu K_y(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} \right] \quad \text{Equação 2.13}$$

Através das relações apresentadas pelo Círculo de Mohr de tensões, as tensões  $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$  são calculadas através da seguinte equação:

$$\frac{\sigma_{\max}(\xi)}{\sigma_{\min}(\xi)} = \frac{\sigma_a(\xi) + \sigma_b(\xi)}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_a(\xi) - \sigma_b(\xi))^2 + (\sigma_c(\xi) - \sigma_b(\xi))^2} \quad \text{Equação 2.14}$$

E ainda o ângulo principal é obtido por:

$$\beta(\xi) = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\sigma_b(\xi) - \sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)}{\sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)} \quad \text{Equação 2.15}$$

A Figura 2. 15 apresenta uma representação gráfica deste método.

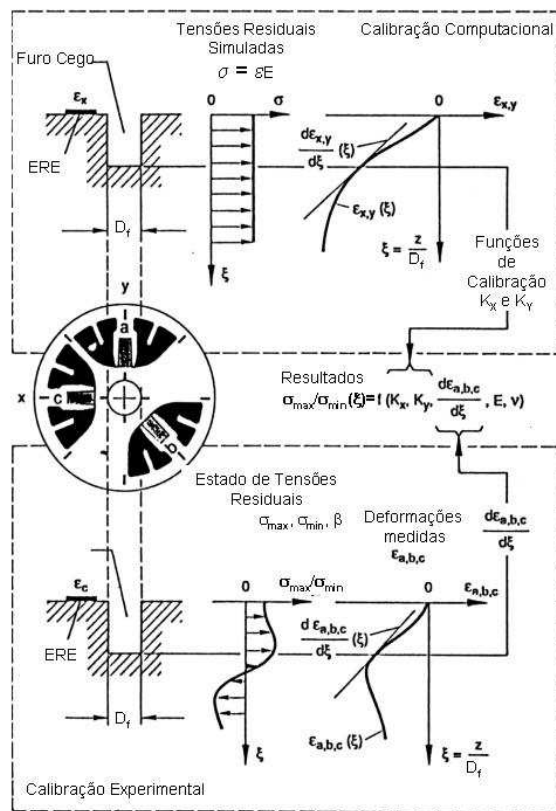


Figura 2. 15 - Esquema de funcionamento do método [KOCKELMANN 1993].

Ainda, este método apresenta uma menor dependência aos erros de instrumentação e medidas de deformação uma vez que as condições reais de ensaio são difíceis de serem simuladas numericamente. Deste modo a calibração experimental apresenta maior representatividade na determinação do perfil de tensões residuais presente nos componentes mecânicos.

### 2.3 O Processo de Shot Peening

Consiste do jateamento por esferas pelo qual se aplica tensão de compressão na superfície metálica, expondo-a ao jato de esfera em alta velocidade, com o objetivo de aumentar a vida em fadiga. De uma forma geral, os efeitos se dão pela introdução de um campo de tensões residuais compressivo na superfície do componente, em virtude da

deformação plástica imposta pelo impacto da esfera, conforme a Figura 2.16 [Metal Improvement Company Inc 2001, STEPHENS 2000].



Figura 2.16 - Deformação local causada pela esfera do shot peening [Metal Improvement Company Inc 2001].

Obtém-se ganho na vida em fadiga do material, pois as tensões residuais compressivas impostas serão somadas com as tensões ativas do carregamento externo do componente [GRANT 2002]. Isso reduz o nível total de tensões efetivas aplicadas na superfície do material contribuindo de forma positiva no desempenho e na vida em serviço do componente, reduzindo a tensão média de fadiga na superfície e, portanto, inibindo ou retardando a iniciação de trincas de fadiga [WHITERS 2001].

A distribuição de tensões residuais introduzidas pelo jateamento por esferas é mostrada na Figura 2.17.

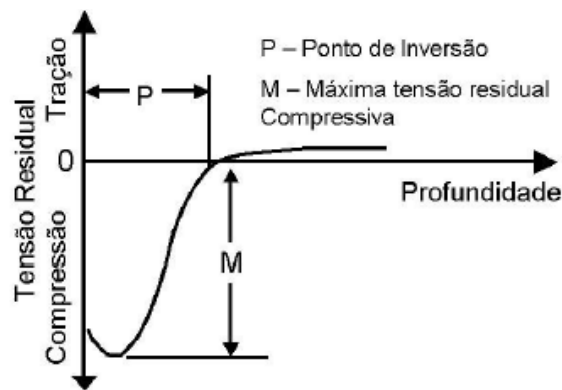


Figura 2.17 - Distribuição típica do perfil de tensões residuais compressivas introduzidas pelo jateamento por esferas [STEPHENS 2000].

É importante quantificar a distribuição das tensões residuais introduzidas durante este processo, pois assim é possível relacionar com parâmetros tais como: velocidade, dimensão e material das esferas, direção e cobertura, a fim de melhorar a efetividade e o controle do processo.

Para o jateamento utilizam-se esferas com dureza elevada, podendo ser de aço carbono, aço inoxidável, cerâmica ou vidro. Normalmente seu diâmetro varia em quatorze diferentes especificações de tamanho, entre 0,18 até 3,35mm. As velocidades são da ordem de 30,5 a 61m/s. A profundidade da camada resultante é entre 0,03mm e 2mm e depende dos parâmetros do processo como velocidade do jato, tamanho e dureza da esfera, como também da dureza do material a ser jateado [Metal Improvement Company Inc 2001 , STEPHENS 2000].

Para acelerar as esferas, pode-se utilizar pressão de ar (Figura 2. 18-a), gerando a força de aceleração, sendo a velocidade função dessa pressão no bico e do diâmetro deste. Ou, ainda, pode-se utilizar a força centrífuga gerada mecanicamente por uma roda centrífuga (Figura 2.18-b), na qual a velocidade da partícula é função da velocidade de rotação e do diâmetro da roda centrífuga [OSK 2005].

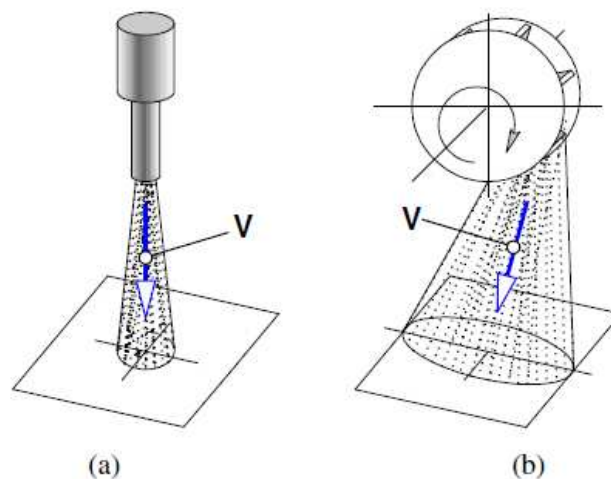


Figura 2. 18 - Diferentes sistemas para shot peening [OSK 2005].

O jateamento dessas superfícies com esferas apresenta resultados surpreendentemente favoráveis às qualidades mecânicas. A intensidade do jateamento varia, principalmente, com a granulometria das esferas, com a pressão de trabalho e com o tempo operacional. A dureza e o acabamento inicial da superfície tratada também influenciam na rugosidade, na profundidade atingida pela compactação e na quantidade de material removido (abrasão). A Figura 2. 19 representa o ponto da superfície que sofre o impacto da esfera [Metal Improvement Company Inc 2001].

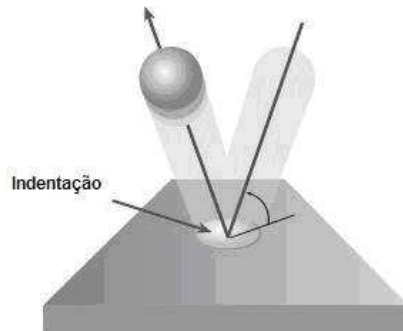


Figura 2. 19 - Impacto da esfera na superfície [Metal Improvement Company Inc 2001].

Na antiga cidade de Ur, da Mesopotâmia, em 2700 a.C., tem-se informações martelamento executado manualmente em ouro. Durante as cruzadas de 1100 a 1400, as lâminas das espadas de Damasco e Toledo eram trabalhadas a frio, também manualmente, para dar flexibilidade e resistência ao aço [Tecgal 2009].

O processo de martelamento foi usado no forjamento antes da idade do bronze, para aumentar a resistência de armaduras, espadas e ferramentas. Na guerra civil americana, canos de espingardas foram tratados para aumentar a dureza do aço. E ainda, nos primeiros carros de corrida dos europeus nos anos 20, os raios de concordância das bielas foram manualmente tratados com martelos especiais. Hoje, para se conseguir esses efeitos, estas peças não são trabalhadas manualmente. Nos séculos 20 e 21, este processo evoluiu muito, mas de um modo geral, sua idéia é a mesma: jatear o material com esferas muito pequenas a alta velocidade, que funcionam de forma semelhante a martelar o material, como era feito na idade média, uma espécie de forjamento localizado.

Principais funções:

- Aumento do limite de fadiga em peças submetidas a esforços alternados contínuos, como molas e barras de torção;
- Uniformização de tensões em peças de alta responsabilidade, muitas vezes apenas em áreas restritas;
- Obtenção de rugosidades controladas para reter lubrificação, suavizar fricções, uniformizar superfícies, fixar desmoldantes, etc.

É um processo incomparável em amplas e importantes aplicações industriais, sendo valorizado pelo aspecto econômico. Como exemplos de componentes em que se aplica este processo citam-se molas helicoidais e planas, barras estabilizadoras de automóveis, engrenagens de caixa de câmbio, coroas e pinhões de transmissão, partes e peças de aviões, brocas de perfuração de petróleo e mineradoras, entre outras. Um exemplo significativo é o aumento da vida útil (em %) em ferramentas. Em operações como usinagem, repuxo, trefilação, tratamento térmico etc., são geradas micro-tensões elevadas que alteram as características normais, como a resistência à fadiga, ao atrito, à ruptura, ao desgaste, à oxidação e às altas temperaturas, entre as mais importantes.

Segundo trabalhos publicados [Metal Improvement Company Inc 2001, STEPHENS 2000], quanto maior for a tensão de escoamento do material a ser tratado, maior a intensidade de tensões residuais compressivas que podem ser introduzidas através deste processo em aços. Em pesquisa, [BENEDETTI 2002] foram estudados os efeitos do jateamento em dentes de engrenagens, realizando testes em dentes sem jateamento, com jateamento e, ainda, em dentes tratados termicamente (tratamento não informado) e com jateamento. Demonstrou-se que esta última condição foi a que se mostrou mais eficaz para o componente em questão.

Pesquisadores estudaram a iniciação e propagação de trinca de fadiga em aço inoxidável A316, após o jateamento [RIOS 1995]. Com os resultados, ficou evidente a eficiência do processo neste material, onde a iniciação da trinca é notavelmente retardada.

No entanto, o processo apresenta também efeitos deletérios no material, dependendo das condições de jateamento selecionadas, sendo de vital importância a seleção e o controle dos parâmetros do processo. Pesquisadores concluíram que os benefícios introduzidos no material desapareciam após certo tempo de exposição ao jateamento, devido ao efeito da rugosidade produzida, podendo danificar a superfície, gerando inclusive concentradores de tensões. [FATHALLAH 2004].



### 2.3.1. Principais Parâmetros

Para controlar o processo de jateamento é necessário controlar os seus parâmetros, pois estes determinam a intensidade (indicador de tensões residuais compressivas) e a cobertura do processo (indicador de projeção em toda a superfície da peça). Os principais parâmetros serão discutidos a seguir.

Dimensão do Abrasivo - alterando o tamanho das esferas (à mesma velocidade) a quantidade de energia das partículas varia; logo, manter o tamanho do abrasivo constante é essencial para a obtenção de um resultado satisfatório. Além disso, a dureza é muito importante. Geralmente, são utilizadas esferas de dureza igual ou superior à do material a ser tratado.

Dureza do abrasivo: A dureza do material abrasivo também modifica os resultados obtidos, conforme a Figura 2. 20.

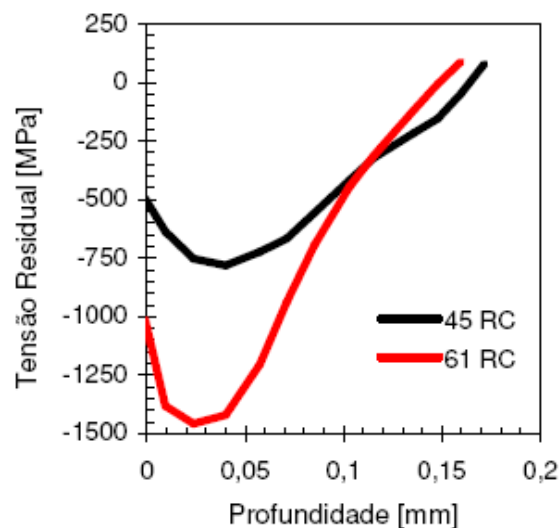


Figura 2. 20 - Influência da dureza da esfera na intensidade de tensões residuais atingida [OSK 2005].

[HARADA 2007] estudou a influência do tamanho das esferas utilizadas em jateamento. Mais precisamente foram analisados resultados de amostras tratadas com microesferas, cujo tamanho variou entre 0,03 a 0,15mm, sendo de ligas de estrutura amorfa que, além de menores, são mais duras. Próximo à superfície obtiveram tensões residuais maiores (compressivas) e a rugosidade foi menor.

Material e Forma do Abrasivo – pode ser em aço, ferro fundido, vidro, cerâmica (Figura 2. 21); além disso, estão disponíveis em diversos tamanhos, conforme a Tabela 2.5.

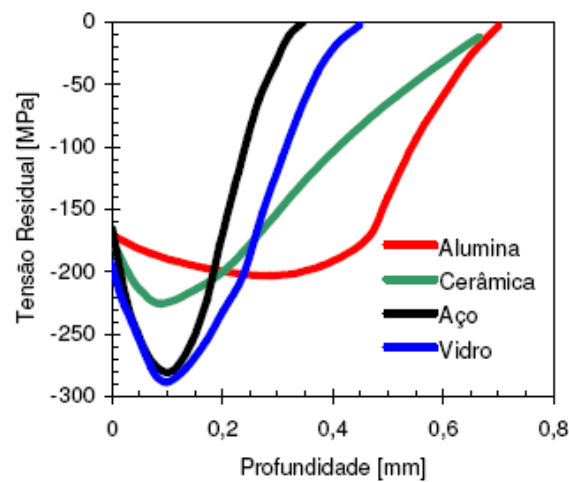


Figura 2. 21 - Tensão residual x profundidade com diversos tipos de esferas existentes [OSK 2005]

Tabela 2.5: Tamanho nominal dos principais tipos de esferas

Tamanho nominal (mm)	Esferas
2.00	S-780
1.70	S-660
1.40	S-550
1.18	S-460
1.00	S-390
0.85	S-330
0.71	S-280
0.60	S-230
0.42	S-170
0.30	S-110
0.18	S-70

Direção dos Bicos - a distância e o ângulo dos bicos com relação à superfície da peça é muito importante, porque uma variação desses parâmetros altera a direção do jato e, conseqüentemente, a cobertura;

Tempo de Projeção - controlado com o objetivo de determinar o ponto de saturação, é um parâmetro importante para o controle da condição de cobertura estabelecida.

