# UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

## ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
## INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
## INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

# EFEITO DO JATEAMENTO A QUENTE NA VIDA EM FADIGA DE UM AÇO MOLA SAE 5160

MARCOS CESAR RUY

Dissertação apresentada à Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Waldek Wladimir Bose Filho

São Carlos

EESC-USP Biblioteca Campus de S. Carlos

2003

Ruy, Marcos Cesar

"Efeito do jateamento a quente na vida em fadiga de um aço mola SAE 5160"
Marcos César Ruy – São Carlos, 2003

Dissertação (Mestrado) – Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais
da Universidade de São Paulo, 2003 - Páginas: 89

Orientador: Prof. Dr. Waldek Wladimir Bose Filho

1. Jateamento a quente; 2. Fadiga; 3. Aço mola.

I. Título

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
**Ciência e Engenharia de Materiais**
Caixa Postal 369 – CEP 13560-970 - São Carlos-SP – Brasil
*Tel: (0xx16) 2739589/ Fax: (0xx16) 2739777*
*e-mail: wladerez@if.sc.usp.br*

**MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARCOS CESAR RUY, APRESENTADA À ÁREA INTERUNIDADES CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 14-03-2003.**

**COMISSÃO JULGADORA:**

---

**Prof. Dr. Waldek Wladimir Bose Júnior ( Presidente) – EESC-USP**

---

**Prof. Dr. Dirceu Spinelli – EESC-USP**

---

**Prof. Dr. Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez – UNESP**

# DEDICATÓRIA

***Aos meus avós.***

***Aos meus pais:***

***Benedito e Luiza***

***À minha esposa Miriam***

***e meus filhos:***

***Matheus e Mariana***

# AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Waldek Wladimir Bose Filho pela amizade, conhecimentos transmitidos e orientação deste trabalho.

Ao Professor Dr. Dirceu Spinelli, pela amizade, conhecimentos transmitidos.

A todos os colegas, funcionários e professores do Departamento de Engenharia de Materiais da EESC - USP, pela amizade e colaboração na confecção deste trabalho.

À Fundação Municipal de Ensino de Piracicaba pelo apoio de todos colegas, técnicos, professores, alunos e diretores e principalmente ao professor Sady Fidelis Previtalli pelo incentivo e amizade.

À General Motors do Brasil e ao Eng. José Carlos dos Santos pelo apoio e colaboração.

À Rassini – NHK Autopeças S/A, que através dos Srs. Takashi Yamamoto e Jaime Milan Ventura, demais técnicos e funcionários principalmente o Sr. Almir Santana, que tornaram possível o desenvolvimento deste trabalho.

À DaimlerChrysler LTDA e ao Sr. Roque Gonçalves, Sr. Robson Garcia, demais técnicos e funcionários do Centro Tecnológico pelo apoio e pela realização da medição da tensão residual nos corpos de prova.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ..... i

LISTA DE TABELAS ..... v

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS ..... vi

RESUMO ..... vii

*ABSTRACT* ..... viii

1 – INTRODUÇÃO ..... 1

1.1. Objetivo ..... 4

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 5

2.1. Efeitos da Tensão Residual ..... 5

2.1.1. O Efeito da Tensão Residual na Resistência Mecânica dos Materiais ..... 5

2.1.2. Influência da Tensão Residual na Resistência à Fadiga (fase de nucleação e iniciação da trinca) ..... 6

2.1.3. A influência da tensão residual na propagação de trincas na fratura frágil ..... 8

2.1.4. Influência da Tensão Residual na Resistência a Tração, Fricção, Desgaste e na Estabilidade Dimensional ..... 9

2.2. Processo de Jateamento por Granalhas ..... 10

2.2.1. Ensaio Método de Almen (*Almen Test*) ..... 15

2.3. Fadiga dos Metais ..... 21

2.3.1. Tensões ..... 22

2.3.2. Curva S-N ($\sigma$-N) ou Curva de Wöhler ..... 24

2.3.3. Propagação das Trincas ..... 27

2.3.4. Influência da superfície na fadiga ..... 31

3. MATERIAL E MÉTODOS ..... 33

3.1. Material ..... 33

3.2. Tratamento Térmico ..... 34

3.3. Tratamento Superficial de Jateamento por Granalhas ..... 35

3.4. Rugosidade Superficial ..... 38

3.5. Tensão Residual ..... 39
3.6. Ensaio de Fadiga ..... 43
3.7. Análise Fractográfica ..... 47
3.8. Análise Micrográfica ..... 47
3.9. Análise de Microdureza ..... 48
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 49
4.1. Medidas de Temperatura ..... 49
4.2. Rugosidade dos Corpos de Prova ..... 50
4.3. Tensão Residual ..... 53
4.4. Análise Fractográfica ..... 55
4.4.1 Macrografia ..... 55
4.4.2. Análise em Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.).. 58
4.5. Análise Metalográfica e Dureza ..... 62
4.6. Fadiga ..... 65
5. CONCLUSÕES ..... 74
6. BIBLIOGRAFIA ..... 77

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Superposição da tensão residual e da tensão de serviço em uma barra sujeita a flexão..... 5

Figura 2.2 – Efeito da tensão residual na desempenho dos materiais..... 6

Figura 2.3 – Efeito do tratamento de alívio de tensão residual na velocidade da trinca na ZTA, na montagem com solda de topo em um aço E36Z..... 8

Figura 2.4 - Esquema da realização do jateamento por granalhas..... 10

Figura 2.5 - Formação da cavidade devido ao impacto da espera do jateamento..... 11

Figura 2.6 – Formação das cavidades pelo impacto das esferas..... 11

Figura 2.7 – Exemplo do perfil de tensão residual criado pelo processo de jateamento..... 12

Figura 2.8 – Exemplos de tamanho das esferas especificados pela S.A.E 13

Figura 2.9 – Tipos de formas de Granalhas de aço..... 14

Figura 2.10 – Plaqueta ou lâmina tipo "A" do Método de Almen, antes e depois do Jateamento..... 15

Figura 2.11 – Esquema ilustrando as dimensões das plaquetas tipo "N", "A" e "C"..... 16

Figura 2.12 – Esquema ilustrando o procedimento para medição da flecha..... 17

Figura 2.13 – Medidor de ALMEN ou da flecha..... 17

Figura 2.14 – Bloco de Suporte das plaquetas, ..... 18

Figura 2.15 – Gráfico Intensidade x Tempo de operação..... 19

Figura 2.16 – Cobertura de Jateamento (a) parcial e (b) total..... 19

Figura 2.17 – Tensões geradas por esforços de flexão..... 20

Figura 2.18 – Gráfico superpondo as tensões residuais induzidas pelo jateamento e as tensões por flexão..... 20

Figura 2.19 – Ciclos regulares de tensões..... 22

Figura 2.20 – Exemplos práticos de algumas curvas S-N..... 26

Figura 2.21 – Esquema dos estágios 1 e 2I de propagação de trincas..... 29

Figura 2.22 – Esquema do mecanismo de propagação de trinca de fadiga estágio 2..... 30

Figura 2.23 – Perfil do parâmetro de rugosidade Ra..... 32

Figura 2.24 – Perfil do parâmetro de rugosidade Rz..... 32

Figura 3.1 – Esquema do corpo de prova para ensaio de fadiga..... 33

Figura 3.2 – Dispositivo automático de movimentação da lâmina no processo de resfriamento..... 34

Figura 3.3 – Vista geral do forno para revenimento..... 35

Figura 3.4 – Forno mufla com grupo de lâminas antes de ir para o jateamento..... 35

Figura 3.5 – Equipamento de jateamento..... 36

Figura 3.6 – Medidor do parâmetro ALMEN (flecha) e dispositivo de fixação da lamina padrão..... 38

Figura 3.7 – (a) Calibração do Rugosímetro Mitutoyo e (b) Execução da medida da rugosidade na lâmina..... 39

Figura 3.8 – Equipamento para medida da tensão residual..... 40

Figura 3.9 – Equipamento realizando polimento eletrolítico com profundidade de 50μm..... 40

Figura 3.10 – Detalhe do polimento eletrolítico..... 41

Figura 3.11 – Localização dos pontos para a medida da tensão residual... 41

Figura 3.12 – Posicionamento do Ponto 1 na máquina de Raio X, para a medição da tensão residual..... 42

Figura 3.13 – Realização da medida da tensão residual introduzida pelo processo de jateamento..... 43

Figura 3.14 – Ensaio de fadiga em duas lâminas..... 44

Figura 3.15 – Posição das Lâminas na máquina de ensaio ..... 44

Figura 3.16 – Esquema do ensaio de fadiga..... 45

Figura 3.17 – Equipamento para ensaio de fadiga. Seta indica o marcador do número de ciclos..... 46

Figura 3.18 – Esquema representando a parte do corpo de prova onde ocorreu a ruptura e representando também outros dois cortes para retirada das amostras..... 47

Figura 4.1 – Gráfico com a variação das temperaturas inicial e final no processo de jateamento..... 49

Figura 4.2 – Gráfico com valores médios da Rugosidade Superficial, parâmetro Ra, em função da temperatura do jateamento ..... 52

Figura 4.3 – Gráfico com valores médios da Rugosidade Superficial, parâmetro Rz, em função da temperatura do jateamento..... 52

Figura 4.4. – Valores médios da tensão residual em função da temperatura de jateamento..... 54

Figura 4.5 – Posicionamento no centro da lâmina. A seta amarela aponta para o local do sítio de nucleação da trinca de um corpo de prova jateado na temperatura ambiente, condição A ..... 56

Figura 4.6 – Posicionamento no centro da lâmina. A seta amarela aponta para o local do sítio de nucleação da trinca de um corpo de prova jateado na temperatura ambiente, condição C ..... 56

Figura 4.7 – A seta amarela indica o local do sítio de nucleação da trinca, jateado na temperatura de 200°C, condição E..... 57

Figura 4.8 – As setas indicam os dois sítios de nucleação de duas trincas que se uniram e formaram a trinca principal. Corpo de prova jateado na temperatura de 150°C, condição de jateamento D..... 57

Figura 4.9 – Área da nucleação da trinca de fadiga no corpo de prova jateado na temperatura ambiente, condição B..... 59

Figura 4.10 – Detalhe do sítio de nucleação apresentado na figura anterior, mostrando que a trinca foi iniciada a partir de uma depressão causada pelo processo de jateamento..... 59

Figura 4.11 – Detalhe da região de propagação da trinca. As setas indicam a formação de estrias de fadiga. Condição B, jateamento à temperatura ambiente..... 60

Figura 4.12 – Área da nucleação da trinca por fadiga na condição E de jateamento, à temperatura de 200°C..... 61

Figura 4.13 – Detalhe da figura anterior, mostrando os vários sítios de nucleação das trincas..... 61

Figura 4.14 – Detalhe da microestrutura do corpo de prova na condição A de jateamento, na temperatura de 25°C e dureza 528HV ($d_{Brinell}$~2,75mm). Aumento: (a) 500x e (b) 1000x..... 62