### 2.3.2. Benefícios do Processo de Jateamento por Esferas na Vida em Fadiga

Vários são os trabalhos realizados que comprovam o aumento da vida em fadiga nos materiais que foram submetidos ao jateamento.

A nucleação de uma trinca de fadiga, em geral, ocorre na superfície do material, junto a um concentrador de tensão. Torres e Voorwald [TORRES 2002] mostraram que o processo de jateamento por esferas pode levar a zona de nucleação de trincas da superfície para a zona abaixo desta, devido ao campo de tensões residuais compressivo introduzido durante o tratamento, em casos de alto e médio ciclo. Isso demonstra uma correlação entre o ganho de vida em fadiga e o ponto de iniciação de trincas abaixo da superfície. A Figura 2. 22 refere-se a este trabalho. Diferentes parâmetros de jateamento foram selecionados, obtendo-se assim diferentes curvas.

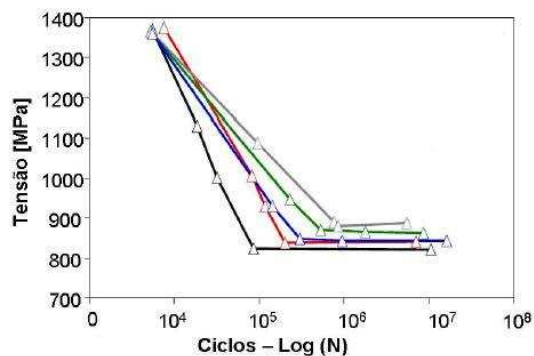


Figura 2. 22 - Mudanças na vida em fadiga do material com o uso do jateamento por esferas [TORRES 2002].

Diferentes diâmetros de esferas e diferentes condições de cobertura levam a resultados diversos, conforme mostra a Figura 2. 23.

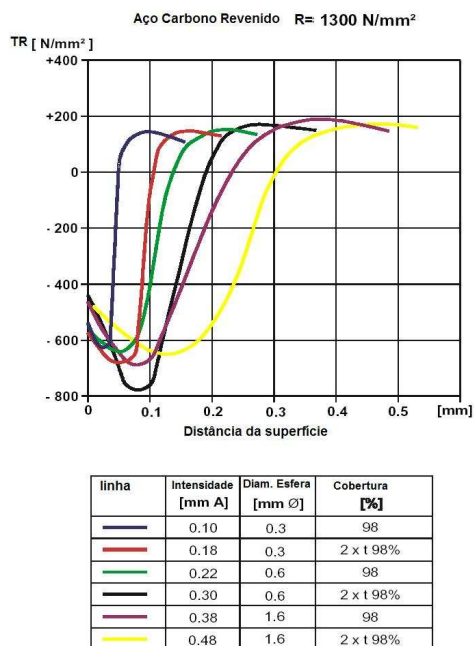


Figura 2. 23 - Tensões residuais introduzidas no material pelo jateamento por esferas.  
[OSK 2005]

A intensidade do jateamento deve ser relacionada com a espessura da camada de tensões residuais compressiva desejada (Figura 2. 24).

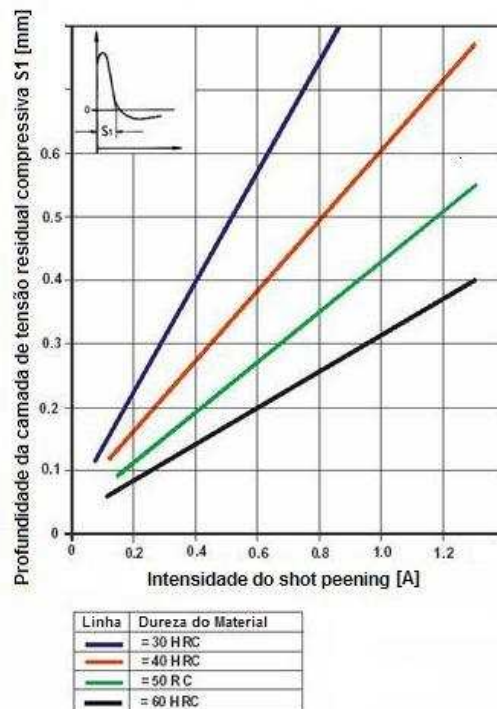


Figura 2. 24 - Intensidade do jateamento em função da espessura da camada com tensão residual compressiva desejada [OSK 2005].

### 2.3.3. Conceito de Intensidade de Jateamento

O conceito de intensidade de jateamento é intuitivo. Quanto maior a massa e a velocidade de uma partícula no momento do impacto, mais intensa será a sua ação. Avaliar a intensidade partindo de uma fórmula simples é praticamente impossível, pois em geral, as esferas são fornecidas dentro de uma faixa de granulometria e seu tamanho pode diminuir com o desgaste. A velocidade média também não é fácil de determinar, quer seja usando ar comprimido ou unidades turbinadas [OSK 2005].

Por outro lado, especificar uma determinada intensidade a ser reproduzida, indicando as diversas variáveis envolvidas, como material (aço ou vidro), granulometria, pressão de ar ou rotação da turbina, ângulo de ataque, distância, tempo operacional, entre outras, não garante a precisão e a confiabilidade requeridas para uma operação de jateamento. Por isso foi desenvolvido o método Almen, que é internacionalmente adotado para especificar a intensidade do jateamento. Este método, parte do princípio de que

deformações iguais em chapas finas padronizadas correspondem a aplicações com iguais intensidades. Almen, o idealizador deste método, padronizou três tipos de plaquetas de aço iguais em dimensões, dureza, planicidade, acabamento, etc, variando apenas a espessura, como mostra a tabela 2.6.

Tabela 2.6: Plaquetas padronizadas para o método Almen.

<b>Tipo de plaqueta</b>	<b>Espessura ( pol )</b>	<b>Espessura ( mm)</b>
Tipo N	0,032” +- 0,001”	0,8128 +- 0,0254
Tipo C	0,051” +- 0,001”	1,2954+- 0,0254
Tipo A	0,094” +- 0,001”	2,3876 +- 0,0254

Padronizou-se, também, um bloco de apoio das plaquetas e um dispositivo com micrômetro comparador, para medir a deflexão produzida pela deformação. A plaqueta do tipo “N” é usada para pequenas intensidades como as obtidas, em geral, com esferas de vidros; as do tipo “C” são as mais empregadas; e as do tipo “A” são para grandes intensidades, geralmente esfera de aço [Zirtec 2008].

O processo é simples: a plaqueta é instalada no dispositivo com micrômetro e este é zerado, aproveitando-se para inspecionar a planicidade. Se a plaqueta já foi utilizada, ela é fixada com o lado em que foi feita a primeira medição para baixo. O bloco de apoio é posicionado em gabaritos de modo que a plaqueta a ele fixada fique em posição que coincida com a superfície da peça a ser tratada. O dispositivo é então jateado, movimentando-se o jato e/ou a peça, nas mesmas condições a serem reproduzidas futuramente nas peças reais. A plaqueta é retirada e levada ao micrômetro e medida a deflexão no mesmo ponto, no lado não jateado. Essa leitura, em polegadas ou milímetros, é o que se denomina de número de Almen, por exemplo: 0,010A a 0,015A em polegadas ou 0,25A a 0,38A em mm. Isto significa que a intensidade a ser aplicada na peça deve estar compreendida entre os limites que provoquem deformações na plaqueta ”A” entre 0,010 e 0,015 (0,25 a 0,38 mm). Na Figura 2. 25 é mostrado um conjunto de medição pelo método Almen.

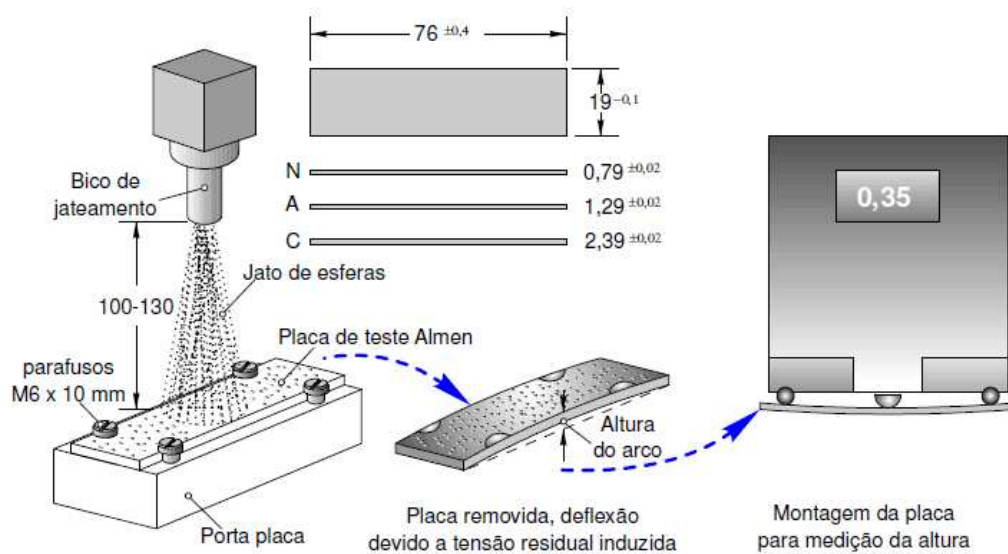


Figura 2. 25 - Conjunto de medição para o método Almen [Electronics Incorporated 2008].

#### 2.3.4. Conceito de Cobertura e Saturação

Na maioria dos casos, além de indicar os limites para o número de Almen, uma especificação de jateamento inclui exigências quanto à cobertura. Jateando-se rapidamente uma superfície, ela pode ser atingida pelas partículas em pontos isolados, cobrindo uma área percentualmente maior ou menor em relação à total. Na Figura 2. 26, estão representadas quatro superfícies aproximadamente atingidas em 12%, 48%, 76% e 92%, respectivamente. Esses percentuais representam a cobertura especificada [SILVA 2008].

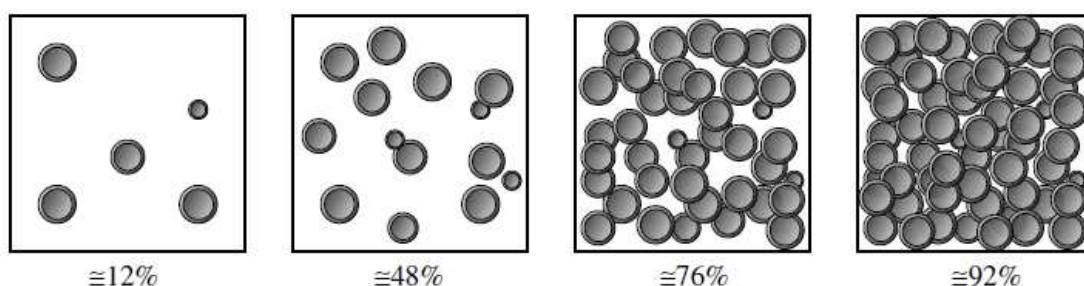


Figura 2. 26 - Superfícies com diferentes percentuais de cobertura [SILVA 2008].

Mantendo-se todas as demais variáveis estáveis e variando-se apenas o tempo, o gráfico tempo/intensidade é sempre representado por curvas similares a indicada na Figura

2. 27, onde parte de uma intensidade zero, cresce rapidamente entrando em tangente a partir de certo ponto. É fácil interpretar o fenômeno como um processo de saturação da estrutura superficial do metal quando, a partir de certo tempo, a intensidade do jateamento pouco ou nada evolui. Conceitua-se que o tempo  $t$  é o tempo necessário para a saturação quando a intensidade aumenta menos de 10% depois de  $2t$ . Esse ponto de saturação praticamente coincide com uma cobertura de 95%, geralmente considerada como 100%. Em algumas operações são exigidas coberturas de 150 ou 200%, o que nada mais é do que utilizar tempos iguais a  $1,5 t$  ou  $2t$  respectivamente.

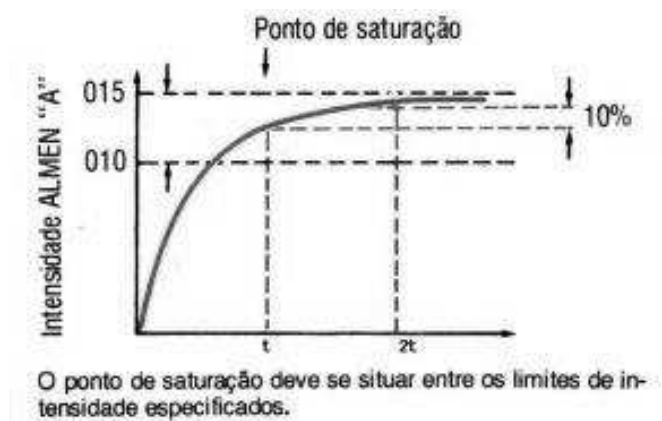


Figura 2. 27 - Curva de saturação [Zirtec 2008].

O comportamento do aço SAE 3415 foi estudado em fadiga de alto ciclo, sendo que o material foi submetido ao jateamento, com cobertura de 100% e 1000% [FATHALLAH 2004]. Foi observado que o campo de tensões residuais introduzido em ambas as condições obtiveram valores bem próximos. Analisando a superfície, quando na condição de cobertura 1000%, houve um grande aumento na densidade de defeitos superficiais, resultando em diminuição da vida em fadiga, se comparado com o resultado obtido na condição de cobertura 100%.

### 2.3.5 Seleção dos Parâmetros para o Jateamento por Esferas

Para selecionar os parâmetros\* para o jateamento a ser executado, muitos são os fatores a serem levados em consideração:

- Composição química, dureza e espessura do material submetido ao processo;
- Rugosidade desejada;



- Espessura esperada da camada compressiva gerada;
- Tipo e tamanho da esfera;
- Intensidade;
- Cobertura da superfície;
- Tempo de exposição;
- Velocidade de aplicação.

\* Todos estes parâmetros são citados em normas, como a SAE J444 e a SAE AMS-S-13165.

Para reproduzir uma especificação de jateamento, são fornecidas informações conforme a responsabilidade da aplicação. Os números de Almen são sempre necessários e, em geral, fornecidos aos pares, limitando o máximo e o mínimo da intensidade a ser aplicada. Em alguns casos é indicado apenas um número e estipulado um percentual a mais ou a menos ( $0,012A \pm 10\%$ ).

Geralmente a cobertura é especificada. Quando omitida, recomenda-se prever 100%. Restrições quanto à problemas de contaminação, limites de rugosidade e outros, induzem a especificações complementares da natureza do material e/ou granulometria; Finalmente, em casos especiais, são indicados métodos e detalhados dispositivos para assegurar a precisa reprodução do processo.

Qualquer que seja o grau de detalhamento da especificação, o primeiro passo é posicionar a plaqueta de Almen no mesmo nível da superfície da peça a ser tratada, reproduzindo-se as mesmas condições de automatismo previsto para a aplicação do processo.

Por exemplo, para jateamento em um canto interno do mancal de um virabrequim, é usual modificar uma peça rejeitada, usinando-se uma cavidade para alojamento do bloco de suporte com uma plaqueta de Almen, localizando-a exatamente no ponto a ser atingido. A peça é montada sobre dispositivo giratório e o teste é realizado com todos os recursos para que possa ser reproduzido futuramente. É comum o uso de dispositivos simples, projetados com o único cuidado de posicionar corretamente a plaqueta e reproduzir os movimentos em frente as pistolas ou turbinas, iguais aos que terá a superfície a ser jateada.

## 2.4 Rugosidade Superficial

O acabamento superficial é fundamental onde houver desgaste, atrito, corrosão, transmissão de calor, propriedades óticas, escoamento de fluidos e superfícies de medição (blocos-padrão, micrômetros, paquímetros, etc.). É medido através da rugosidade superficial, onde é expresso em microns (mm ou m). Existe relação do jateamento por esferas com a rugosidade. Conforme sua intensidade, este processo modifica a superfície do componente, de modo a produzir uma rugosidade mais uniforme, que tanto pode ser uma rugosidade média maior ou menor do que a já existente, beneficiando na vida em fadiga nas duas condições, além de beneficiar em processos de lubrificação, diminuindo o desgaste, e até mesmo a corrosão. Esse efeito é apresentado na Figura 2. 28 e Figura 2. 29.

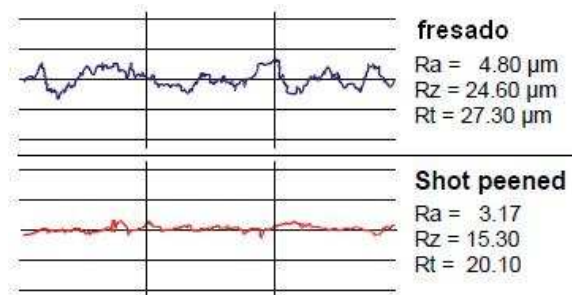


Figura 2. 28 - Rugosidade medida em um componente fresado, antes e após o jateamento [OSK –Kiefer GmbH - Shot Peening and Shot Blasting Services 1995].

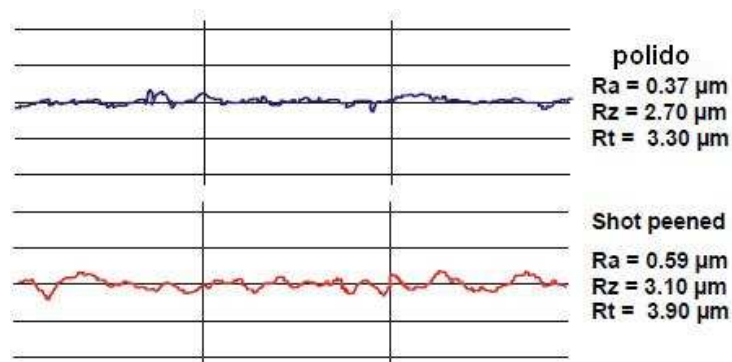


Figura 2. 29 - Rugosidade em um componente polido antes e após o jateamento. [OSK –Kiefer GmbH - Shot Peening and Shot Blasting Services 1995].

#### 2.4.1 Parâmetros Utilizados

De acordo com a Norma NBR ISO 4287, tem-se a seguinte definição:

##### Rugosidade Total (Rt):

Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação ( $l_m$ ), independentemente dos valores de rugosidade parcial ( $Z_i$ ) (Figura 2. 30). Na figura abaixo, pode-se observar que o pico mais alto está no retângulo Z1, e que o vale mais fundo encontra-se no retângulo Z3. Ambos configuram a profundidade total da rugosidade Rt.

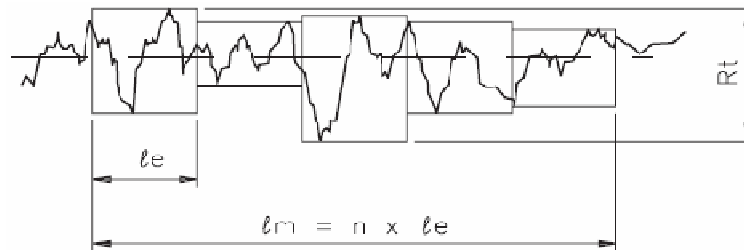


Figura 2. 30 - Rugosidade Rt.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Material Estudado

O material de estudo deste trabalho foi um aço baixa liga com 0,60% de carbono, similar a um SAE 1060. A composição química do material de estudo é mostrada na Tabela 3.1 abaixo, juntamente com a composição padrão do SAE 1060 segundo o Metal's Handbook.

O material foi fornecido na forma de arames de seção retangular de 15 por 5mm e 800mm de comprimento. A Figura 3. 1 mostra o em corte o perfil do arame.

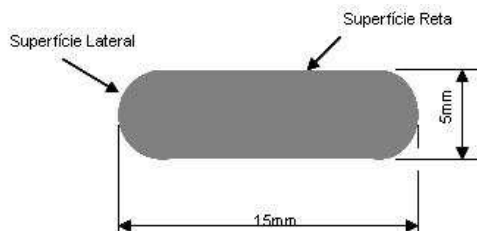


Figura 3. 1 – Perfil da seção do arame

Tabela 3. 1 - Composição química do material estudado.

Composição química dos principais elementos (% em peso)						
	C	Si	Mn	P(Max)	S(Max)	Cr
SAE-AISI 1060	0,55-0,60	0,10-0,30	0,60-0,90	0,04	0,05	0,029
Ensaiado	0,585	0,228	0,845	0,016	0,012	0,029

## 3.2 Ensaio Realizados

### 3.2.1 Caracterização Metalográfica

Foram realizadas metalografias do material nas condições sem jateamento e com jateamento, além de análise no MEV (microscópio eletrônico de varredura).

### 3.2.2 Ensaio de Tração

Foram realizados três ensaios de tração no material para obtenção das propriedades mecânicas do mesmo. Os testes foram feitos uma máquina de tração modelo INSTRON 5585H com medida de carga e deslocamento.

### 3.2.3 Ensaio de Tensão Residual – Método do Furo Cego

De posse das amostras, suas superfícies foram preparadas da seguinte maneira:

- Lixamento manual, com lixas #80,120,220,320 e 400;
- Limpeza da superfície com acetona PA;
- Marcação para o posicionamento da roseta e colagem (sendo o extensômetro número 1 posicionado na direção longitudinal da amostra);
- Colagem dos terminais para posicionamento dos cabos;
- Soldagem dos cabos (solda estanho);

A partir deste ponto, deve-se conectar os cabos ao sistema de aquisição de dados (Spider 8 da HBM®), bem como iniciar o programa auxiliar (Catman®). Configurando de acordo com as características do extensômetro em uso, devemos ter sinais captados da roseta (mesmo que esta ainda não esteja sofrendo deformação).

Visto isso, inicia-se o posicionamento do equipamento, neste caso, o RS200, da Vishay Micro-Measurements®. Para realizar a medição do perfil de tensões residuais. O processo é efetuado em vários passes, cada um com 0,025mm de profundidade, registrando as deformações, até um valor de 0,8mm, neste caso.

De posse dos valores medidos, faz-se o tratamento matemático, com base no método de Kockelman, para obter os valores de tensão residual em cada incremento. Gera-se um gráfico, onde temos tensão residual vs profundidade para tensões máximas e mínimas principais, tensões tangenciais e longitudinais e, ainda, variação do ângulo da tensão máxima principal com a profundidade. Os valores obtidos serão apresentados no capítulo “resultados”.

#### 3.2.4 Ensaio de Fadiga

Foram levantadas curvas de fadiga ao ar com o material como recebido e depois de submetido ao jateamento com as esferas S110 e S280, nas condições de 80%, 100% e 500% de cobertura, sendo cada corpo de prova com 180mm de comprimento.

O ensaio foi realizado em uma máquina servo hidráulica MTS 810. O sistema de fadiga consiste em um ensaio em flexão a quatro pontos com controle de carga com as seguintes condições de ensaio:

- Frequência: 5 Hz;
- Razão de carregamento: 0,1

#### 3.2.5 Medição de Rugosidade

O material apresenta duas superfícies de rugosidades bem distintas, sendo referidas neste trabalho como superfície reta e superfície lateral. No processo de manufatura, o material é trefilado, obtendo-se um perfil redondo e posteriormente é laminado a frio, resultando assim as superfícies diferenciadas.

Foram obtidos os parâmetros Ra e Rt de cada superfície. O equipamento utilizado é do modelo Surfcom 130, da Seimitsu. A Figura 3. 2 mostra esquematicamente o sistema de aquisição.

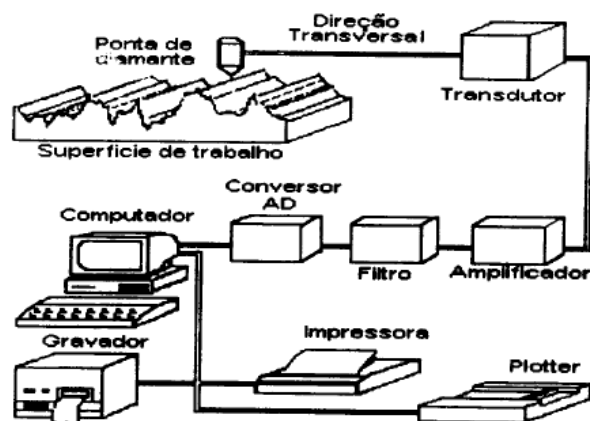


Figura 3. 2 - Esquema de funcionamento do rugosímetro.

### 3.2.6 Perfis de Microdureza

Foram realizados perfis de microdureza no material nas condições em estudo, com uma carga de 200gf.

### 3.3 Aplicação do Jateamento

O jateamento foi feito nas dependências da empresa Imer, em Porto Alegre, sob supervisão do Engenheiro Ricardo Petersen.

A Figura 3. 3 mostra o equipamento utilizado para o processo de jateamento.



Figura 3. 3 - Equipamento de jateamento por esferas.

Parâmetros utilizados:

- Máquina de jateamento por ar comprimido;
- Pressão da Linha: 6,0 Bar;
- Esfera S110 conforme SAE J444 May93 (com dureza entre 57 a 64HRc e diâmetro de 0,3mm); intensidades de saturação obtidos estão na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Condições de cobertura e intensidades de saturação. Esfera S110.

Cobertura	Intensidade de Saturação(A)
80%	0,189
100%	0,364
500%	0,436

- Esfera S280 conforme SAE J444 May93 (com dureza entre 57 a 64HRc e diâmetro 0,7mm), com cobertura e intensidade de saturação dados pela Tabela 3.3.



Tabela 3.3 – Condições de cobertura e intensidades de saturação. Esfera S280.

Cobertura	Intensidade de Saturação(A)
80%	0,660
100%	0,825
500%	0,845

### 3.4 Cálculos Segundo a Teoria de Resistência dos Materiais

A fim de demonstrar a sobreposição das camadas de tensões residuais em relação às tensões de carregamento dos arames, foram realizados cálculos segundo a teoria de resistência dos materiais [BUDYNAS 2006]. A amostra foi considerada uma viga de seção retangular com carga em dois pontos (de mesmo valor), conforme mostra a Figura 3. 4.

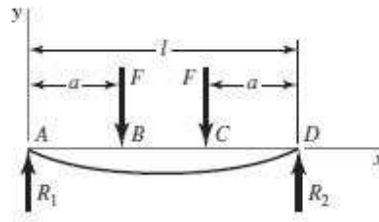


Figura 3. 4 - Viga em flexão a quatro pontos [Budynas 2006].

O momento de inércia é calculado segundo a equação 3.1.

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad \text{equação 3.1}$$

onde b= base e h= altura , considerando a seção da amostra, neste caso 15x5mm.

Para calcular o momento fletor máximo utilizou-se a equação 3.2.

$$M = F.a \quad \text{equação 3. 2}$$

onde F= força e a= distância entre os apoios inferior e superior. O diagrama de momento fletor nesta condição é apresentado na Figura 3. 5.

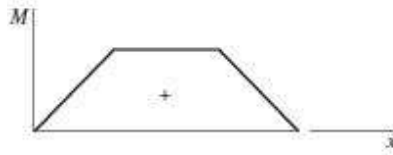


Figura 3. 5 - Diagrama de Momento Fletor [Budynas 2006]

De posse destes valores, foi possível calcular as tensões máximas ao longo da seção da amostra dada pela equação 3.3.

$$\sigma_{\text{máx.calc.}} = \frac{M}{I} \cdot (y_{\text{máx}} - x) \quad \text{equação 3. 3}$$

sendo  $y_{\text{máx}}$  equivalente a metade da espessura total da amostra e  $x$  a profundidade a partir da superfície e em direção a linha neutra, que variou de 0,05 a 0,35mm em incrementos de 0,05mm, assim como os incrementos utilizados nas medidas de tensões residuais. Neste trabalho, considerou-se apenas a análise da superfície tratada até a linha neutra.

A partir das tensões máximas calculadas ao longo da seção, calculou-se as tensões efetivas, que é o somatório das tensões residuais medidas com as tensões máximas calculadas, conforme a equação 3.4..

$$\sigma_{\text{efetiva}} = \sigma_{\text{residuais}} + \sigma_{\text{máx.calc.}} \quad \text{equação 3.4}$$

sendo  $\sigma_{\text{residuais}}$ = tensões residuais medidas e  $\sigma_{\text{máx.calc.}}$ = tensões máximas calculadas.