Figura 4.15 – Detalhe da microestrutura do corpo de prova na condição B de jateamento, na temperatura de 25°C e dureza 491HV ($d_B$~2,85). (a) Aumento: (a) 500x e (b) 1000x..... 63

Figura 4.16 – Detalhe da microestrutura do corpo de prova na condição C de jateamento, na temperatura de 100°C e dureza 491HV ($d_B$~2,85). Aumento: (a) 500x e (b) 1000x..... 63

Figura 4.17 – Detalhe da microestrutura do corpo de prova na condição E de jateamento, na temperatura de 200°C e dureza 491HV ($d_B$~2,85). Aumento: (a) 500x e (b) 1000x..... 64

Figura 4.18 – Detalhe da microestrutura do corpo de prova na condição G de jateamento, na temperatura de 300°C e dureza 491HV ($d_B$~2,85). Aumento: (a) 500x e (b) 1000x..... 64

Figura 4.19 – Ciclos para falhar em função da temperatura de jateamento..... 69

Figura 4.20 – Gráfico com valores médios dos ciclos para fratura em cada condição em função da temperatura de jateamento..... 70

Figura 4.21 – Detalhe das impressões de Microdureza Knoop com carga de 100g na temperatura de jateamento de (a) 100°C, (b) 200°C e (c) 300°C..... 72

Figura 4.22 – Gráfico representando os valores médios da microdureza Knoop em cada faixa de medida, conforme a temperatura de jateamento. 73

# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Efeito das condições de têmpera e tensão residual na resistência à fadiga ..... 7

Tabela 2.2 – Efeito da tensão residual na resistência à fadiga de uma junta E690 soldada ..... 7

Tabela 2.3 – Especificação S.A.E para tamanhos de granalha esférica (Souza, 1980) ..... 14

Tabela 3.1 – Composição química nominal do aço SAE 5160 ..... 33

Tabela 4.1. – Gráfico com a variação das temperaturas inicial e final no processo de jateamento ..... 49

Tabela 4.2 – Valores médios da rugosidade em função das condições do processo de jateamento ..... 50

Tabela 4.3 – Medida dos parâmetros de rugosidade em função das condições do processo de jateamento ..... 51

Tabela 4.4. – Valores das Medidas de tensão residual ..... 53

Tabela 4.5. – Média dos valores da Medição da tensão residual, por temperatura de jateamento ..... 54

Tabela 4.6 – Medida da dureza Vickers em cinco pontos diferentes no corpo de prova ..... 65

Tabela 4.7 – Dados do ensaio de fadiga ..... 68

Tabela 4.8 – Média e desvio padrão do número de ciclos dos corpos de prova para cada condição de ensaio ..... 69

Tabela 4.9 – Média dos resultados de microdureza Knoop, carga de 100g ..... 72

# RESUMO

Ruy, Marcos C. EFEITO DO JATEAMENTO A QUENTE NA VIDA EM FADIGA DE UM AÇO MOLA SAE 5160. São Carlos, 2003. 80p. Dissertação (Mestrado) - Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo.

O processo de jateamento com granalhas é um tratamento superficial, muito utilizado em peças, com o intuito de melhorar as propriedades de resistência à fadiga. A deformação controlada do impacto das esferas introduz tensões residuais compressivas na camada superficial do material. Geralmente, este processo é executado na temperatura ambiente. Existem poucos estudos exploratórios de se executar este tratamento superficial em temperaturas acima da ambiente, para a promoção de um aumento na vida em fadiga causada por uma maior deformação plástica. Este trabalho teve como principal objetivo o estudo do efeito do jateamento com granalhas, executados em temperaturas fora da ambiente, no comportamento em fadiga de lâminas fabricadas de aço mola SAE 5160, utilizado pela indústria automobilística. Foram realizados ensaios de fadiga por flexão em três pontos em corpos de prova no formato do componente original. Estas amostras foram jateadas nas temperaturas de 25, 100, 150, 200, 250 e 300°C. Os resultados deste trabalho permitiram a obtenção de algumas conclusões importantes quanto ao processo de jateamento que deverão influir diretamente no processo de fabricação destas lâminas e possivelmente de outros componentes mecânicos. Com o aumento da temperatura, ocorreu primeiramente um acréscimo no nível das tensões residuais na faixa de temperatura de 25 °C a 100 °C, passando a decrescer continuadamente até a temperatura de 300 °C e um aumento crescente da rugosidade superficial. O jateamento a 200 °C promoveu um melhor desempenho, pois executado nesta temperatura, proporcionou a melhor associação de tensão residual introduzida e encruamento, resultando em, um acréscimo de aproximadamente 10 vezes na vida em fadiga.

Palavras-chave: jateamento; jateamento a quente; fadiga; tensão residual; aço mola.

# ABSTRACT

Ruy, Marcos C. *EFFECT OF SHOT PEENING AT HIGH TEMPERATURE IN A SAE 5160 SPRING STEEL.* São Carlos, 2003. 80p. Dissertação (Mestrado) - Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo.

Shot peening is a surface treatment commonly used in parts with the aim of improving fatigue properties. The controlled plastic deformation caused by the impact of the shots introduces compressive residual stresses on the surface layer of the material. Normally, this process is performed at room temperature, however a few studies propose to perform this surface treatment above room temperature in order to increase the fatigue strength due to the associated higher plastic deformation. The aim of this work was to study the effects of shot peening process above room temperature on the fatigue properties of a SAE 5160 leaf spring steel used by the automotive industry. Three point bending fatigue tests were performed in test pieces with the same geometry of the original component. Test pieces were peened at 25, 100, 150, 200, 250 and 300°C. Increasing temperature, it was observed an increase in surface roughness (i.e. plastic deformation). However, residual stress values increase up to 100°C and decrease continuously above this temperature. Fatigue strength was the highest for parts peened at 200°C possibly due to an optimized association of residual stress and hardening effects caused by the plastic deformation. These results may directly affect the fabrication process of spring leaves and other mechanical parts.

**Keywords:** *Shot peening, high temperature, fatigue, residual stress, spring steel.*

# 1. INTRODUÇÃO

Dentre as molas utilizadas nos sistemas de suspensão dos veículos, as molas em feixes de lâminas são as mais antigas e surgiram para melhorar o conforto das carroças e veículos de transporte de passageiros, tais como diligências, charretes, etc.

Nas suspensões com molas helicoidais, a geometria do conjunto estrutural é definida através de vários componentes, como braços, tirantes, articulações e amortecedores. Nas suspensões com molas em feixes de lâminas, a função geométrica e estrutural é dada pelos feixes. Além de posicionar os eixos, estes feixes definem como irão se movimentar em relação ao veículo, determinando seu desempenho em movimento, sob as mais variadas condições de carregamento.

Geralmente os feixes de lâminas são usados em veículos pesados de carga ou de passageiros, tais como caminhões e ônibus. Apesar de alguns automóveis e caminhonetes ainda em produção usarem feixes em suas suspensões traseiras, seu uso em veículos de pequeno porte como automóveis, caminhonetes, furgões, peruas, etc. tende a desaparecer. Sua substituição ocorre por meio de molas helicoidais, lâminas parabólicas e suspensões hidropneumáticas mais sofisticadas ou suspensões ativas com controle eletrônico de suas características de desempenho.

Os processos de fabricação dos produtos acima são similares e possuem o seguinte fluxo de produção:

CORTE: Corte das barras chatas por cisalhamento.

FURAÇÃO: Furação a frio ou a quente por puncionamento.

FORJARIA: Conformação a quente das pontas das barras, sendo que para o aquecimento são usadas forjas contínuas.

LAMINAÇÃO: Visando produzir barras de perfil trapezoidal ou parabólico. É executado em laminador parabólico com microprocessadores que controlam desde a temperatura da lâmina até o número de passes de modo a assegurar a geometria do produto.

JATEAMENTO COM GRANALHAS: Este processo atua somente na superfície das barras no qual é submetido a tensões de tração com pré-tensionamento denominado de jateamento tensionado, "*STRESS PEENING*" ou não "*SHOT PEENING*". Aplica-se um ou outro dependendo do nível de tensão máxima exigida no projeto, visando a introdução de tensões compressivas que irão reduzir ou anular as tensões trativas submetidas ao feixe quando em funcionamento no veículo carregado, aumentando a vida em fadiga.

PINTURA: Trata-se de proteção anticorrosiva através de tinta ou óleo de proteção, visando evitar a corrosão das lâminas, o que compromete a vida útil e o aspecto visual do feixe e conseqüentemente do veículo.

MONTAGEM: Consiste no agrupamento das lâminas através de um pino de centro formando o feixe e a montagem de acessórios tais como buchas, braçadeiras, etc.

PRÉ-CARGA: O feixe é submetido a um carregamento em flexão, até que ocorra uma deformação permanente, com conseqüentes ajustes da altura da mola e encruamento das barras, o que aumenta o limite de escoamento do material e conseqüentemente a região elástica da mola, levando assim, a uma maior vida útil.

ENSAIO DE CARREGAMENTO: Visa a verificação da deflexão sofrida pelo feixe, ao ser submetido à determinadas cargas.

As lâminas que compõe o feixe de molas, recebem um processo de jateamento com granalhas de aço na face que será tracionada. Este processo visa introduzir uma região de tensão compressiva no material, com o intuito de dificultar a nucleação e a propagação de trincas, no sentido de aumentar a vida em fadiga do componente.

Os feixes de molas são produzidos com aços especiais, temperados e revenidos. Após o tratamento de revenimento, apresentam dureza entre 491HV ($d_{Brinell}$ = 2,85mm) e 528HV ($d_{Brinell}$ = 2,75mm). Em seguida, são submetidos ao processo superficial de jateamento por granalhas. Na indústria, para facilitar o controle, este é realizado através da medição do diâmetro de impressão Brinell ($d_B$ ou $d_{Brinell}$) e quanto menor o diâmetro, maior é a dureza da lâmina.

## 1.1. OBJETIVO

Em geral, o processo superficial de jateamento com granalhas é executado à temperatura ambiente. Existem estudos exploratórios de execução deste processo em temperaturas acima da ambiente com o intuito de aumentar a vida em fadiga. Este processo quando executado fora da temperatura ambiente pode acarretar um menor nível de tensões residuais e uma maior deformação plástica superficial dependendo da temperatura. No presente estudo, o jateamento com granalhas foi realizado nas temperaturas de 25°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C e 300°C, tendo como objetivo o estudo da influência das condições de tratamento superficial de jateamento com granalhas, sob várias temperaturas de jateamento, no processo de fabricação de molas, visando o aumento na vida em fadiga do componente.

# 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

## 2.1. EFEITOS DA TENSÃO RESIDUAL.

### 2.1.1. O Efeito da Tensão Residual na Resistência Mecânica dos Materiais.

Quando um componente é sujeito a um campo de tensão residual elástico caracterizado por um tensor $\sigma_r$ que é superposto por um campo de tensão de serviço definido por um tensor $\sigma_s$, a tensão real a que o componente está submetido é caracterizada pela soma dos dois tensores $\sigma_r + \sigma_s$, conforme mostra a Figura 2.1.

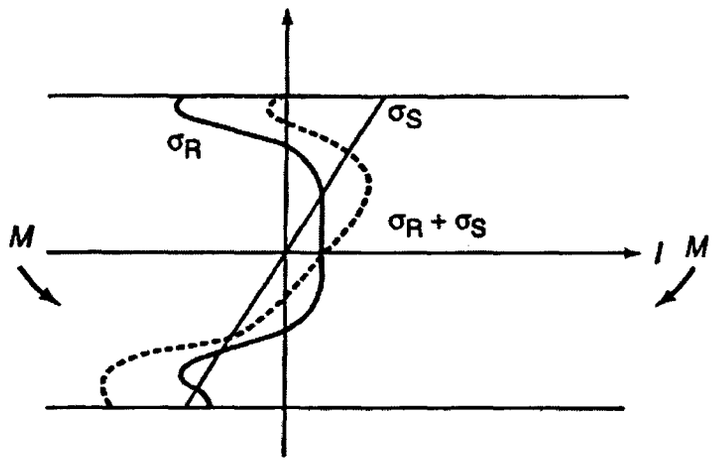



Figura 2.1 – Superposição da tensão residual e da tensão de serviço em uma barra sujeita a flexão (Totten et al., 2002).

Se a tensão de serviço for trativa e à tensão residual for de mesmo sinal, esta será adicionada a tensão de serviço e o componente será localmente sobrecarregado devido esta tensão residual. Se ocorrer ao contrário, como por exemplo no jateamento de granalhas, que introduz tensão residual compressiva na superfície jateada, o componente sofrerá localmente um relaxamento da tensão de serviço e o resultado final será um aumento no desempenho mecânico deste componente.

A Figura 2.2 mostra a influência das tensões residuais nas propriedades dos materiais.

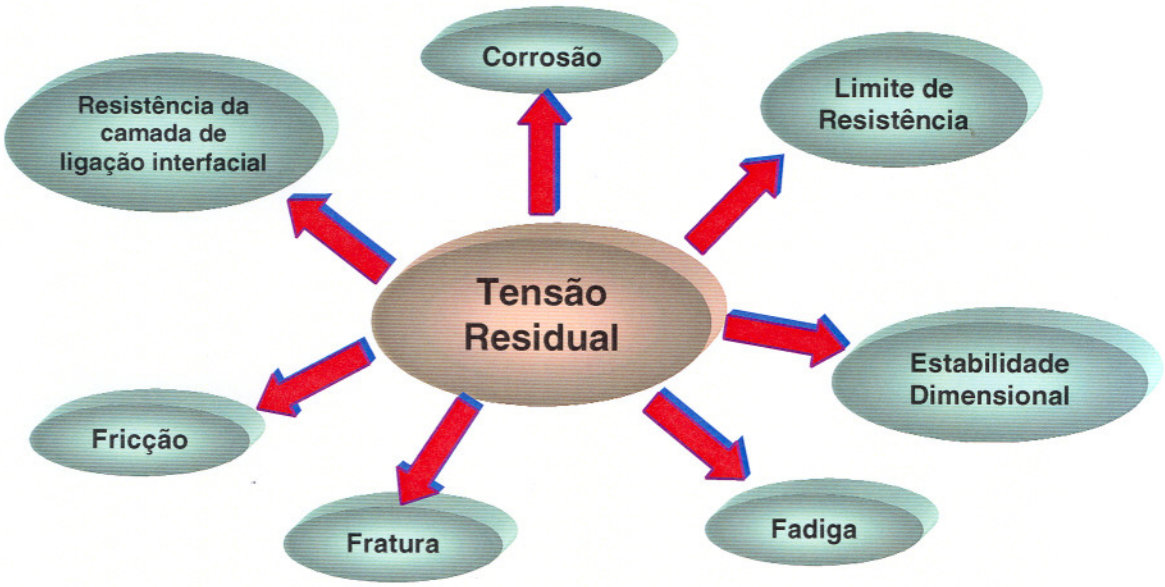



Figura 2.2 – Efeito da tensão residual no desempenho dos materiais (Totten et al., 2002).

### 2.1.2. Influência da Tensão Residual na Resistência à Fadiga

Tensões residuais apresentam um importante papel na resistência à fadiga dos materiais. Ela pode ser considerada como sendo uma tensão média ou estática superposta a um carregamento cíclico. Quando a tensão média, $S_m$, aumenta a vida em fadiga diminui.

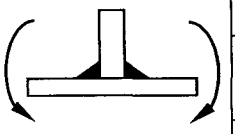
O tratamento térmico de têmpera por indução introduz altas tensões residuais compressivas na camada endurecida, resultante de um aumento do volume devido a transformação de fases de austenítica, cúbica de face centrada, para martensítica, tetragonal de corpo centrado. Como exemplo do efeito deste tipo de tratamento na vida em fadiga, a Tabela 2.1 apresenta os resultados dos ensaios de fadiga por flexão de barras de aço XC42 com 36 mm de diâmetro, temperadas. Pode ser observado que em tensões compressivas elevadas, há um aumento da resistência à fadiga.

Tabela 2.1 – Efeito das condições de têmpera e tensão residual na resistência à fadiga (Totten et al., 2002).

| Tipo e espessura do tratamento, mm | Dureza superficial, HRC. | Limite de fadiga após $5x10^6$ ciclos, MPa | | Tensão residual estabilizada para o limite de fadiga MPa | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $\sigma_m$ | $\sigma_a$ | Tensão longitudinal | Tensão transversal |
| A, indução 2,7 | 55-56 | 596 | 584 | -128 | -468 |
| | | | | -243 | -571 |
| B, indução 4,2 | 55-56 | 623 | 610 | -273 | -583 |
| | | | | -341 | -676 |
| C, indução 4,7 | 54-59 | 670 | 660 | -655 | -603 |
| D, resfriado em água, após alívio de tensão 3,5 | 60-61 | 780 | 750 | -863 | -1132 |
| | | | | -777 | -1156 |

Lieurade et al.,1991 apud Totten et al., 2002, estudaram o efeito da tensão residual na resistência à fadiga de uma junta de aço HLE(E690) soldada. Três casos foram analisados: condição como soldada; após tratamento térmico para alívio de tensões; e após jateamento com granalhas, o que introduziu tensões residuais compressiva. Foi observado um aumento considerável na resistência à fadiga no caso do processo de jateamento com granalhas. Para uma vida de 2 $10^6$ ciclos, a tensão aplicada foi de 207 MPa para as duas primeira condições e 392 MPa para a condição jateada com granalhas, ver Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Efeito da tensão residual na resistência à fadiga de uma junta E690 soldada (Totten et al., 2002).

| Tipo | Estado | Vida ($\sigma_{2.10^6}$ MPa) | $\sigma_{BX}$ MPa | Iniciação da Trinca |
|---|---|---|---|---|
|  Passe Múltiplo | Soldada; | 207 | -40 | Solda |
| | Tratamento Térmico após a solda; | 207 | -37 | |
| | Jateamento por granalhas; | 392 | -519 | |

### 2.1.3. A Influência Da Tensão Residual Na Propagação De Trincas.

No caso de montagens soldadas, a presença dos defeitos em uma junta e o perfil desta geometria geralmente delimita o ponto da iniciação da trinca. A fase de início da trinca pode ser considerada levando-se em conta o campo de tensão residual introduzido pela operação de soldagem. A Figura 2.3 mostra o resultado da propagação como uma função da tensão residual

O relaxamento da tensão residual pelo tratamento térmico muda a velocidade de propagação da trinca consideravelmente, quando a tensão envolvida é alta. (Totten et al., 2002).

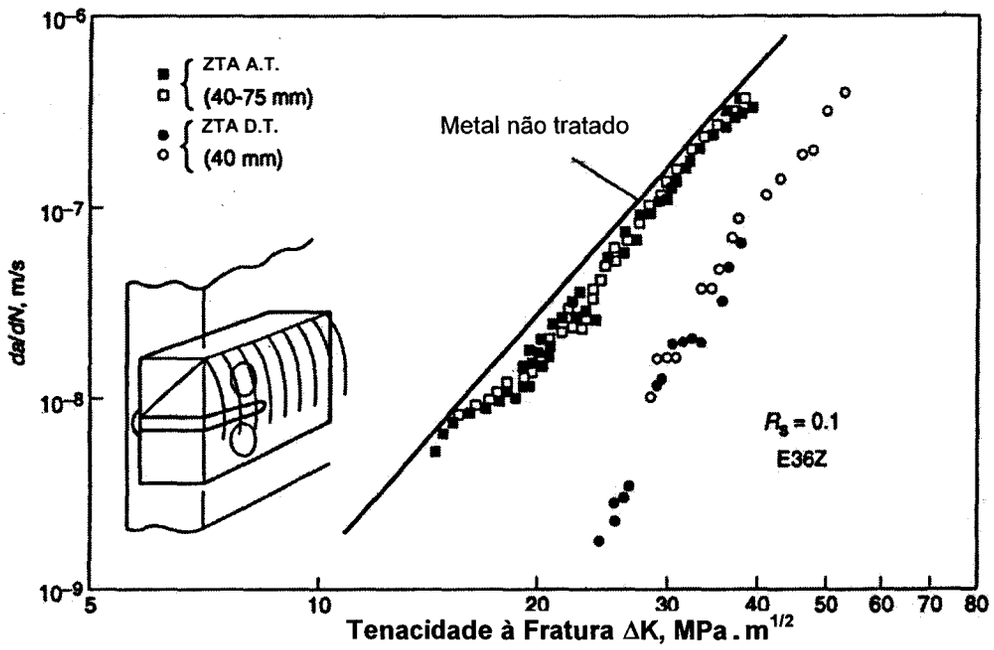



Figura 2.3 – Efeito do tratamento de alívio de tensão residual na velocidade da trinca na ZTA, na montagem com solda de topo em um aço E36Z. (Totten et al., 2002).

No caso de fratura frágil, ocorre a ativação do mecanismo de clivagem no grão quando a tensão local alcança um valor crítico, $\sigma_f$, e geralmente propaga-se sem dificuldade nos grãos adjacentes. A soma da tensão residual

trativa, $\sigma_R$, a uma tensão aplicada, $\sigma$, induz este tipo de falha para cargas baixas, conforme mostra a Equação1:

$$\sigma_f = \sigma + \sigma_R \qquad (1)$$

Iniciada a trinca, a tensão aplicada, $\sigma$, pode ser suficiente para que a propagação da trinca continue a grandes velocidades. A falha é então catastrófica. As tensões residuais que facilitam a iniciação da fratura frágil por clivagem são muito danosas para os aços sob carregamento a baixa temperatura. Neste caso, é recomendado o alívio de tensões nas juntas soldadas.