Os resultados de tensões máximas calculadas e tensões efetivas foram plotados juntamente com as tensões residuais e serão apresentados no capítulo 5 (Discussão).

### 3.5 Perfis de Tensões ao Longo da Amostra

A Figura 3. 6 mostra os perfis de tensões esperados ao longo da espessura dos arames, que foram submetidos ao ensaio de fadiga em flexão a quatro pontos.

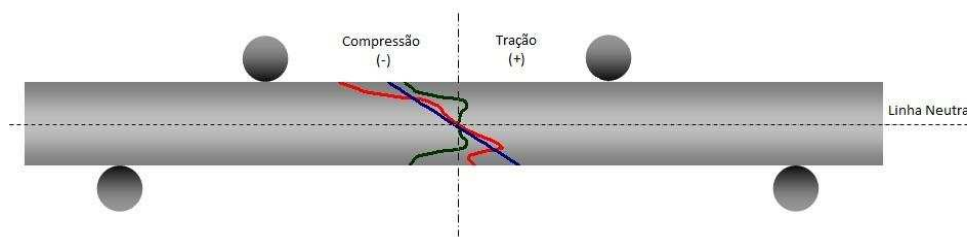


Figura 3. 6 - Perfis de tensões esperados ao longo do arame

Para um material que foi submetido ao jateamento, o perfil de tensões residuais esperado é dado pela Figura 3. 7.

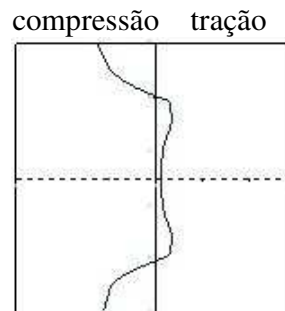


Figura 3. 7 - Perfil de tensões residuais – material jateado.

Plotando no gráfico o perfil das tensões máximas calculadas em função da carga, resulta na Figura 3. 8.

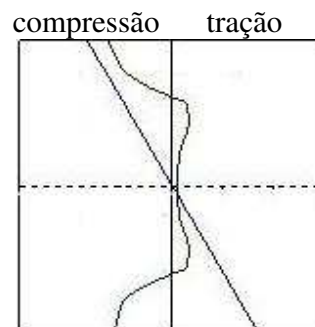


Figura 3. 8 - Perfil de tensões residuais juntamente com perfil de tensões máximas calculadas para o material submetido ao jateamento

E finalmente, na Figura 3. 9, a superposição das tensões residuais sobre as tensões máximas calculadas ao longo da espessura da amostra, resultando no perfil de tensões efetivas.

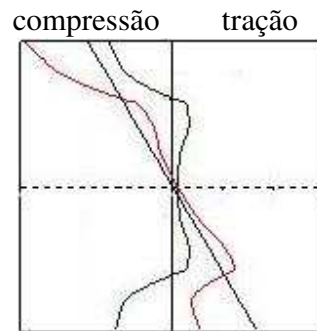


Figura 3. 9 - Perfil de tensões residuais, tensões máximas aplicadas e tensões efetivas esperados para o material submetido ao jateamento

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterização Metalográfica

A metalografia mostra microestrutura composta de perlita e ferrita, típica do aço em questão. A Figura 4. 1 apresenta a microestrutura do material.



Figura 4. 1 - Microestrutura – aumento 500x – reagente nital 2%.

Também verificou-se que algumas regiões em certas amostras analisadas estavam descarbonetadas, conforme ilustra a Figura 4. 2.

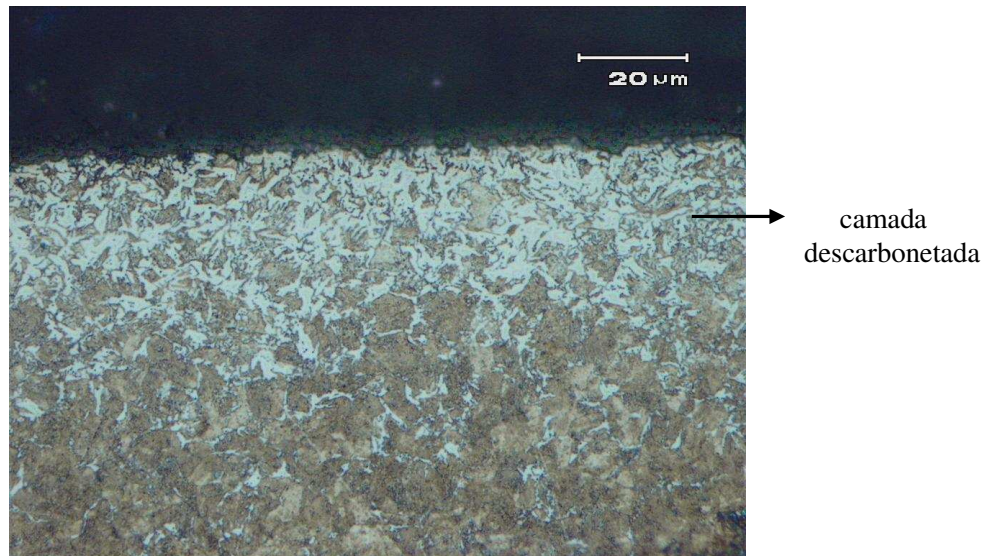


Figura 4. 2 - Microestrutura do material com superfície descarbonetada.  
Aumento 1000x

Após o tratamento de jateamento, foi realizada uma análise metalográfica da superfície a fim de identificar a superfície deformada plasticamente, conforme a Figura 4. 3.

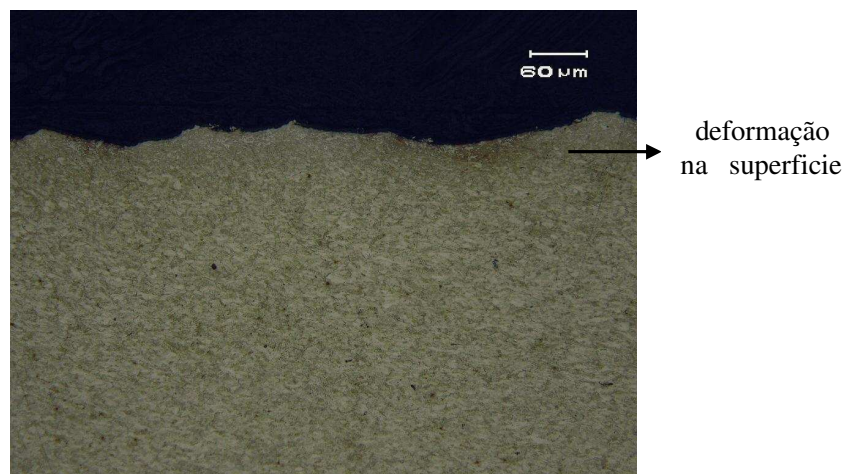


Figura 4. 3: Superfície após o jateamento. Reagente nital 2%. Aumento 200x.

## 4.2 Ensaio de Tração

O material possui limite de escoamento 1200MPa e tensão máxima de ruptura em torno de 1400MPa

## 4.3 Ensaio de Tensão Residual – Método do Furo Cego

Foram analisadas as amostras sem jateamento e amostras com cobertura de 100% da superfície (caso ideal na maioria das aplicações industriais), já que com cobertura de 80% a análise poderia acabar sendo feita em um ponto que não sofreu o jateamento, por exemplo ou ainda com cobertura de 500% poderia estar analisando um ponto onde foi gerado um defeito superficial pelas esferas.

### 4.3.1 Amostra sem Jateamento

Depois de realizados os ensaios, os dados são submetidos a um tratamento matemático, obtendo-se os resultados de tensões residuais para o material sem jateamento, conforme mostrados na Figura 4. 4. Observa-se um nível de tensões residuais trativas bem pronunciado, na ordem de 250MPa, considerado alto, que pode ser deletério ao comportamento em fadiga deste material.

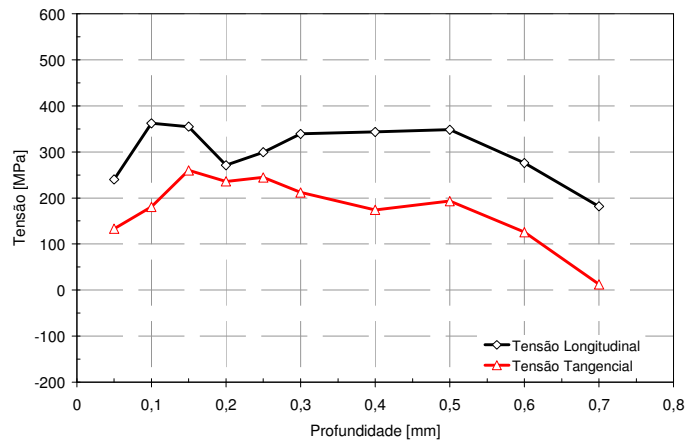


Figura 4. 4 - Tensões longitudinal e tangencial – amostra sem jateamento

#### 4.3.2 Amostra com Jateamento – Esfera S110

Para o material com jateamento em esfera S110 e superfície com 100% de cobertura, obteve-se tensões residuais na ordem de -400MPa (compressiva) em uma camada com profundidade aproximadamente 0,2mm, conforme a Figura 4. 5.

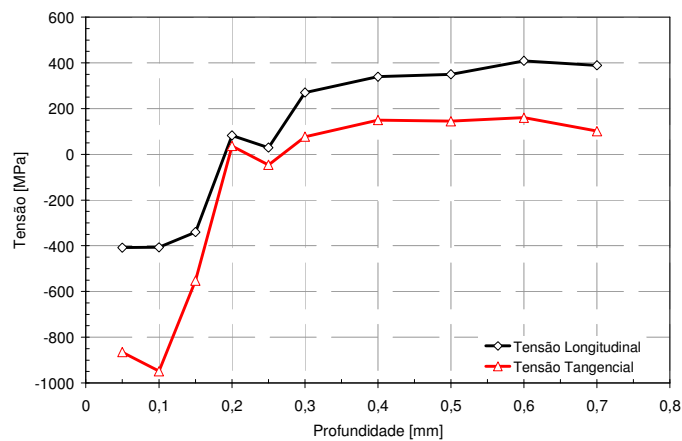


Figura 4. 5 - Tensões longitudinal e tangencial - amostra com jateamento. Cobertura 100% e esfera S110.



#### 4.3.3 Amostra com Jateamento – Esfera S280

Para o mesmo material e mesma condição de cobertura superficial (100%), porém utilizando a esfera S280, as tensões residuais obtidas foram da ordem de -160 MPa (compressiva) a uma profundidade de 0,28mm apresentadas na Figura 4. 6.

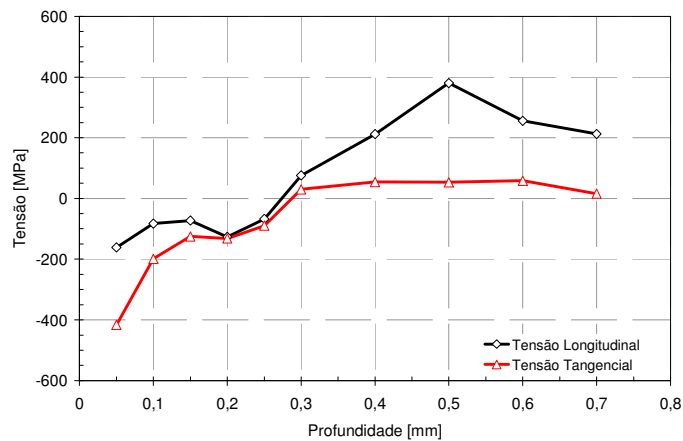


Figura 4. 6 - Tensões longitudinal e tangencial - amostra com jateamento. Cobertura 100% e esfera S280

#### 4.4 Curva de Fadiga

Foram realizados ensaios para obtenção das curvas de fadiga do material nas seguintes condições: sem jateamento e jateamento com as esferas S110 e S280 nas condições de cobertura 80%, 100% e 500%.

##### 4.4.1 Condição sem Jateamento

Esta é a condição do material como recebido, sem jateamento. A Figura 4. 7 mostra que seu limite de fadiga ficou em torno de 450 MPa.

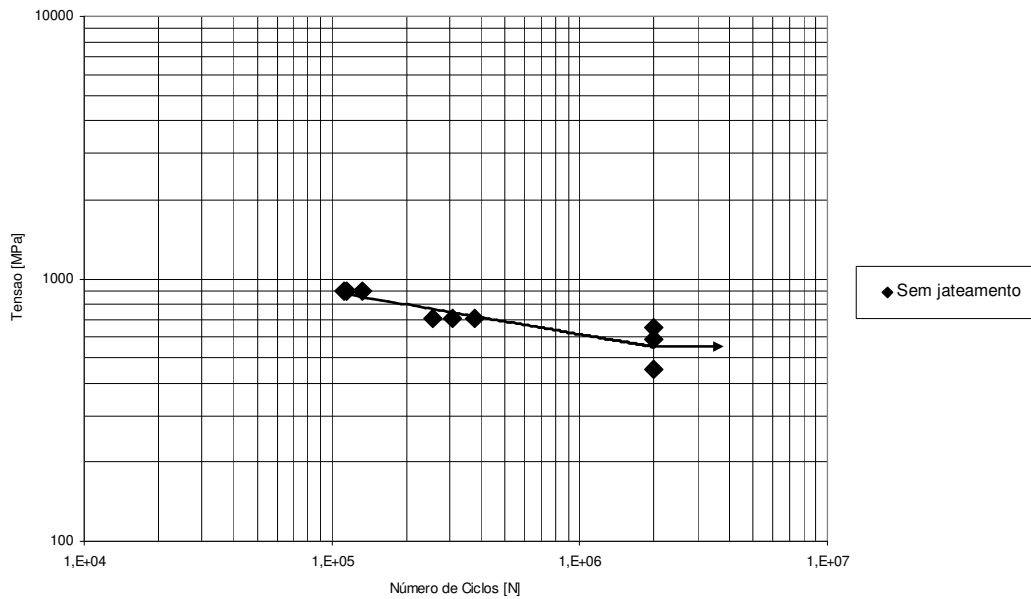


Figura 4. 7 - Curva de fadiga – material sem jateamento.

#### 4.4.2 Condição Jateamento - Esfera S110

Após o jateamento com a esfera S110, as curvas obtidas nos ensaios de fadiga estão apresentadas na Figura 4. 8, onde estão sendo comparadas as curvas do material nas três condições de cobertura estabelecidos e do material sem jateamento.