### 2.1.4. Influência da Tensão Residual na Resistência à Tração, Fricção, Desgaste e na Estabilidade Dimensional.

Os efeitos das tensões residuais na resistência à tração são óbvios, particularmente em estruturas fabricadas com materiais compósitos ou quando a camada de pré-tensão é muito espessa quando comparada com as espessuras dos componentes. Em compósitos, as tensões residuais são produzidas como resultado da incompatibilidade térmica e mecânica do reforço e da matriz. Isto pode influenciar as propriedades macroscópicas dos compósitos sob tensões de tração ou compressão.

Segundo Totten et al., 2002, pesquisas têm sido realizadas analisando o efeito da tensão residual nas propriedades da fricção e do desgaste, embora seu papel seja freqüentemente mascarado por outros parâmetros. O aumento da dureza durante o tratamento, a mudança da tenacidade e a adesão da cobertura antidesgaste devido à tensão residual, podem afetar consideravelmente a resistência à fricção. Até o presente, este efeito tem sido integrado dentro do parâmetro global de adesão.

O problema da estabilidade dimensional é conhecido há muito tempo. Quando um componente é trabalhado e contenha tensões residuais produzidas por um tratamento a quente ou por soldagem, a forma do componente pode mudar após estas operações, devido à relaxação da tensão residual. Para evitar este tipo de defeito, os tratamentos de alívio de tensão são freqüentemente utilizados.

## 2.2. PROCESSO DE JATEAMENTO POR GRANALHAS

O jateamento por granalhas é um processo de trabalho a frio, no qual uma superfície ou parte dela é bombardeada com pequenas esferas de alta dureza, conforme ilustra a Figura 2.4.

Cada parte bombardeada da superfície produz um aspecto martelado, com a formação de pequenas cavidades, produzindo uma região de alta tensão residual de compressão, ver Figuras 2.5 e 2.6. Logo abaixo da superfície, a microestrutura tende às suas características originais Estes fatores melhoram a vida do componente em relação ao comportamento em fadiga.

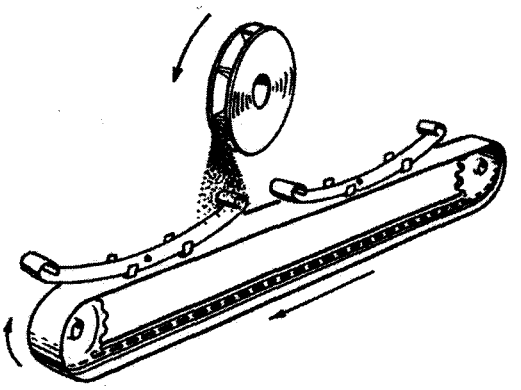


Figura 2.4 - Esquema da realização do jateamento por granalhas (Wheelabrator-Frye Inc, 1977).

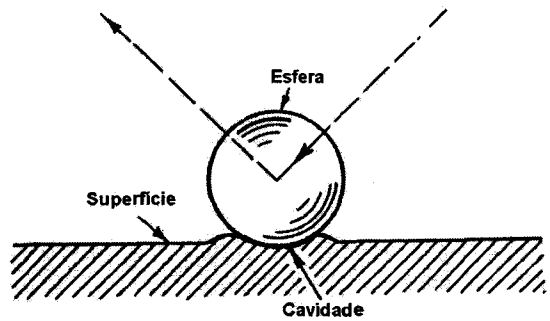



Figura 2.5 – Formação da cavidade devido ao impacto da esfera no jateamento (Wheelabrator-Frye Inc ,1977).

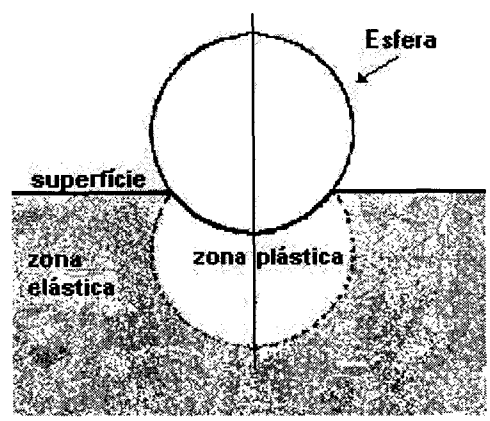



Figura 2.6 – Formação das cavidades pelo impacto das esferas (M. Kobayashi, et al,1997).

A Figura 2.7 apresenta um perfil típico do campo de tensão de compressão residual introduzido pelo processo de jateamento com granalhas, onde:

**SS – Tensão de superfície** – medida da tensão induzida na superfície, na região de jateamento.

**$CS_{MAX}$ – Tensão de compressão máxima** – o máximo valor de tensão de compressão induzida, que é mais alta logo abaixo da superfície.

**d – Profundidade** – A profundidade da tensão de compressão induzida pelo processo é dada pelo ponto em que esta tensão corta o eixo neutro, tornando-se trativa.

**$TS_{MAX}$ – Máxima tensão de tração.**

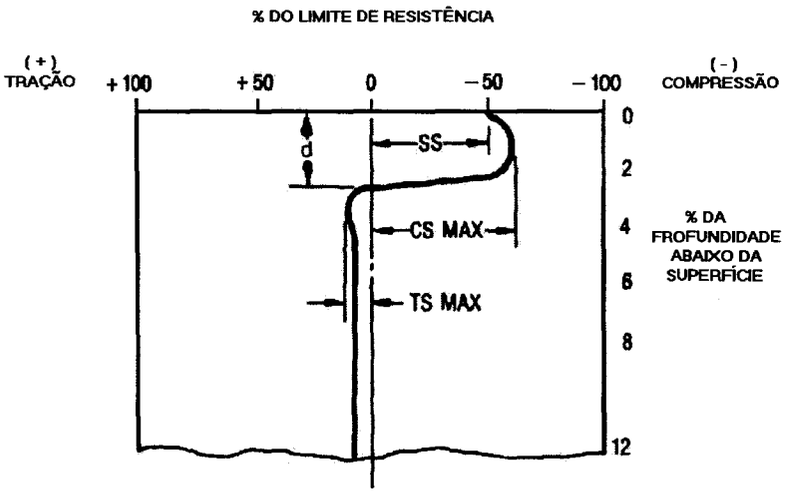



Figura 2.7 – Exemplo do perfil de tensão residual criado pelo processo de jateamento (Metal Improvement Company, Inc, 1995).

Segundo Souza (1980), o jateamento constitui um método de trabalho a frio da superfície de componentes ou peças metálicas que, através do bombardeamento por um jato de granalhas esféricas causa deformação plástica ou recalcamento da camada superficial, induzindo a um estado de tensão residual de compressão, balanceando a pequena tensão de tração no interior da peça, aumentando a dureza superficial e alterando as características microgeométricas da textura.

Segundo Lassance (1976), três conseqüências básicas podem ser destacadas, que orientam a compreensão do fenômeno:

**Compactação Superficial** – A mais importante, que é provocada na estrutura superficial do metal, principalmente quando são usadas partículas sem arestas vivas, criando uma tensão de compressão que melhora as qualidades metalúrgicas superficiais e aumenta a resistência à fadiga.

**Porosidade Superficial** – A compactação também sela a porosidade superficial, reduzindo o atrito, melhorando a condutividade térmica e elétrica e aumentando a resistência à oxidação e demais agressões químicas.

**Rugosidade Superficial** – Provoca uma rugosidade superficial uniforme, que pode ser pré–especificada, com a finalidade de reter lubrificantes ou desmoldantes e reduzir o atrito.

A granalha de aço, por sua forma esférica conveniente e alta densidade sempre foi o material mais empregado para esta finalidade. A Figura 2.8 e a Tabela 2.3 ilustram exemplos de tamanhos das esferas especificados pela SAE.

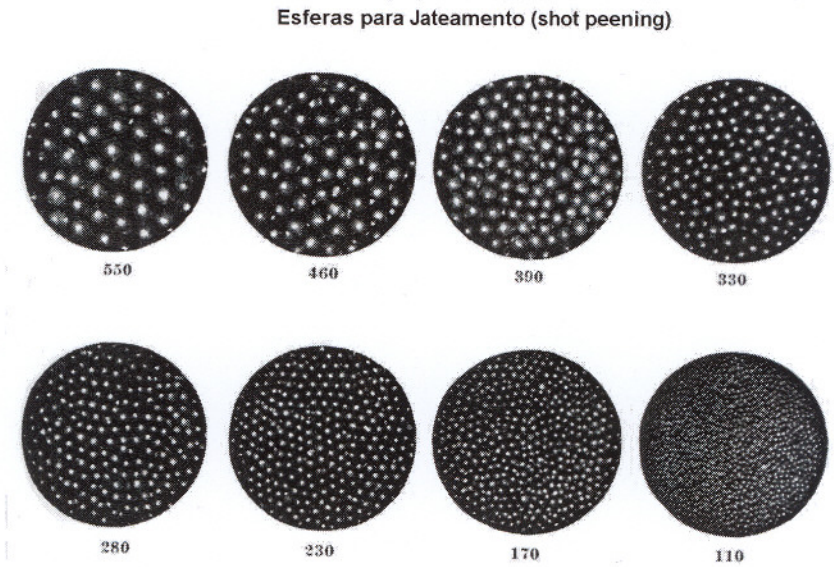



Figura 2.8 – Exemplos de tamanho das esferas de jateamento especificadas pela SAE. (Wheelabrator-Frye Inc, 1977).

A eficiência do processo depende da manutenção das condições de qualidade da granalha esférica, considerando a uniformidade do tamanho, a forma, a dureza e a durabilidade.

Tabela 2.3 – Especificação S.A.E para tamanhos de granalha esférica (Souza, 1980).

| Tamanho da granalha esférica | S 1320 | S 1110 | S 930 | S 780 | S 660 | S 550 | S 460 | S 390 | S 330 | S 280 | S 230 | S 170 | S 110 | S 70 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nominal (mm) | 3,4 | 2,8 | 2,4 | 2,0 | 1,7 | 1,4 | 1,2 | 1,0 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,2 |
| Peneira "A" (mm) | 4,76 | 4,00 | 3,36 | 2,83 | 2,38 | 2,00 | 2,00 | 1,68 | 1,41 | 1,19 | 1,00 | 0,84 | 0,59 | 0,42 |
| Retida % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Peneira "B" (mm) | | | | | | | 1,68 | 1,41 | 1,19 | 1,00 | 0,84 | 0,71 | 0,50 | 0,33 |
| Retida Máximo % | | | | | | | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Peneira "C" (mm) | 3,36 | 2,83 | 2,38 | 2,00 | 1,68 | 1,41 | 1,19 | 1,00 | 0,84 | 0,71 | 0,59 | 0,42 | 0,30 | 0,18 |
| Retida Mínimo % | 90 | 90 | 90 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 90 | 90 |
| Peneira "D" (mm) | 2,83 | 2,38 | 2,00 | 1,68 | 1,41 | 1,19 | 1,00 | 0,84 | 0,71 | 0,59 | 0,50 | 0,35 | 0,18 | 0,13 |
| Máxima que passa % | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 10 | 10 |

A granalha esférica deve ser utilizada isenta de contaminações e a superfície deve apresentar-se limpa, conforme mostra a Figura 2.9. Caso contrário, poderá ocorrer à inclusão de impurezas para o interior da camada superficial.

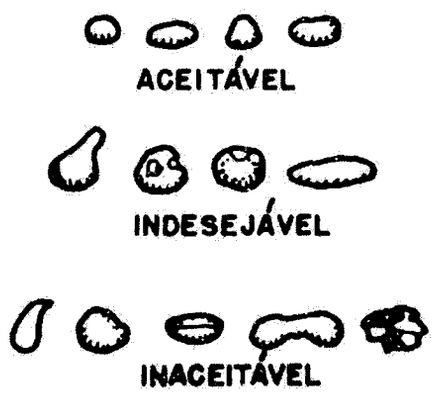



Figura 2.9 – Tipos de formas de granalhas de aço (Souza, 1980).

### 2.2.1. ENSAIO MÉTODO DE ALMEN (*ALMEN TEST*)

A tensão residual de compressão que se forma em uma superfície na qual foi realizado o jateamento em apenas um dos lados, pode provocar uma flexão nas chapas, conforme mostra a Figura 2.10. Esta deformação é proporcional à intensidade de jateamento.

Segundo a Metal Improvement Company, Inc. (1995) são três os tipos de plaquetas de aço mola SAE1070 utilizadas, sendo que o material é laminado a frio e temperado, conforme Figura 2.11. As plaquetas são denominadas de "N", "A" e "C". A plaqueta "N" apresenta a menor e a "C", a maior espessura, conforme ilustrado nas Figuras 2.11 e 2.12.

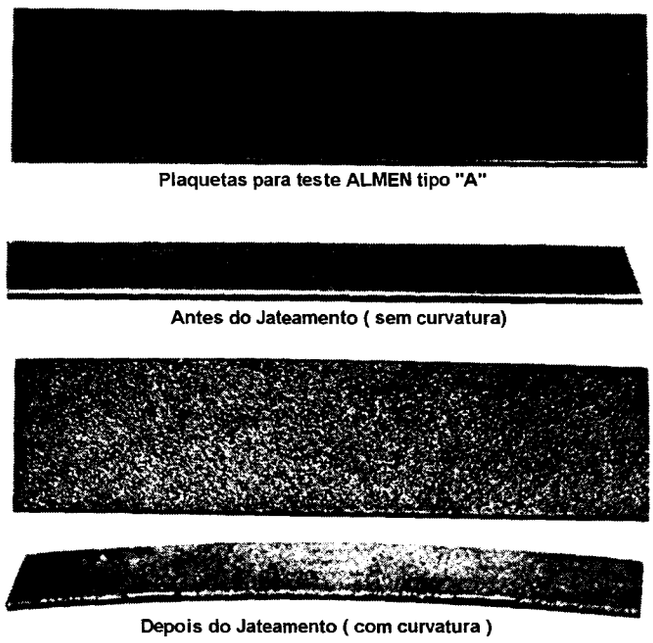
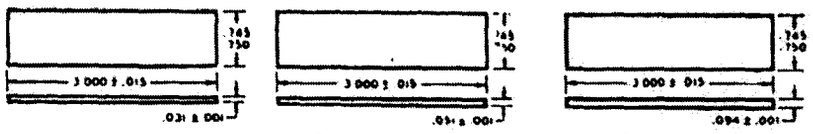



Figura 2.10 – Plaqueta tipo "A" do Método de Almen, antes e depois do jateamento ( Wheelabrator-Frye Inc,1977).

Tanto a base para a fixação das placas durante o ensaio de jateamento, como o dispositivo para a medição da flecha é padronizado, como mostrado na Figura 2.13.



Plaqueta N Plaqueta A Plaqueta C

**Material SAE 1070 – aço de mola laminada a frio.**
**Acabamento – Têmpera azul (ou brilhante) uniformemente endurecido.**
**Planicidade – ± 0,001" (A)**
**± 0,0015" (C) e**
**± 0,001" (N)**

Figura 2.11 – Esquema ilustrando as dimensões das plaquetas tipo "N", "A" e "C" (Lassance, 1976).

O processo de medição consiste em selecionar uma plaqueta não usada anteriormente, como uma das apresentadas na Figura 2.11, apóia-la nas quatro esferas do suporte do micrômetro comparador e zerar o micrômetro, como mostrado na Figura 2.13.

A plaqueta é fixa no bloco com os quatro parafusos da base, conforme Figura 2.14, sendo a seguir realizado o jateamento conforme apresenta a Figura 2.12(A). Ao término da operação, retira-se a plaqueta do bloco e verifica-se que ficou arqueada, conforme apresenta a Figura 2.12(B). Coloca-se a plaqueta no conjunto do suporte do micrômetro comparador e faz-se a leitura da flecha, que é registrada no relógio comparador conforme apresenta a Figura 2.12(C).

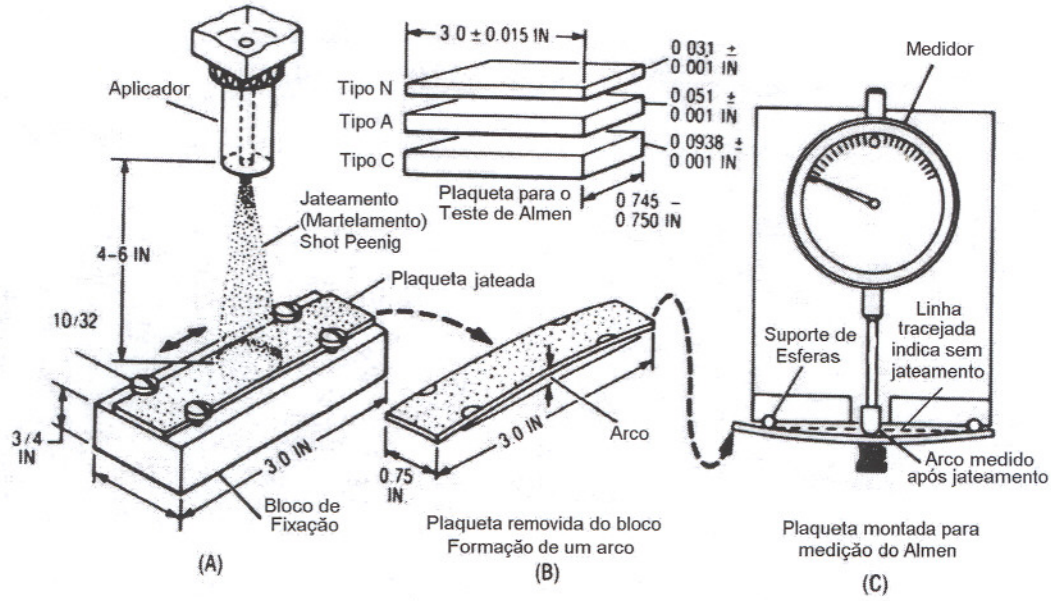



Figura 2.12 – Esquema ilustrando o procedimento para medição da flecha. (Metal Improvement Company, Inc , 1995).

O número de Almen, que define a intensidade do jateamento, é a medida dessa flecha, em polegadas ou milímetros, seguido da indicação do tipo da plaqueta empregada. Por exemplo, 0.13 a 0.18A (em milímetros) e 0.005 a 0.007A (em polegadas).

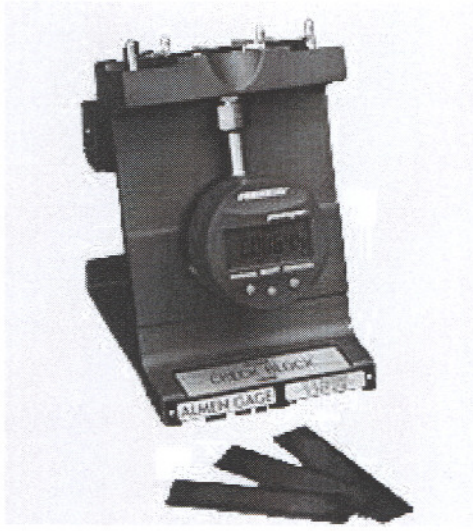



Figura 2.13 – Medidor de ALMEN ou da flecha. (Metal Improvement Company Inc, 1995).

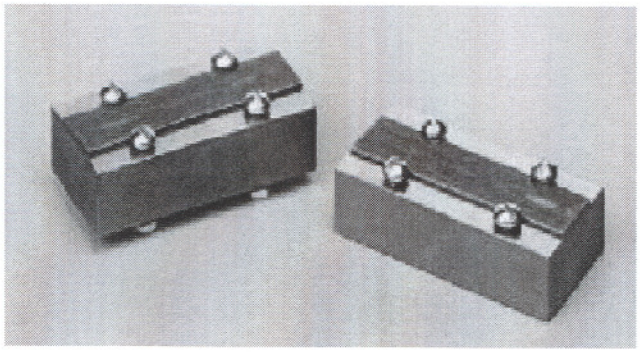


Figura 2.14 – Bloco de Suporte das plaquetas (Metal Improvement Company, Inc, 1995).

Estas especificações definem que a intensidade de jateamento deve ser capaz de provocar, na plaqueta tipo "A", flechas de 0.13 a 0.18mm ou 0.005 a 0.007 polegadas. A intensidade do jateamento assim especificada pela flecha poderá ser igual para materiais de qualquer natureza, sem indicações quanto à pressão ou velocidade de rotação, distância, tempo operacional, ângulo de ataque e tipo de equipamento empregado.

Entretanto, exigências paralelas quanto à contaminação da peça, limites de rugosidade e cobertura levam a completar, em geral, os números de Almen, com a indicação do tipo e granulometria do material usado no processo de jateamento e o índice de cobertura pretendido. Em alguns casos são dados subsídios completos para a elaboração de dispositivos e planos para posicionamento da(s) pistola(s) ou turbina(s) utilizadas.

Analisando a Figura 2.15, que relaciona o tempo operacional de jateamento com a intensidade do jateamento obtido, observa-se uma curva característica que mostra o crescimento acelerado da intensidade do jateamento nos primeiros momentos. Este crescimento reduz-se progressivamente, atingindo uma estabilização, ou seja, a saturação superficial da peça a partir de um certo ponto "t", que é o ponto de saturação. A definição do ponto de saturação é dada como o ponto, onde a partir do qual a

intensidade do jateamento, após um tempo "2t", não se eleva mais do que 10 e 20% (X%).

Geralmente, toda a área atingida foi uniformemente compactada no ponto "t" de saturação, o que pode ser constatado até visualmente pela observação das marcas sobre a superfície quando é avaliado o percentual da área coberta em relação à não coberta, observados na Figura 2.16. São comuns especificações como 50% ou 90% de cobertura. O valor de 100% de cobertura corresponde ao tempo de saturação. As especificações podem chegar a 150%, 200% ou até 300%, que significam exigências de 1,5 t, 2t ou 3t de tempo operacional, respectivamente.