Fica evidente a melhoria na vida em fadiga na condição de 100% de cobertura superficial, onde o limite de fadiga passa de 450MPa para 750MPa. Já nas condições de 80% e 500% houve pequena diminuição do limite de fadiga do material quando comparado ao material sem jateamento.

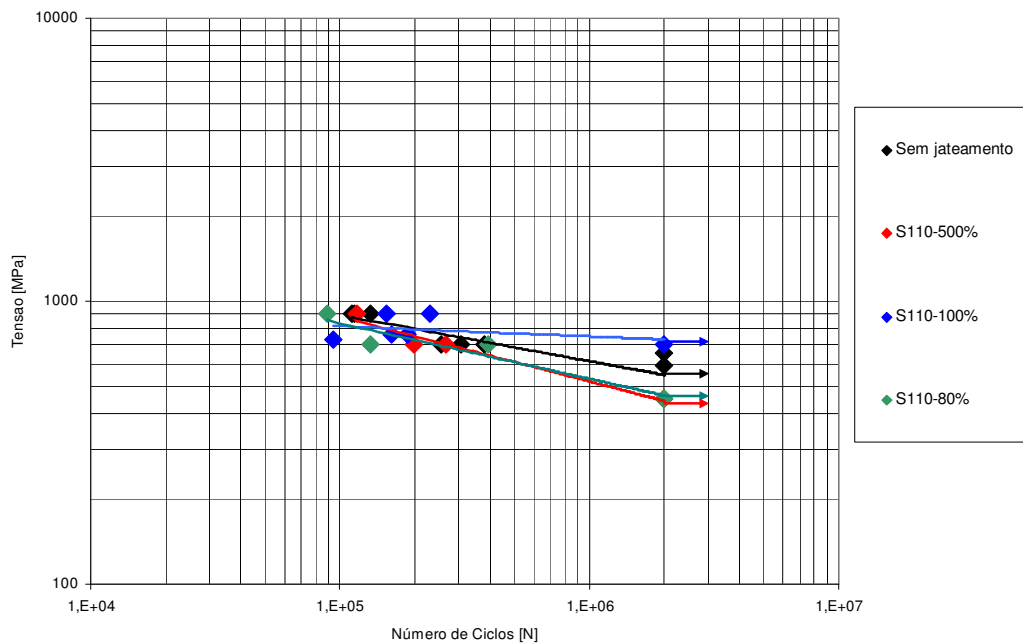


Figura 4. 8 - Curva de fadiga – material com jateamento (esfera S110) nas três condições de cobertura em comparação com a curva do material sem jateamento.

#### 4.4.3 Condição Jateamento – Esfera S280

A Figura 4. 9 apresenta a comparação das curvas de fadiga nas três condições de cobertura e do material sem jateamento. Não houve melhoria, pelo contrário, houve perda no desempenho do material jateado, quando comparado ao material sem jateamento, mesmo na condição de cobertura superficial de 100%, onde foi obtida uma pequena camada de tensões residuais compressivas, como já foi apresentado.

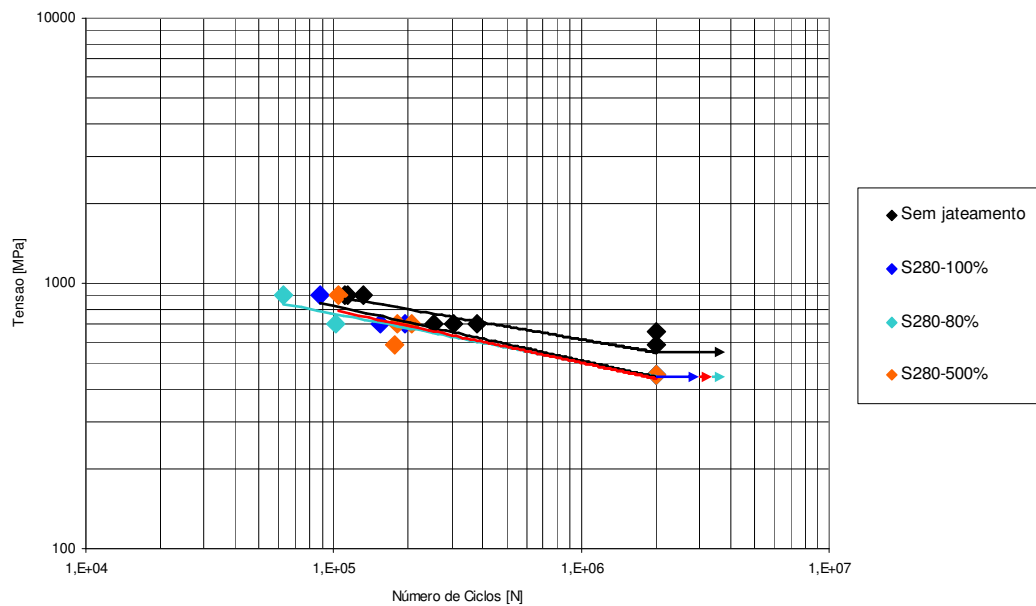


Figura 4. 9 - Curva de fadiga – material com jateamento (esfera S280) nas três condições de cobertura em comparação com a curva do material sem jateamento.

#### 4.5 Rugosidade

O valor da rugosidade  $R_t$  e  $R_a$  medido em cada condição está apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados de rugosidades medidas nas diversas condições.

Condição e cobertura	superfície reta $R_t(\mu m)$	superfície lateral $R_t(\mu m)$
Sem jateamento	2,148	15,925
Jateamento -S110 - 80%	35,425	34,95
Jateamento -S110 - 100%	30,201	32,563
Jateamento -S 110 - 500%	56,825	50,763
Jateamento -S280 – 80%	26.057	36.712
Jateamento -S280 – 100%	33.413	24.900
Jateamento -S280 – 500%	38.988	30.550

#### 4.6 Perfil de Microdureza

Foi medido o perfil de microdureza, apresentado na Figura 4. 10 do material sem jateamento e ainda com jateamento nos dois tamanhos de esferas e na condição de 100% de cobertura. A carga utilizada foi de 200gf.

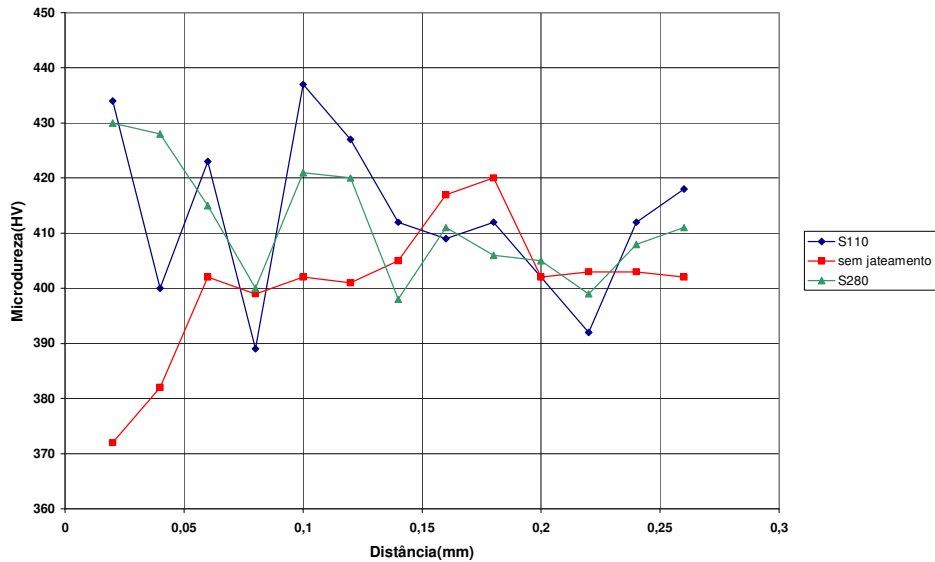


Figura 4. 10 - Perfil de microdureza.

#### 4.7 Análise em MEV da Fratura e Superfície dos Arames.

Fez-se análise da fratura dos corpos de prova submetidos à curva de fadiga, conforme mostra a Figura 4. 11 e a Figura 4. 12, com auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), do material sem jateamento.

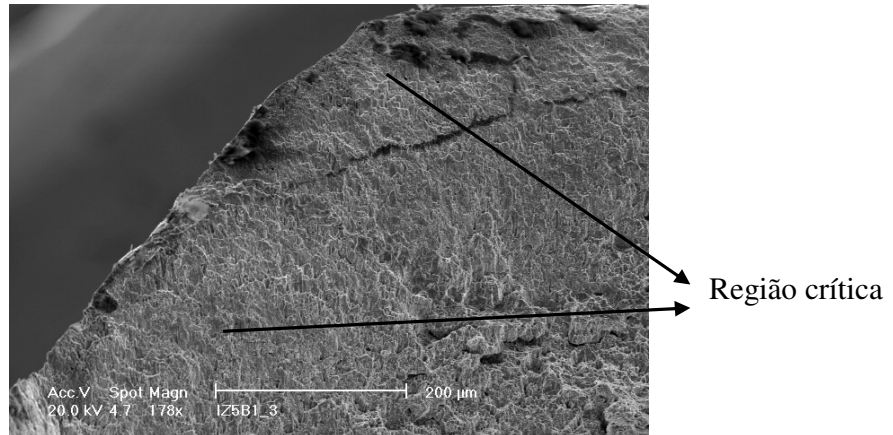


Figura 4. 11 - Aspecto da fratura – material sem jateamento, na região lateral da amostra.

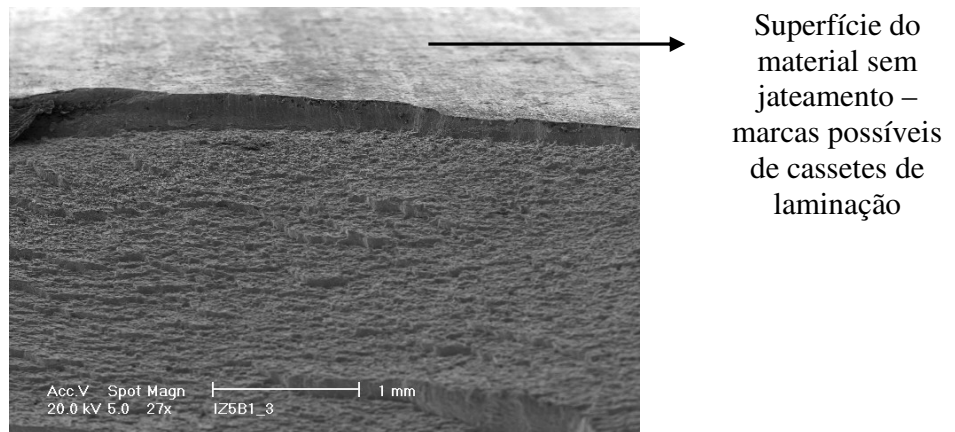
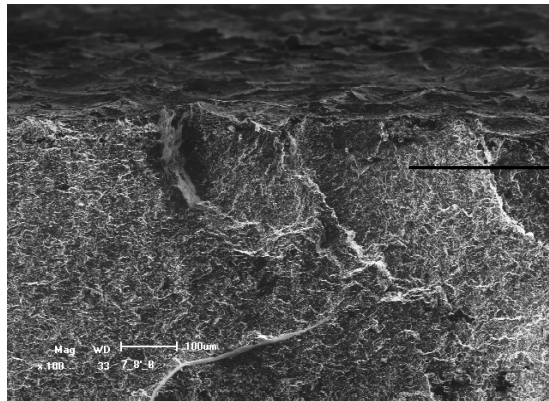


Figura 4. 12 - Aspecto da fratura – material sem jateamento, na superfície reta.

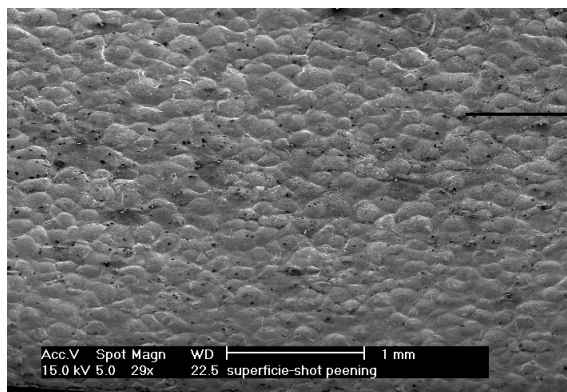
Após submetidos à curva de fadiga, os corpos de prova com jateamento foram também analisados em microscópio eletrônico de varredura (MEV), conforme mostrado na Figura 4. 13.



Aspecto da  
fratura

Figura 4. 13 - Fratura do material com jateamento na esfera S110 e 100% de cobertura.

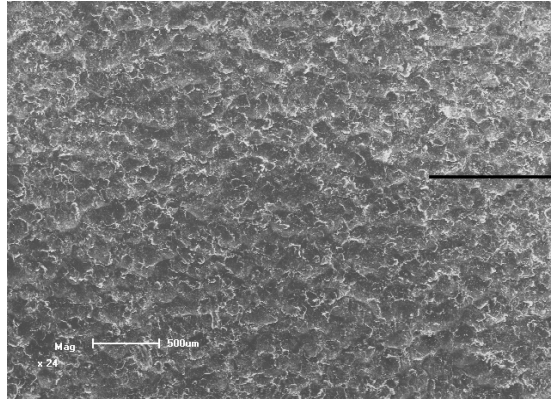
Na Figura 4. 14 abaixo, em detalhe a superfície, apresentando as deformações causadas pelas esferas, no material em condição de cobertura 100%.



deformação na  
superfície  
causada pelo  
impacto das  
esferas

Figura 4. 14 - Superfície submetida ao shot peening com esfera S110 e 100% de cobertura

Amostras com cobertura 500% foram analisadas. A Figura 4. 15 apresenta a superfície, evidenciando danos devido ao grande tempo de exposição ao jateamento.



deformação na  
superfície causada  
pelo impacto das  
esferas

Figura 4. 15 - Superfície sob cobertura de 500% e esfera S110.



## 5 DISCUSSÃO

A metalografia mostrou uma estrutura predominantemente perlítica. Cabe ainda ressaltar que, em algumas amostras verificou-se descarbonetação na superfície, o que pode diminuir a dureza do material e a vida em fadiga. Já no material com jateamento, pode-se verificar a deformação plástica imposta na superfície causada pelas esferas.

Obteve-se medições de tensões residuais trativas na superfície do material sem jateamento (próximo de 250MPa). Estes valores são consequência dos processos de fabricação do material e são considerados deletérios, reduzindo sua resistência à fadiga.

Com relação à curva de fadiga, espera-se que o material tenha o limite de fadiga equivalente à metade da tensão máxima de ruptura, que neste caso é de 1400MPa. Nas amostras sem jateamento, os resultados mostraram que o seu limite de fadiga foi inferior a 700MPa, o que demonstra o comprometimento do material frente às tensões residuais trativas encontradas.

A rugosidade medida na superfície reta do material (sem jateamento) possui um valor menor do que na superfície lateral. Isso provavelmente pelo fato do material ser trefilado, gerando um produto de perfil redondo e posteriormente laminado, tornando-se um arame de perfil 15 por 5mm; logo, têm-se uma região arredondada nas laterais, o que torna esta crítica.

Junto das imperfeições na superfície dos arames, que foram constatadas no MEV, observou-se um maior número de concentradores de tensões, especificamente entre a superfície reta e a superfície lateral dos corpos de prova, ou ainda nas marcas dos cassetes de laminação (na superfície reta), incentivando o início das trincas e influenciando na vida em fadiga do arame.

Para as amostras com jateamento, foram levantadas as curvas de fadiga do material tratado com os dois tamanhos de esferas (S2110 e S280) e nas três condições de cobertura propostas (80%, 100% e 500%). O melhor desempenho se deu em condições de 100% de cobertura, com a esfera S110, tanto em alta tensão como para alto ciclo. Para o material submetido ao jateamento com a esfera S280 não obtivemos melhorias, mesmo na condição de cobertura 100%, conforme ilustra a Figura 5. 1 abaixo, chegando até mesmo a propiciar uma queda no limite de fadiga do material.

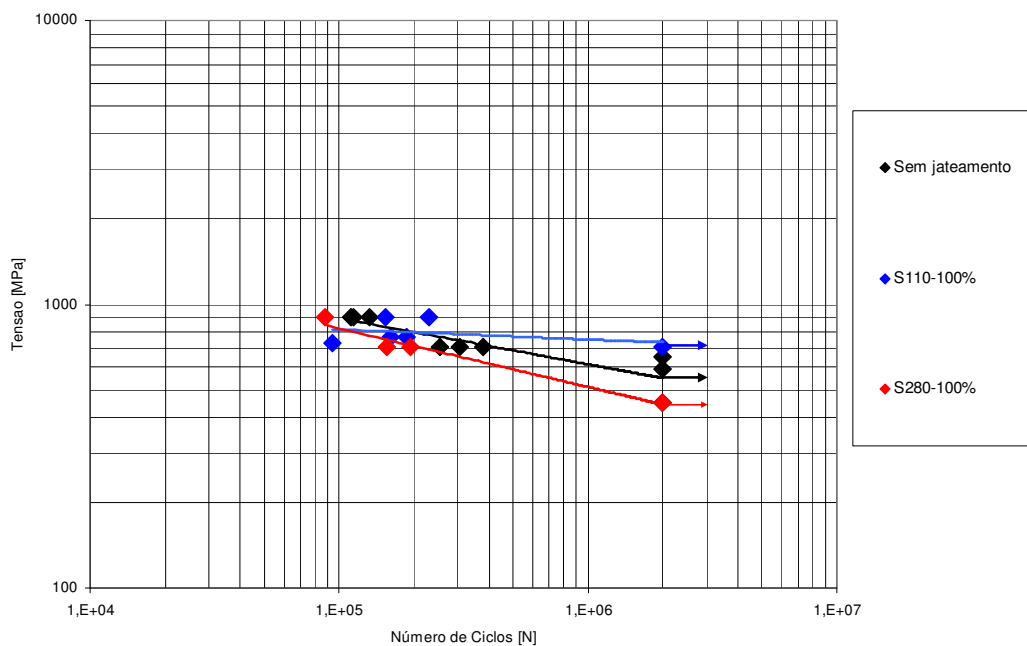


Figura 5. 1 – Comparação entre as curvas de fadiga obtidas para o material sem jateamento e com jateamento nas esferas S110 e S280 na condição de cobertura 100%.

Para o material com jateamento pela esfera S110 em condição de cobertura 100%, verificou-se um ganho considerável na vida em fadiga, elevando seu limite de fadiga de

450MPa para 750MPa. Isso se deve ao fato das tensões residuais compressivas que foram impostas pelo jateamento, na ordem de 400MPa, numa profundidade em torno de 0,2mm, que dificultaram a nucleação de trincas de fadiga. Sendo assim o material encontra-se dentro do esperado, tendo seu limite de fadiga em torno da metade da sua tensão máxima de ruptura.

O mesmo não ocorreu com o jateamento realizado com a esfera S280 na mesma condição de cobertura, onde obteve-se tensão residual compressiva na ordem de 160MPa, a uma profundidade de 0,28mm, mas que quase não causou influência na curva de fadiga. O perfil de tensões residuais atingiu uma profundidade levemente maior, sendo a intensidade de jateamento utilizada maior, a esfera maior, mas em compensação, o valor das tensões residuais medidas foi bem menor.

A Figura 5. 2 abaixo apresenta um gráfico comparativo das tensões residuais medidas no material sem jateamento e com jateamento (cobertura 100%) com as esferas S110 e S280. Estão sendo comparadas aqui as tensões longitudinais pelo fato de serem encontradas no sentido de solicitação dos arames.

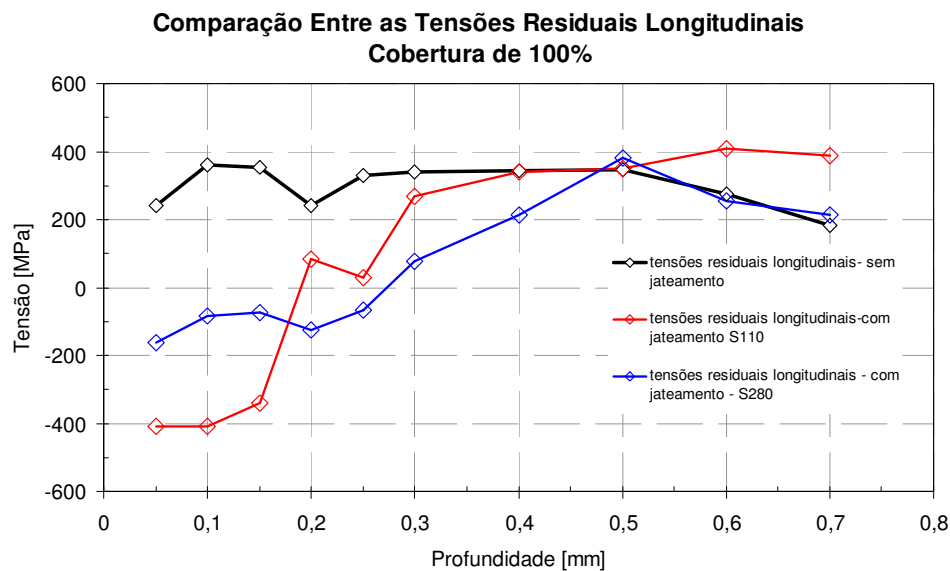


Figura 5. 2 - Gráfico de comparação das tensões residuais longitudinais no material sem jateamento e com jateamento com as esferas S110 e S280.

Para a obtenção das curvas de fadiga, as amostras foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos, como foi mencionado no capítulo 3. Após, foi calculada a tensão máxima ao longo da seção, seguindo a teoria de resistência dos materiais, considerando a seção da viga retangular e analisada desde a superfície tratada até 0.3mm (profundidade máxima encontrada de tensões residuais compressivas), demonstrando a influência das tensões residuais em relação às tensões efetivas.

No caso das amostras sem jateamento são medidas camadas de tensões residuais tratativas, que são deletérias, o que causa aumento nos níveis de tensões efetivas, podendo levar a uma diminuição da vida em fadiga dos arames, e nas amostras com jateamento são medidas camadas de tensões residuais compressivas, que são benéficas, baixando os níveis de tensões efetivas no arame, podendo aumentar a vida em fadiga desta.

Para amostras sem jateamento, os perfis de tensões esperados são mostrados na Figura 5. 3, condição de cobertura 100%.

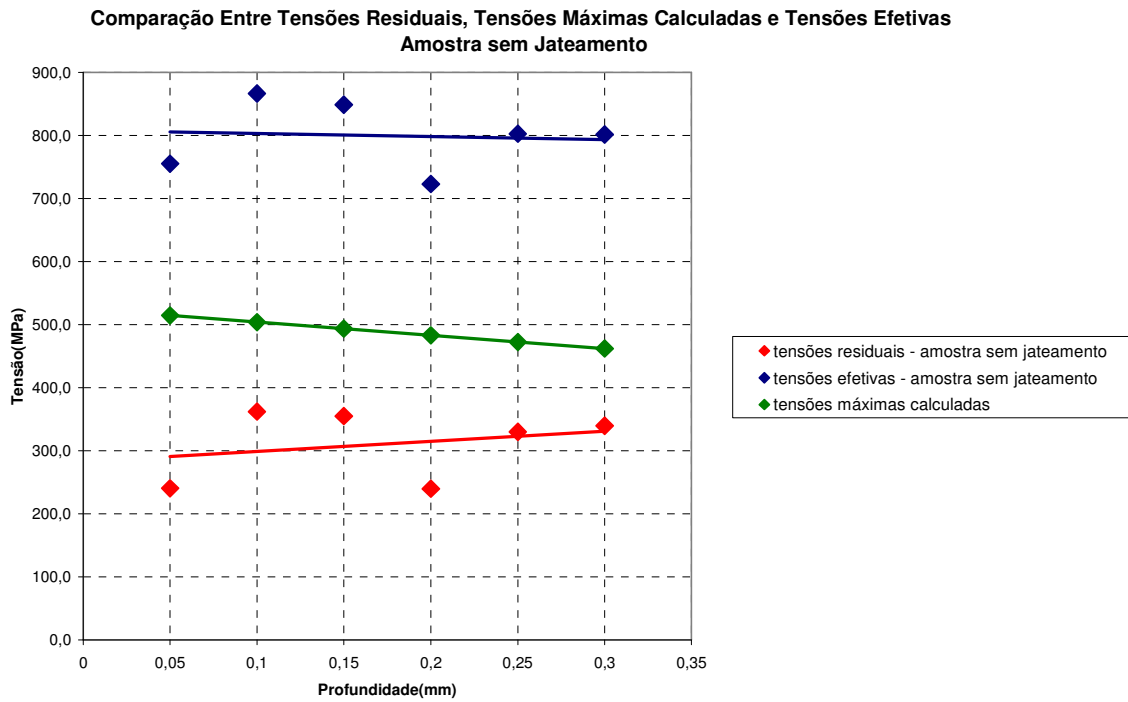


Figura 5. 3 - Gráfico de comparação das tensões residuais, tensões efetivas e tensões máximas calculadas para amostra sem jateamento.

Considerando o material jateado com a esfera S110, a Figura 5. 4 mostra os perfis de tensões.

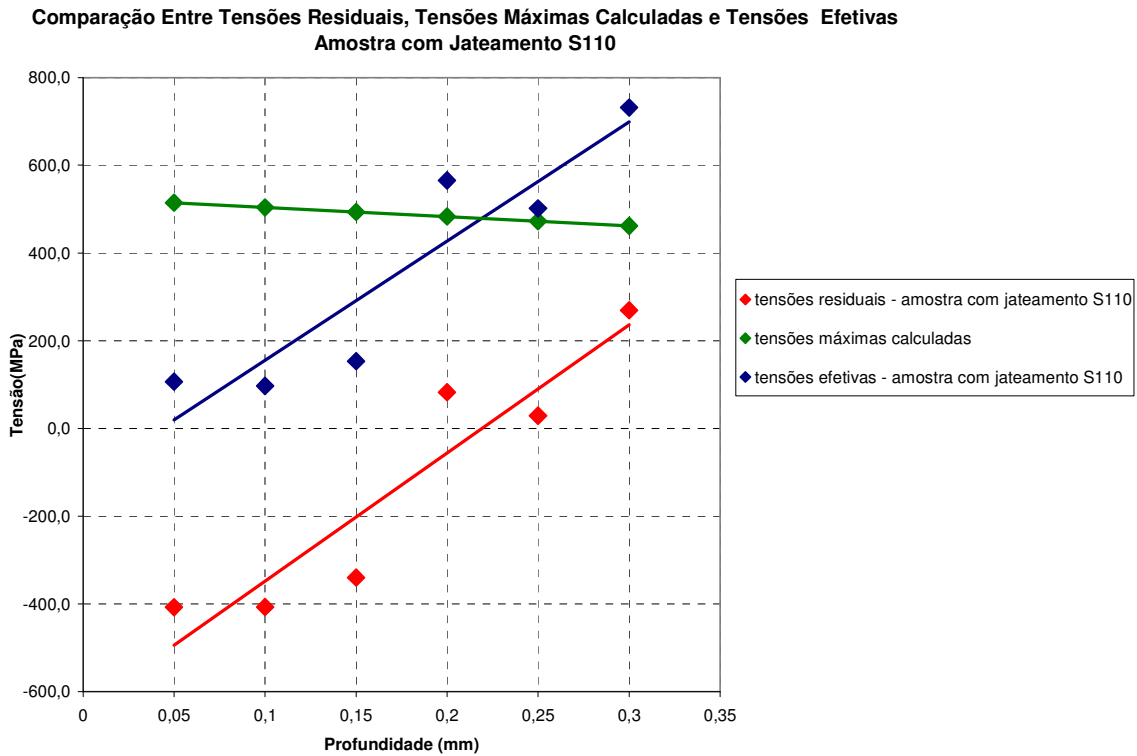


Figura 5. 4 - Gráfico de comparação das tensões residuais, tensões efetivas e tensões máximas calculadas para amostra com jateamento – esfera S110.

É possível observar que para amostras com jateamento S110 (cobertura 100%), os níveis de tensões efetivas superficiais ficam próximos a zero, justificando o melhor desempenho obtido nesta condição. Mas deve ser observado também que esse nível de tensões efetivas cresce rapidamente, e após 0,2mm de profundidade, onde já não há influência de camada de tensões residuais compressivas, o nível de tensões efetivas é consideravelmente alto, podendo assim justificar a presença de trincas de fadiga de origem subsuperficiais observadas no MEV nesta condição de jateamento.

Para o caso das amostras jateadas com a esfera S280 (cobertura 100%) os perfis de tensões esperados são apresentados na Figura 5. 5 abaixo. Com a superposição das tensões residuais sobre as tensões máximas calculadas, há pequena queda no nível de tensões efetivas, o que não influenciou na vida em fadiga dos arames.