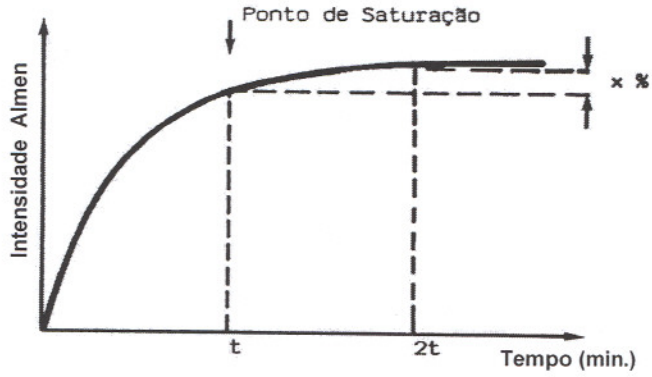
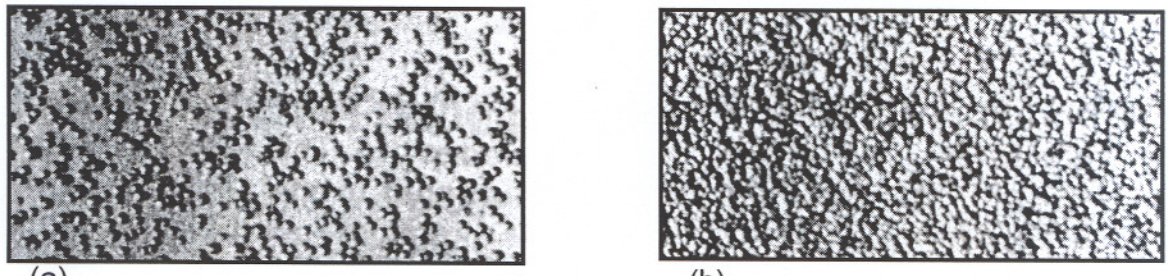



Figura 2.15 – Gráfico intensidade do jateamento x tempo de operação, (Metal Improvement Company, Inc, 1995).



(a) (b)

Figura 2.16 – Cobertura de jateamento (a) parcial e (b) total (Metal Improvement Company, Inc, 1995).

Quando uma chapa é submetida a esforços de flexão, são geradas tensões de tração e tensões de compressão conforme mostra a Figura 2.17.

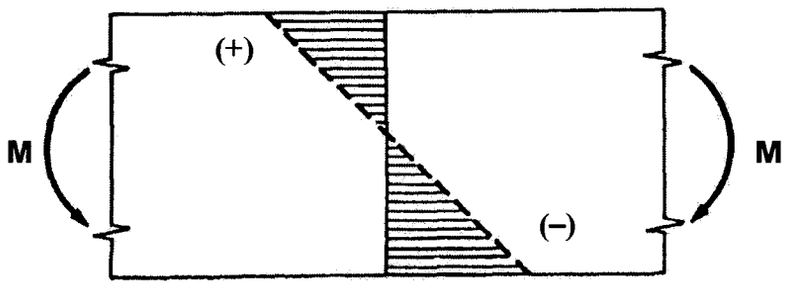



Figura 2.17 – Tensões geradas por esforços de flexão, (Lassance, 1976).

A Figura 2.18 apresenta o resultado da superposição das tensões residuais introduzidas pelo jateamento e as tensões por flexão.

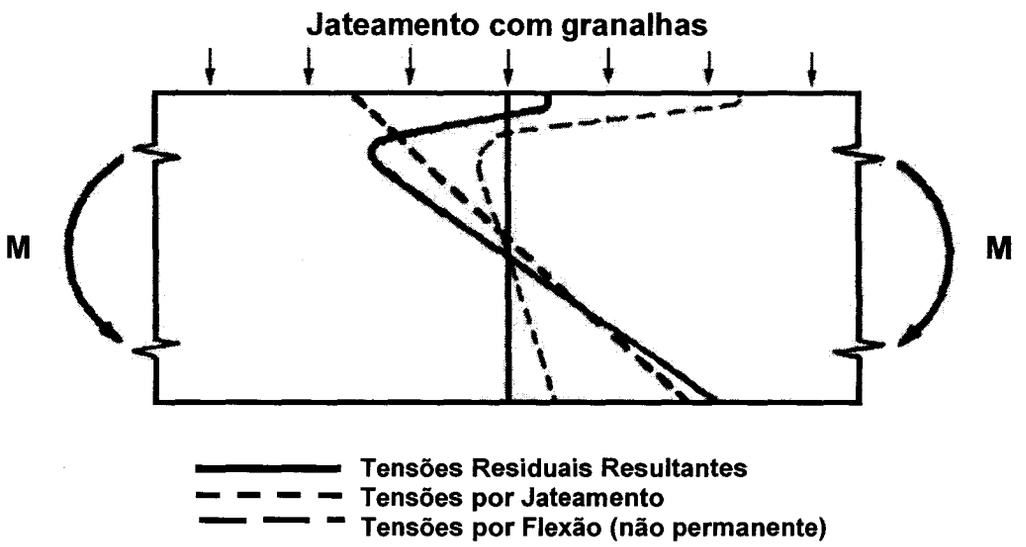



Figura 2.18 – Gráfico superpondo as tensões residuais induzidas pelo jateamento e as tensões por flexão, Lassance (1976).

Analisando a Figura 2.18, observa-se que na superfície jateada permanecem as tensões de compressão, o que assegura a maior dificuldade para a não formação de trincas, aumentando a vida em fadiga. Em função dos esforços provocados pelos movimentos de flexão previstos aos quais será submetida à peça, deve corresponder uma pré-tensão apropriada obtida pelo jateamento.

Segundo Lassance (1976), a intensidade do jateamento e as tensões residuais obtidas são de difícil verificação, salvo a utilização de equipamentos de difração de raios x. Portanto, é mais fácil inspecionar com rigor a preparação e a aplicação do processo. Ele requer mão-de-obra especializada e consciente e, principalmente, equipamentos automáticos que ofereçam o recurso de reproduzir impessoalmente, os mesmos valores das variáveis anteriormente identificados.

## 2.3. FADIGA DOS METAIS

Segundo CALLISTER (2002), a fadiga é uma forma de falha que ocorre em um material, quando este é submetido a esforços dinâmicos, repetitivos ou oscilantes que pode fraturar, mesmo em níveis de tensões inferiores ao limite de resistência à tração ou ao limite de escoamento para uma carga estática.

A fadiga é importante no sentido de que é a maior causa individual de falhas em metais, sendo estimado que corresponda a aproximadamente noventa por cento de todas as falhas.

Segundo DIETER (1981), são três os fatores básicos necessários para causar a falha por fadiga:

- Uma tensão máxima suficientemente alta;

- Uma variação ou flutuação na tensão aplicada suficientemente grande;

- Um número de ciclos de aplicação da tensão suficientemente grande;

Além disto, outras variáveis são importantes, como concentração de tensão, corrosão, temperatura, sobrecargas, microestrutura, tensões residuais, e tensões combinadas, acabamento superficial, que tendem a alterar as condições de ocorrência da fadiga.

### 2.3.1. TENSÕES

Segundo SOUZA (2000), um ciclo de tensão é a menor parte da função tensão-tempo que é periódica e identicamente repetida. Os ciclos apresentados na Figura 2.19 são completamente reversos de forma senoidal, sendo que a Figura 2.19(a) apresenta um ciclo onde a tensão máxima e mínima são iguais e de sinais opostos. Na Figura 2.19(b) todas as tensões são positivas e as tensões máxima e mínima são desiguais. O ciclo da Figura 2.19(c) apresenta tensões positivas e negativas e tensões máxima e mínima também desiguais. O ciclo da Figura 2.20(d) apresenta tensão irregular ou aleatória.

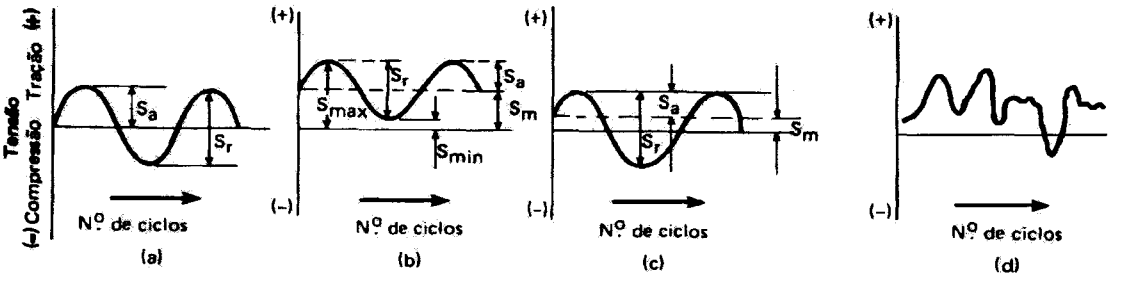



Figura 2.19 – Ciclos regulares de tensões.(a) tensão reversa; (b) tensão repetida (campo de tração); (c) tensão repetida (campos de tração e compressão) e (d) tensão irregular ou aleatória.

Conforme apresentado na Figura 2.19, a tensão máxima, $S_{máx}$, é o maior valor algébrico da tensão no ciclo e a tensão mínima, $S_{min}$ é o menor. O intervalo de tensão, $S_r$, é a diferença algébrica entre $S_{máx}$ e $S_{min}$, conforme a Equação (2):

$$S_r = S_{max} - S_{min} \tag{2}$$

A amplitude de tensão alternada, $S_a$, é definida como sendo a metade do valor de $S_r$:

$$S_a = \frac{S_r}{2} = \frac{S_{max} - S_{min}}{2} \tag{3}$$

A tensão média, $S_m$ é a média algébrica entre $S_{máx}$ e $S_{min}$, conforme apresenta a Equação (4). No caso da Figura 2.19(a), $S_m = 0$.

$$S_m = \frac{S_{max} + S_{min}}{2} \tag{4}$$

O número de ciclos de tensão suportado pelo corpo de prova até a fratura é designado por N. Este número é registrado no equipamento de fadiga e representa a soma do número de ciclos para iniciar uma trinca de fadiga mais o número de ciclos para propagar a trinca através do material. Caso o material não rompa, o número, N, também pode indicar o número de ciclos atingido no ensaio.

O limite de fadiga, $S_e$, é definido como o valor limite da tensão abaixo da qual o material pode suportar um número infinito de tensões regulares sem se romper. Genericamente, a resistência de um material à fadiga $S_n$, é o valor máximo da tensão suportada para um dado número de ciclos, sem romper. Caso o ciclo de tensões utilizado não seja igual ao da Figura 2.19(a), $S_e$ ou $S_n$ devem ser

expressos em função de $S_a$, ou de $S_{máx}$ isto é, deve-se mencionar os valores dessas tensões aplicadas, bem como da tensão média, $S_m$.

A relação algébrica as entre tensões $S_{min}$ e $S_{máx}$ é, simbolizada por R, conforme apresenta a Equação 5.

$$R = \frac{S_{min}}{S_{max}} \tag{5}$$

Por convenção, as tensões de tração são positivas e as tensões de compressão são negativas. A tensão S em um ciclo regular para um dado tempo t e para ciclo completo num período T é dado pela Equação 6.

$$S = S_m + S_a \operatorname{sen} \frac{2\pi t}{T} \tag{6}$$

### 2.3.2. Curva S-N (σ-N) ou Curva de Wöhler

As propriedades de fadiga dos materiais, como ocorre com outras variáveis mecânicas, podem ser determinadas a partir de ensaios de laboratório.

Segundo CALLISTER (2002), uma série de ensaios é iniciada submetendo-se um corpo de prova ao ciclo de tensões, a uma amplitude de tensão máxima relativamente grande ($S_{máx}$), geralmente para os aços da ordem dois terços do limite estático de resistência à tração. O número de ciclos até a falha é registrado. Este procedimento é repetido com outros corpos de prova de acordo com amplitudes máximas de tensão, progressivamente menores. Os dados são colocados em gráfico na forma da tensão S ou σ em função do logaritmo do número de ciclos N até a falha, para cada um dos corpos de prova.

Os valores de S ou $\sigma$ são normalmente tomados na forma de amplitudes de tensão $S_a$, Equação (6), sendo que os valores de $S_{máx}$ e $S_{min}$ são ocasionalmente utilizados.

Segundo SOUZA (2000), a curva tensão-número de ciclos, também chamada curva de Wöhler ou simplesmente curva S-N, é o modo mais rápido para a apresentação dos resultados dos ensaios de fadiga. Nessa curva, o número, N, (ou log N) é colocado no eixo das abscissas e no eixo das ordenadas tem-se a tensão máxima $S_{max}$ que também pode vir expressa em escala logarítmica.

Assim, há três modos de se construir o diagrama da curva S-N variando-se as escalas dos eixos cartesianos, a saber: (S x N), (S x log N) e (log S x log N). A escala logarítmica facilita a comparação de dados, pois fornece curvas de diversos materiais com a mesma forma, além de facilitar e diminuir a escala de N.

Geralmente as tensões aplicadas pelos equipamentos são do tipo flexão rotativa, torção ou tração-compressão. Para tensões conjugadas poucas determinações foram realizadas. Todas as máquinas de fadiga interrompem o seu funcionamento no mesmo instante em que ocorre a ruptura do corpo de prova.

Exemplos de curvas S-N são dados na Figura 2.20. Nota-se que quanto menor o $S_{máx}$ aplicado, maior é o número N suportado pelo material para romper. Verifica-se que para os aços, a curva apresenta um patamar que corresponde justamente ao limite de fadiga do material (ver a definição de $S_e$), mas as ligas não-ferrosas em geral, como uma liga de alumínio, não apresenta esse patamar (verificou-se que dentre os metais não-ferrosos, o titânio, por exemplo, tem limite de fadiga definido).

Para o caso da existência do limite de fadiga, constatou-se que basta ensaiar o corpo de prova até $10^6$ ciclos de tensão e caso a ruptura não aconteça, a tensão correspondente será o limite de fadiga. Para o caso do metal não apresentar esse patamar, deve-se levar o ensaio até $10^6$ ou mesmo em certos casos até $5x10^8$ ciclos, dependendo do material, (níquel, duralumínio), fixando-se a tensão correspondente a esse valor máximo de N ensaiado, como o limite de fadiga desse material.

Segundo DIETER (1981), o número de ciclos de tensão que um metal pode suportar antes de se romper aumenta com o decréscimo da tensão aplicada, conforme pode ser observado na Figura 2.20.

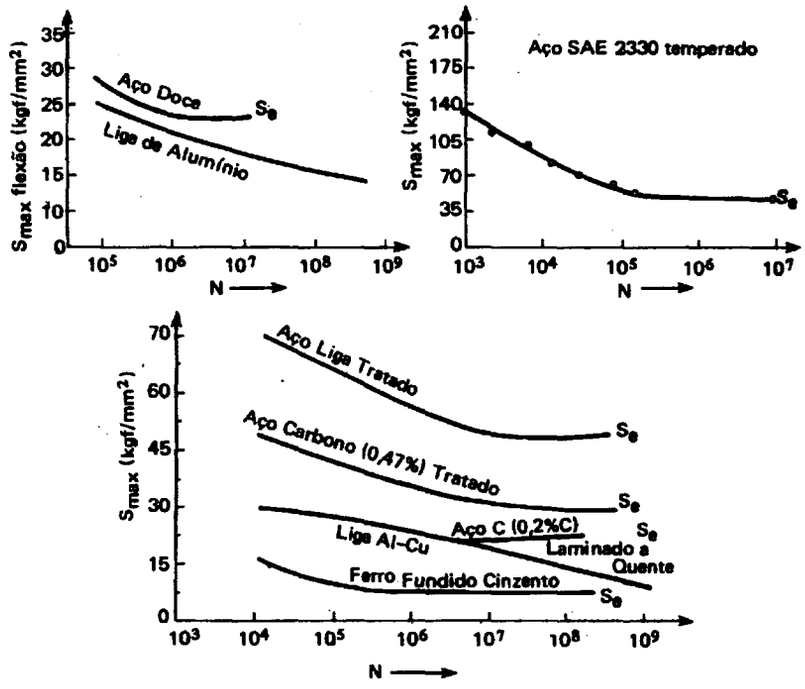



Figura 2.20 – Exemplos práticos de algumas curvas S-N (SOUZA, 2000).

Os ensaios de fadiga apresentam um grande espalhamento, cujas causas podem ser divididas em três categorias principais:

- Confecção dos corpos de prova;
- Condições dos ensaios de fadiga;
- Heterogeneidade do material;

As duas primeiras causas não são aceitáveis e suas influências sobre as propriedades de fadiga devem ser minimizadas através da utilização de técnicas experimentais adequadas.

Devido ao espalhamento nos dados, as informações estatísticas sobre as propriedades de fadiga podem ser necessárias em diversos casos, como por exemplo quando se deseja comparar as propriedades de fadiga de diferentes opções de materiais que satisfazem as condições de projeto, ou verificar a influência de tratamentos térmicos superficiais, não somente os valores médios, mas também estatisticamente. Assim, a determinação de níveis de confiança para menores probabilidades de falha, é necessária.

A norma ASTM E739 (1991) fornece uma metodologia de análise estatística para resultados de ensaios de fadiga realizados com controle de carga ou deformação, para a região onde os resultados experimentais podem ser aproximados por uma reta.

### 2.3.3. Propagação das Trincas.

A nucleação de trinca por fadiga geralmente ocorre na superfície de um componente ou corpo de prova submetido a carregamentos cíclicos. A nucleação na superfície é facilitada pelo fato dos grãos superficiais estarem menos sustentados mutuamente do que os grãos do interior do material e, assim, a

deformação plástica localizada e o rompimento das ligações atômicas podem ocorrer mais facilmente. Também, a tensão é geralmente máxima na superfície, uma vez que esta pode apresentar defeitos, como riscos de usinagem, entalhes, corrosão localizada, etc., que funcionam como concentradores de tensão.

Os mecanismos de nucleação de trinca por fadiga dependem: da estrutura do material, tipo de carregamento, temperatura, ambiente e da tensão média e tensões internas;

A vida total ($N_f$) de um componente submetido a um carregamento cíclico pode ser considerada composta de duas partes: a vida necessária para iniciar a trinca ($N_i$) e a vida necessária para a sua propagação até a fratura rápida ($N_p$):

$$N_f = N_i + N_p \qquad (7)$$

Segundo CALLISTER (2002), os sítios de nucleação de trincas incluem riscos superficiais, cantos vivos, rasgos de chaveta, fios de roscas e afins. Adicionalmente, o carregamento cíclico pode produzir descontinuidades superficiais microscópicas que resultam das etapas de escorregamento de discordâncias que podem também atuar como fatores de concentração de tensões e, portanto, como sítios de iniciação de trincas.

Em metais policristalinos, uma vez que uma trinca estável tenha se nucleado, ela se propaga subcriticamente com elevadas tensões de cisalhamento ao longo dos planos cristalográficos, que é conhecida como propagação em estágio 1, conforme apresentado na Figura 2.21. Esse estágio pode se constituir em uma fração grande ou pequena da vida total em fadiga, dependendo do nível de tensão e da natureza do corpo de prova do ensaio. Tensões elevadas e a presença de entalhes favorecem um estágio 1 curto.

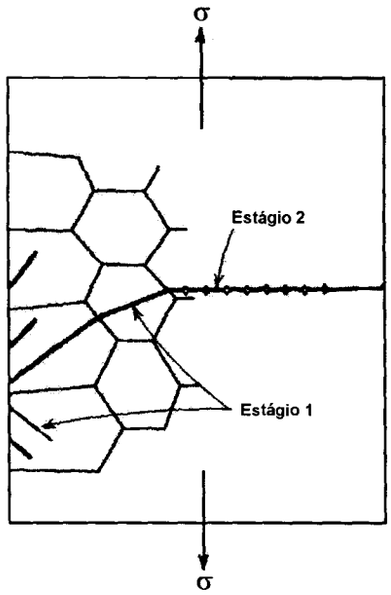



Figura 2.21 – Esquema dos estágios 1 e 2 de propagação de trincas. CALLISTER (2002).

Em metais policristalinos, a trinca se estende normalmente através de somente alguns grãos durante o estágio 1 de propagação. A superfície de fadiga formada possui uma aparência plana e sem características especiais.

Finalmente, um segundo estágio de propagação chamado de estágio 2, como apresenta a Figura 2.21, começa a operar por um processo repetitivo de arredondamento e afilamento da ponta da trinca, conforme apresentado na Figura 2.22.

O mecanismo de propagação de trinca de fadiga em estágio 2 e as várias etapas apresentados na Figura 2.22, através de um processo repetitivo de abaulamento plástico e afilamento da ponta da própria trinca descrito foi apresentado na Figura 2.22.

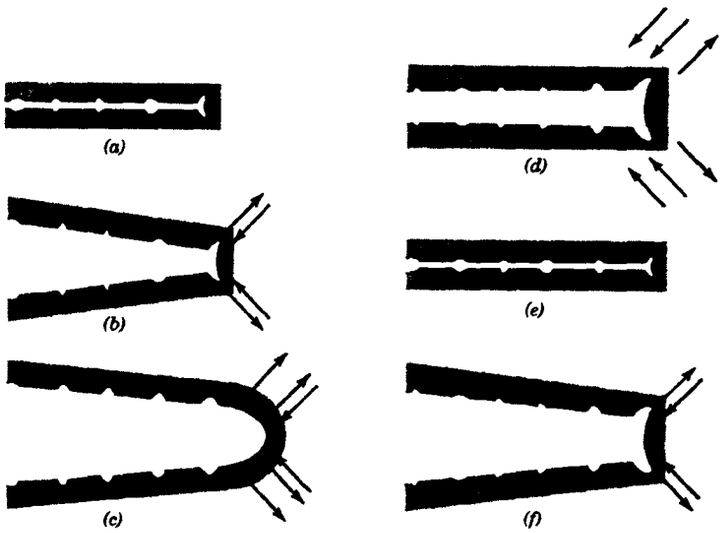



Figura 2.22 – Esquema do mecanismo de propagação de trinca de fadiga no estágio 2, (a) carga compressiva zero ou máxima, (b) baixa carga de tração, (c) carga de tração máxima, (d) baixa carga compressiva, (e) carga compressiva zero ou máxima, (f) Pequena carga de tração.(CALLISTER, 2002).