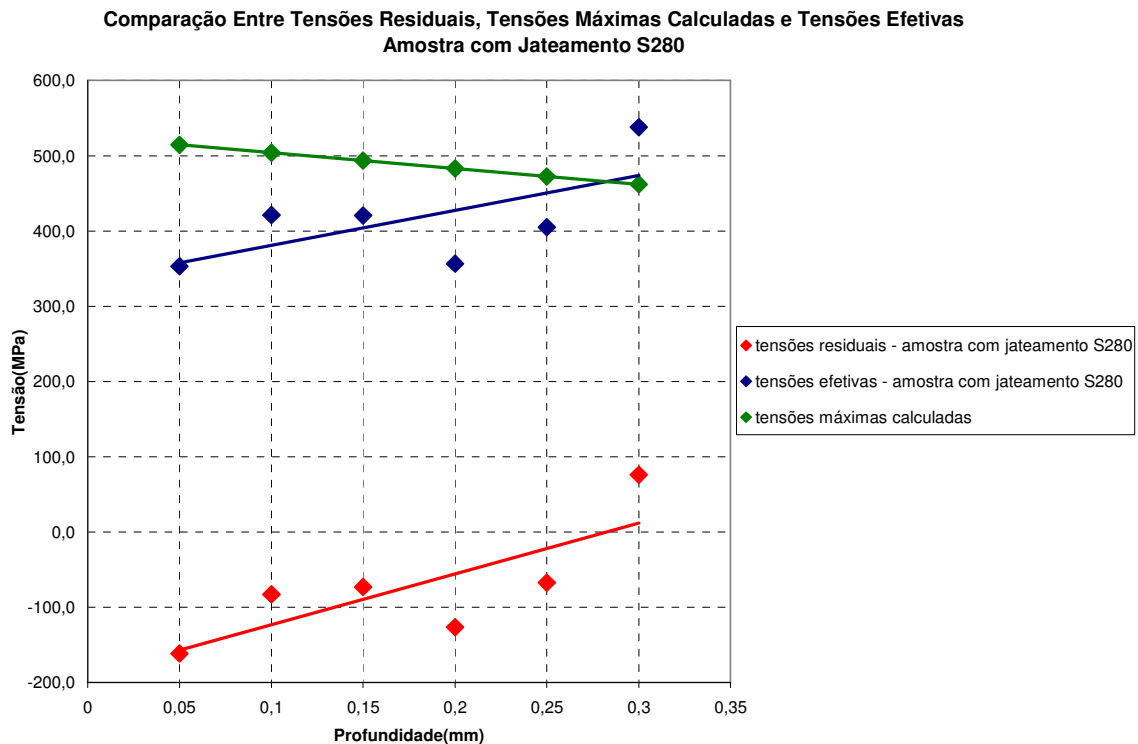


Figura 5. 5 - Gráfico de comparação das tensões residuais, tensões efetivas e tensões máximas calculadas para amostra com jateamento- esfera S280.

Para as demais condições de cobertura, a vida em fadiga não apresentou nenhuma melhora ou até mesmo piorou seu desempenho. Na condição de cobertura 80%, o fato de não se ter total cobertura superficial pode ter comprometido o material, pois as marcas causadas pelas esferas em certas regiões, semelhantes a indentações, podem ter gerado concentradores de tensões, que geraram as trincas de fadiga. Com relação à cobertura de 500%, o fato de que o material ficou exposto ao jateamento por um tempo prolongado causou alguns danos na superfície, conforme análise no MEV, também podendo ter gerado concentradores de tensões.

O jateamento por esferas promove deformação na superfície, elevando ou diminuindo o valor do perfil de rugosidade médio medido, depende do material a ser jateado, do tipo de esfera selecionado, dos parâmetros aplicados (intensidade, cobertura e

outros). Com relação à rugosidade neste caso específico, os valores medidos para o material com jateamento foram maiores.

O perfil de microdureza no material sem jateamento indicou valores altos, em média 420HV(42HRC). Pequenas quedas de dureza são observadas nas superfícies. O perfil de microdureza obtido para o material com jateamento é levemente maior, na média de 440HV(44 HRC).

Para o material com jateamento, observou-se menor número de concentradores de tensões na superfície lateral, sendo que o início das fraturas ocorreram com maior frequência nas superfícies retas dos corpos de prova, ocorrendo também nucleações sub-superficiais.

Considerando que os benefícios do shot peening em componentes que sofrem fadiga vão sendo atenuados com o tempo devido ao relaxamento das tensões residuais compressivas impostas, foi realizado um pequeno estudo sobre o assunto, que se resumiu em medições com amostras após dois milhões de ciclos em fadiga sem romper e está apresentado em anexo, deixando evidente a existência deste fenômeno e a necessidade de maiores estudos, já que na literatura são poucos os trabalhos dedicados a este assunto, além de controversos.



## 6 CONCLUSÕES

O processo de jateamento por esferas se mostrou mais eficaz no material em questão, na condição de cobertura 100%, em especial para a esfera S110, onde se obteve grande ganho na vida em fadiga. Ou seja, a menor esfera e a cobertura 100% proporcionaram o melhor resultado, sendo que as tensões residuais compressivas introduzidas no material retardaram o início das trincas de fadiga, ou ainda, tornaram seu surgimento sub-superficial;

Considerando a condição de cobertura 100%, a camada de tensões residuais compressiva obtida com a esfera S110 é da ordem de 400MPa, em uma profundidade de 0,2mm, sendo importante para o aumento do desempenho do arame. Com a esfera S280 obteve-se uma camada de tensões residuais compressiva da ordem de 160MPa e uma profundidade de 0,28mm, mas que não foi suficiente para promover ganhos na vida em fadiga do arame.

Com a superfície parcialmente jateada (cobertura de 80%) houve diminuição da vida em fadiga, pois a superfície apresenta pontos com tensões residuais trativas (onde não ocorreu impacto com as esferas) e pontos com tensões residuais compressivas (com o impacto das esferas), podendo beneficiar a nucleação de trincas ao se encontrarem;

Considerando a cobertura de 500%, podem ocorrer danos superficiais, tornando-se concentradores de tensões, colaborando para a nucleação de trincas, dessa forma, levando a diminuição na vida em fadiga com relação ao material sem jateamento;

O processo de jateamento por esferas é efetivo para o aumento da vida em fadiga de componentes, mas seus parâmetros devem ser devidamente selecionados e monitorados quando em execução.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Estudar os efeitos de diversas pressões de jateamento, o que implicaria em diferentes velocidades de projeção;

Modificar o ângulo de projeção do bico injetor;

Utilizar da mesma metodologia empregada neste trabalho, porém fazendo uso de materiais com resistências mecânicas diferentes;

Estudar de maneira detalhada os efeitos do relaxamento de tensões residuais; quantificando as tensões residuais no material após diferentes números de ciclos de fadiga.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. 2º ed.,CRC Press,1995.

ASM Metals HandBook - Vol 17 - Nondestructive Evaluation and Quality Control. Estados Unidos, 1996.

ASM Metals Handbook - Vol 19 Fatigue and Fracture. 2ª Edição, Estados Unidos, 1996.

ASTM E837-01, “Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method”, American Society For Testing And Materials Standards, Philadelphia, 2001.

ÁVILA, G.G., Cálculo de Fadiga de Risers Rígidos Através da Mecânica da Fratura. Dissertação, COPPE/UFRJ, 2005.

BEGNINI, M., BERTINI, L., Recent Advances in The Hole Drilling Method for Residual Stress Measurement. Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 7 (2), p. 163–172, 1998.

BEGNINI, M., BERTINI, L., RAFFAELLI, P., Numerical Analysis of Plasticity Effects in the Hole-Drilling Residual Stress Measurements, Journal of Testing and Evaluation, p. 522–529, 1994.

BENEDETTI, M.; FONTANARI, B.R. Hohn ; OSTER, T.T. - Influence of shot peening on bending tooth fatigue limit of case hardened gears - International Journal of Fatigue, 2002.

BERGAMO, R.T. Avaliação da Eficácia do Martelamento para o Alívio de Tensões em Soldas de Aços. Dissertação , Universidade de Santa Catarina, 2006.

BRANCO, C. A., FERNANDES. A.A., CASTRO P.M.S.T. Fadiga de Estruturas Soldadas. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1986.

BRINKSMEIER, E. et al - Residual Stresses Measurement and Causes in Machining Processes, CIRP Annals 31, p. 491–510,1982.

BUCHANAN,Dennis J., JOHN, Reji. Relaxation of shot-peened residual stresses under creep loading. Scripta Materialia 59, p. 286–289, 2008.

BUDYNAS, Nisbett - Shigley's Mechanical Engineering Design, McGraw Hill, eighth edition, 2006

Electronics Incorporated – Shot Peening and Control Technology Site pesquisado em 11/08, <http://www.electronics-inc.com/index.html>.

FATHALLAH, R.; LAAMOURI, A.; SIDHOM, H.; BRAHAM, C. - High cycle fatigue behavior prediction of shot-peened parts International Journal of Fatigue 26, p. 1053–1067, 2004.

FERREIRA, W. G. Desenvolvimento de Ferramentas Computacionais para Análise Estrutural em Fadiga e Geração de Malhas de Elementos Finitos. 168p. Mestrado – Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, 2002.

FRY, T. - A Review of Residual Stress Measurement Methods–A Guide to Technique Selection, National Physical Laboratory, UK, 2001.

FRY, T., Measurement Good Practice Guide No. 52. National Physical Laboratory, UK 2000.

FUCKS, H. O., STEPHENS, R. I.; Metal Fatigue in Engineering. John Wiley & Sons Inc., Nova York, Estados Unidos, 1980.

GRANT, P.V.; LORD, J.D.; WHITEHEAD, P.S. - The Measurement of Residual Stresses by The Incremental Hole Drilling Technique, National Physical Laboratory, 2002

HARADA, Y.; FUKAURA, K.; HAGA, S. - Influence of microshot peening on surface layer characteristics of structural steel, Journal of Materials Processing Technology, p 297-301, 2007.

HAUK, V. - Structural and Residual Stress Analysis by Non-destructive Methods. ELSEVIER, 1997.

HERTZBERG, R. W.; Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. 4ª Edição. John Wiley & Sons, Inc., Nova York, Estados Unidos, 1996.

HOLZAPFEL et al. Stability Relaxation Behaviour of Shot Peening Induced Residual Stresses in AISI 4140 During Bending Fatigue. Institut für Werkstoffkunde, Universität Karlsruhe, 1996.

KOCKELMANN, H. e SCHWARZ, T. Die Bohrlochmethode—ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen. MTB von HBM, 29(2):33–38, 1993.

KORNMEIER, M., et al. - Plasticity Effects on Residual Stress Results Using Different Hole Drilling Evaluation Methods. Residual Stresses—ICRS—6, p. 1188–1195.

LI, J., et al. - An Understanding of the Effect of Residual Stress Induced by Shot Peening on Fatigue Strength, Proc. Fourth Int. Conf. on Residual Stresses, Baltimore, MD, USA - p.1002–1007, 1994.

LU, J. - Handbook of Measurement of Residual Stresses. SEM, Inc. 1996.

RIOS, E.R.DE LOS, A. WALLEY, M.T. Milan and G. Hammersley Int. J. Fatigue Vol. 17, No. 7, pp. 493-499, Elsevier, Science and Technology, Vol. 1, p 3-27, 1987, Alemanha, 1995

MICRO MEASUREMENTS. Tech Note TN – 503 – 1993.

MORDFIN, L. - Measurement of Residual Stresses: Problems and Opportunities in Residual Stress for Designers and Metallurgists, ASM, Proceedings of a Conference Held, USA, p. 189-210, 1980.

OGATA, H.T.S.- Determinação da Influência das Tensões Residuais nas Propriedades de Fadiga em Aço SAE 8620 Processado com Diferentes Profundidades de Camada de Cementação, Dissertação, Curitiba, 2003.

OSK –Kiefer GmbH - Shot Peening and Shot Blasting Services, 1995.

Physique & industrie FRANCE, <http://www.physiqueindustrie.com/index.php>. Acessado em 10/08.

PROCTER, E., BEANEY, E. M., Recent Developments in Center-hole Technique for Residual-stress Measurement. Experimental Techniques 6, 1982, p. 10-15.

RUUD, C.; - Measurement of Residual Stresses, Handbook of Residual Stress and Deformation, ASM, p. 99-117, 2002.

SURESH, S., Fatigue of Materials, Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom, 1998.

SCHAJER, G.S.; TOOTOONIAN, M., A New Rosette Design for More Reliable Hole-Drilling Residual Stress Measurements - Experimental Mechanics, Vol. 37, No. 3, p. 299-306, 1997.

SCHAJER, G., Stress Calculation Error Analysis for Incremental Hole-Drilling Residual Stress Measurements, Journal of Engineering Materials and Technology, Volume 118, p. 120–126, 1996.

SCHAJER, G. S., “Measurement of Non-Uniform Residual Stress Using The Hole Drilling Method. Part I–Stress Calculation Procedures.” Transaction of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 110, p. 338–343, 1988.

SCHUTZ, W. A History of Fatigue. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 54, N° 2263 300p, 1996.

Shot Peening Applications - Metal Improvement Company Inc. 8ª edição, 2001. [www.metalimprovement.com](http://www.metalimprovement.com), site pesquisado em 11/08.

SILVA, Evandro Cardozo da, Análise Numérica do Processo de Conformação de Chapas Metálicas por Jateamento de Esferas, Tese. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2008.

STEPHENS, R.; FATEMI, A.; STEPHENS, R.R.; FUCHS, H.O. - Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons, 2nd edition, 496p, 2000.

SCHULZE et al. Relaxation of Shot peening Induced Residual Stresses in Quenched and Tempered Steel AISI 4140 due to Uniaxial Cyclic Deformation . Institut für Werkstoffkunde, Universität Karlsruhe, 1996.

Tecgal - Tecnologia Galvânica <http://www.tecgal.com/shot.htm>. Acessado em 07/09.

TORRES, M.A.S.; VOORWALD, H.J.C. - An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4130 steel, International Journal of Fatigue 24, p. 877-886, 2002



TORRES, M.A.S., et al., Analysis of the Influence of Shot Peening on the Fatigue Life of a Hard Chromium Electroplated AISI 4340 Steel Underplate. In: ICSP-9, 2005. p 273-279, 2001.

TURNBULL A.; PITTS, J. J.; LORD J. D.; Residual stress relaxation in shot peened high strength low alloy steel. Materials Science and Technology, Vol 24, No 3, 2008.

VANGI, D., ERMINI, M., Plasticity Effects in Residual Stress Measurement by the Hole Drilling Method, Strain, Vol. 36 (2), p. 55–59, 2000.

VISHAY, Micro Measurement, Milling Guide for Residual Stress Measurements, Document Number: 11304, <http://www.vishaypg.com>. Site acessado em 28/01/2010.

WITHERS, P.; BHADSHIA, K. - Residual Stress, Part 1, Material Science and Technology, Vol. 17, p 355–365, 2001.

WITHERS, P.; BHADSHIA, K. -. Residual Stress, Part 2 . Material Science and Technology, Vol. 17, p 366–375, 2001.

WEBSTER, G.A.; EZEILO, A.N. - Residual Stress Distribution and Their Influence on Fatigue Lifetimes. International Journal of Fatigue, Vol. 23, p. 375–383, 2001.

ZHUANG, W. Z., Halford, GARY, R.. Investigation of residual stress relaxation under cyclic load International Journal of Fatigue 23, S31–S37, 2001.

Zirtec - [http://www.zirtec.com.br/html/02-maquinas/05-shot-peening/\\_shot-peening-backup.php](http://www.zirtec.com.br/html/02-maquinas/05-shot-peening/_shot-peening-backup.php), acesso em 11/08.

## ANEXOS

### **I - RELAXAMENTO DE TENSÕES RESIDUAIS**

As tensões residuais compressivas impostas pelo processo de jateamento por esferas podem sofrer relaxamento, quando o componente está em operação. Isso pode ocorrer através de vários fatores[TORRES et al 2005], dependendo não somente do estado de tensão residual presente, mas também das características das condições de carregamento, do meio ambiente e da geometria do material. A exposição a altas temperaturas e o histórico de deformações podem acelerar o processo [BUCHANAN 2008]. Neste trabalho, considera-se apenas o relaxamento por carregamentos cíclicos.

Na prática, a dificuldade de medição desse relaxamento de tensões residuais impede a consideração deste fator na estimativa da vida em fadiga remanescente dos componentes, e muitas vezes, esse relaxamento pode ocorrer já nos primeiros ciclos de carregamento [ZHUANG 2001]. Carregamentos cíclicos de baixa amplitude de tensão são os mais comuns, mas na prática, pode-se ter carregamentos complexos, com grande variação de amplitudes.

Em estudo com aço SAE 4140 [HOLZAPFEL et al 1996] o material foi submetido à fadiga, em diferentes níveis de tensões: 300N/mm<sup>2</sup>, 400 N/mm<sup>2</sup> e 500 N/mm<sup>2</sup>, e em seguida foram medidos os perfis de tensões residuais remanescentes. O resultado é apresentado na Figura I. 1. Os ensaios foram levados até a ruptura ou até 10<sup>6</sup> ciclos.

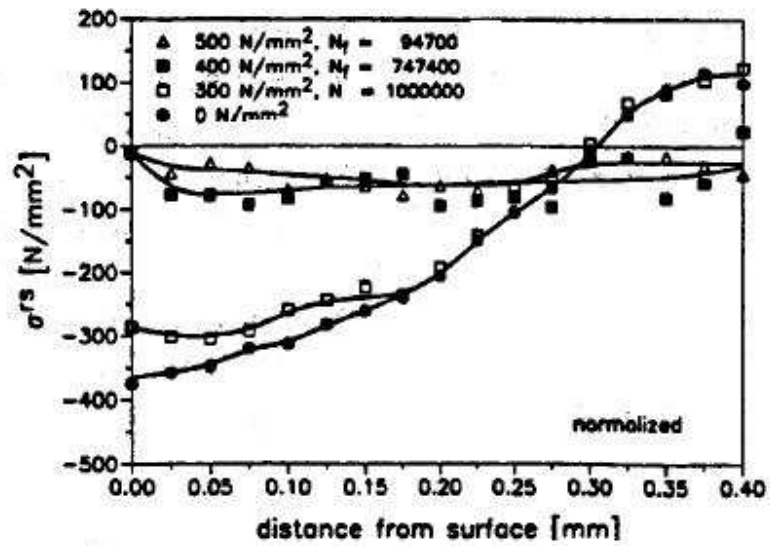


Figura I. 1– Perfil de tensões residuais após ensaio. [HOLZAPFEL et al 1996]

Para aço alta resistência baixa liga [TURNBULL 2008], também submetido ao jateamento por esferas previamente, os autores realizaram uma série de ensaios em uma máquina servo-hidráulica Instron, recebendo diferentes carregamentos. Inicialmente, após 10000 ciclos, o perfil de tensões residuais foi medido pelos métodos de Raio-X e Hole Drilling, conforme a Figura I. 2 abaixo.

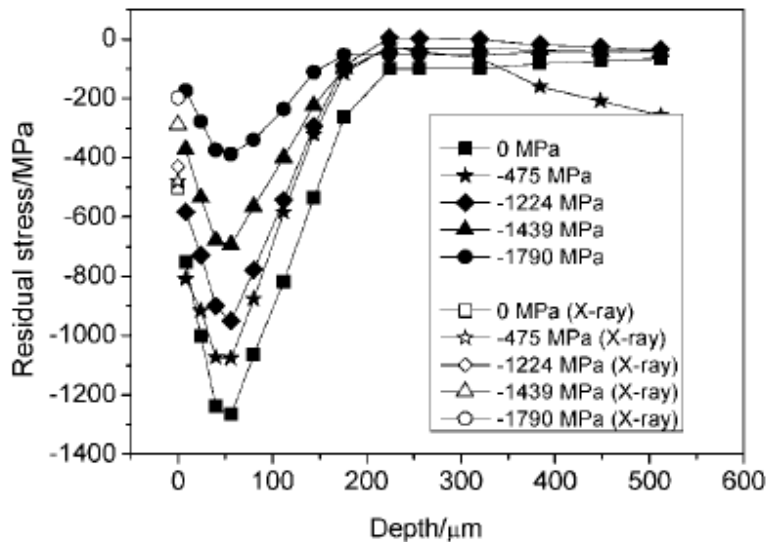


Figura I. 2 – Perfil de tensões residuais. [TURNBULL 2008]

Testes similares foram realizados também após amostras serem submetidas a 130000 ciclos, com diferentes carregamentos (Figura I. 3).

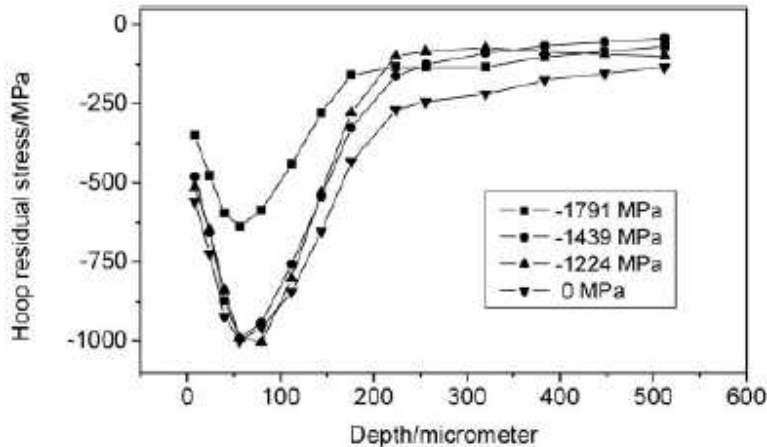


Figura I. 3 – Perfil de tensões residuais após 130000 ciclos [TURNBULL 2008].

Cabe salientar que, em geral, os trabalhos publicados são baseados em carregamentos com amplitudes constantes, deixando uma lacuna nas pesquisas com relação a carregamentos com amplitudes de tensões variáveis para um mesmo material. Por isso este assunto de relaxamento de tensões residuais não possui ainda evidências conclusivas.

Para materiais com amolecimento cíclico, progressivo relaxamento de tensões residuais com o aumento do número de ciclos é registrado com um grande número de ciclos de carregamento. Em contraste, materiais que sofrem encruamento considerável, mostram grande relaxamento das tensões residuais ainda nos primeiros ciclos de carregamento [TURNBULL 2008].

Também para o aço SAE 4140 (temperado e revenido), em barras de 25mm de diâmetro, foram realizados testes em diversas amplitudes de tensões [SCHULZE et al 1996], para amostras com jateamento (parâmetros não informados). Medições de tensões residuais via difração de Raio-X foi utilizado no trabalho. Os resultados estão apresentados na Figura I. 4.

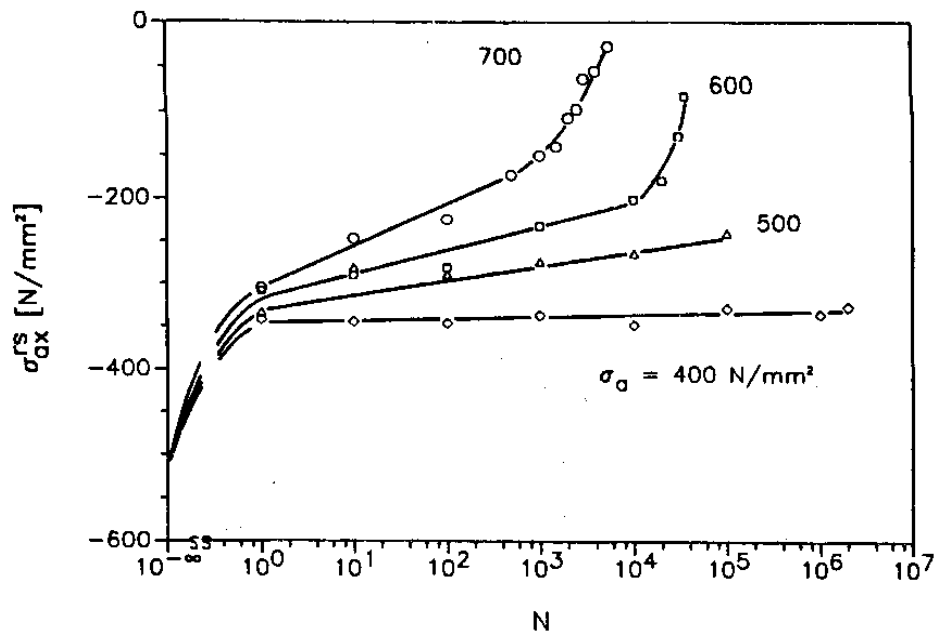


Figura I. 4 – Perfil de tensões residuais em função de diferentes amplitudes de tensões [SCHULZE et al 1996]

Buscando explicações sobre o relaxamento de tensões residuais [ZHUANG 2001] no aço SAE 5150 os autores submeteram o material ao jateamento por esferas e este foi posteriormente ensaiado. O objetivo real deste estudo foi desenvolver um modelo analítico para estimar o problema em diversos parâmetros de carregamento. Para tal, os pesquisadores basearam-se no chamado efeito Bauschinger (Figura I. 5).

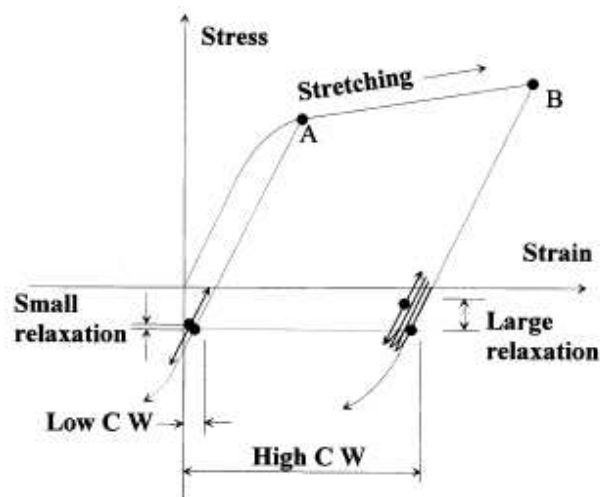


Figura I. 5 – Efeito Bauschinger. [ZHUANG 2001]

Quando um material é deformado plasticamente e posteriormente descarregado, surgem tensões residuais ao nível microscópico, originadas essencialmente pelos estados diferentes de tensão que se criam entre os grãos do material. Se o mesmo material voltar a ser carregado em sentido contrário ao inicial, verifica-se que as referidas tensões residuais influenciam a deformação plástica, em particular fazem com que a tensão limite de elasticidade seja inferior. Este fenômeno ocorre em metais policristalinos sempre que se aplicam solicitações sucessivas em sentido reverso.

Considerando-se que o material em estudo possui tensões residuais compressivas, oriundas do processo de jateamento, há indícios de relaxamento destas tensões após ensaios de fadiga nas amostras. Se somarmos as tensões aplicadas durante o ensaio com as residuais compressivas, verifica-se a sobreposição das tensões na camada compressiva, em torno de 0,2~0,3 mm e, abaixo desta, sobram apenas as tensões trativas aplicadas.

Após submeter ao ensaio de fadiga uma amostra chegou aos dois milhões de ciclos sem romper. Parado o ensaio, foi realizada a medição de tensões residuais e obteve-se os valores abaixo (Figura I. 6 –) sendo que antes do ensaio, possuía seus valores de tensão longitudinal em torno de -400MPa(compressiva) na superfície.

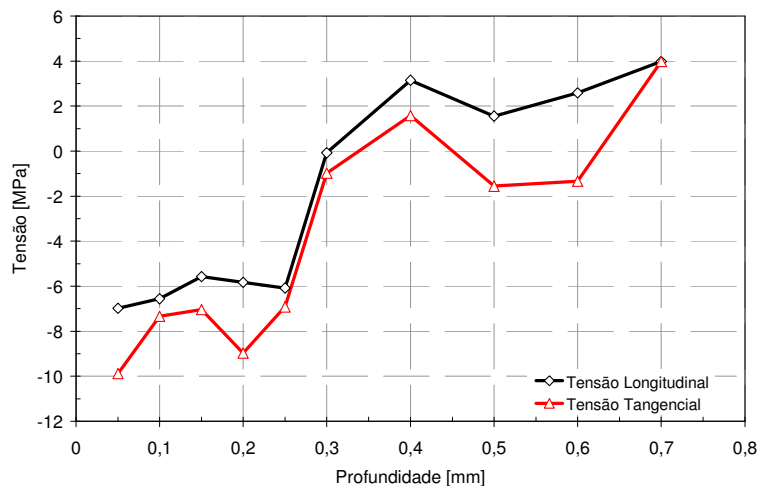


Figura I. 6 – Tensões residuais longitudinais e tangenciais após dois milhões de ciclos.

Este é um assunto que deve ser estudado com maior aprofundamento, pois na literatura os trabalhos dedicados à quantificação deste relaxamento de tensões, são poucos,

além de controversos, embora seja fácil encontrar a afirmação que este fenômeno existe e deve ser considerado.