Atualmente algumas técnicas são utilizadas, com sucesso, com o objetivo de inibir o deslizamento superficial, tais como a introdução de tensões residuais de compressão na superfície do material por jateamento de granalhas e também recobrimento superficial, desde que não ocorra trincamento no revestimento, durante o carregamento cíclico.

A ausência de escorregamento superficial não garante a ausência de trincas de fadiga. Inclusões, partículas de segunda fase, etc., podem ser núcleos de iniciação de trincas e, assim, reduzindo-se suas densidades, dificulta-se também a nucleação de trincas, especialmente na fadiga de alto ciclo.

### 2.3.4. Influência da Superfície na Fadiga.

As operações de usinagem, utilizando uma ferramenta de corte, introduzem pequenos riscos e sulcos na superfície de uma peça, que podem limitar a vida em fadiga. Segundo CALLISTER (2002), observou-se que a melhoria do acabamento superficial mediante um polimento irá aumentar significativamente a vida em fadiga.

O acabamento superficial está relacionado com a rugosidade que é o conjunto de irregularidades superficiais como pequenas saliências e cavidades que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro.

A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos. Ela influi na qualidade de deslizamento, na taxa de desgaste, possibilidade de ajuste do acoplamento forçado, resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras, vedação, aparência, resistência à corrosão e à fadiga.

A rugosidade é avaliada pelo parâmetro de rugosidade ou nível de rugosidade. Os parâmetros mais utilizados nas indústrias fabricantes de molas são a Rugosidade Média(Ra) e (Rz).

A Rugosidade média (Ra) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (yi), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (CUT-OFF). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por

comprimento o percurso de medição (CUT-OFF) conforme apresentado na Figura 2.23.

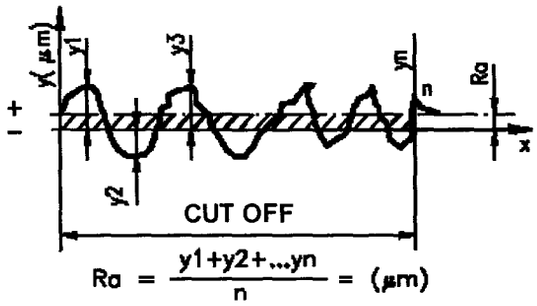



Figura 2.23 – Perfil do parâmetro de rugosidade Ra.( ABNT, 1988).

Rugosidade média (Rz), corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial. A rugosidade parcial (Zi) é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem (CUT-OFF). Na representação gráfica do perfil apresentado na Figura 2.24, esse valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, no comprimento de amostragem.

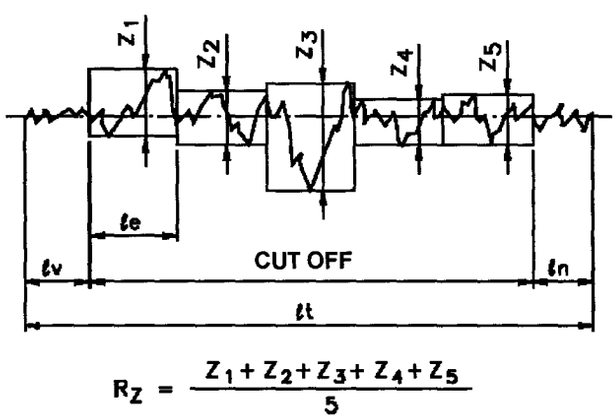



Figura 2.24 – Perfil do parâmetro de rugosidade média Rz. (ABNT, 1988).

# 3. Material e Métodos

## 3.1. Material

O material utilizado neste trabalho foi um aço SAE 5160, que foi fornecido na forma de chapa, com dimensões de 750mm de comprimento, 63,5 mm de largura e 11,35mm de espessura e que foram utilizados desta forma como corpos de prova, conforme esquema da Figura 3.1. A composição química nominal do material, em peso, está dada na Tabela 3.1.

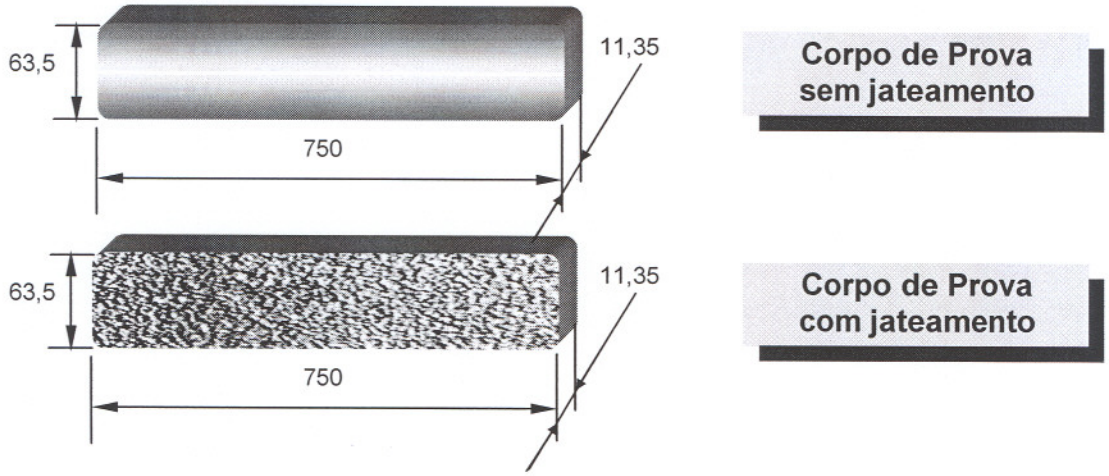



Figura 3.1 – Esquema do corpo de prova para ensaio de fadiga (dimensões em mm).

Tabela 3.1 – Composição química nominal do aço SAE 5160.

| Elemento Químico | C | Mn | Si | P | S | Cr |
|---|---|---|---|---|---|---|
| % em peso | 0,59 | 0,96 | 0,22 | 0,016 | 0,018 | 0,86 |

## 3.2.Tratamento Térmico

Os tratamentos térmicos de têmpera e revenido foram realizados conforme especificações do fabricante. As lâminas foram aquecidas em fornos a gás até a temperatura de 850°C por um tempo de 40 minutos para a austenitização a seguir resfriadas em banho de óleo com agitação na temperatura variando 60 a 80°C por um dispositivo automático de movimentação da lâmina como apresentado na Figura 3.2.

Em seguida, as lâminas foram revenidas em forno de revenimento na temperatura de 420 °C por um tempo de 70 minutos, conforme apresentado na Figura 3.3. Após o tratamento térmico, os corpos de prova foram encaminhados para os tratamentos de jateamento com granalhas.

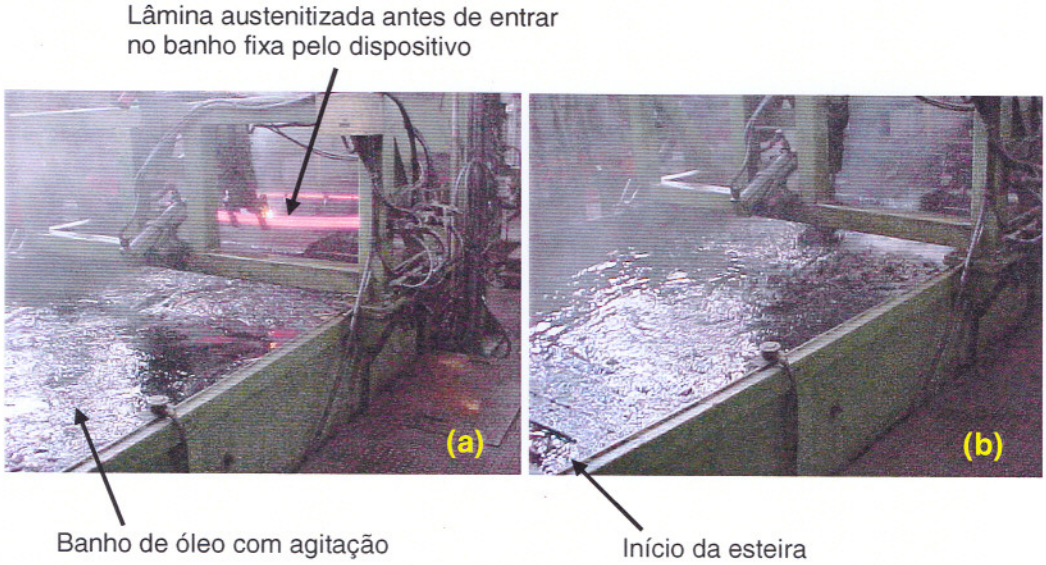



Figura 3.2 – Dispositivo automático de movimentação da lâmina no processo de resfriamento: (a) lâmina fixa pelo dispositivo para ser introduzida no banho e (b) lâmina imersa no banho de óleo e movimentada pelo dispositivo até a esteira.

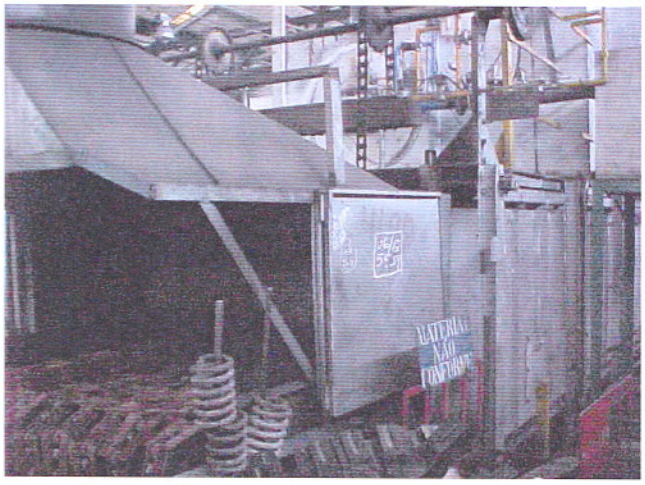



Figura 3.3 – Vista geral do forno para revenimento.

### 3.3. Tratamento Superficial de Jateamento por Granalhas.

Os corpos de prova foram separados em 5 grupos, com 4 amostras cada. Os grupos foram colocados conjuntamente no forno elétrico mufla e este aquecido até cada patamar de tratamento, 100, 150, 200, 250 e 300 °C, permanecendo neste por 10 minutos, Figura 3.4. Uma vez garantido que o grupo estava na temperatura pré-estabelecida, isto é, na condição de jateamento, os corpos de prova foram colocados na esteira da máquina de jateamento, conforme Figura 3.5.

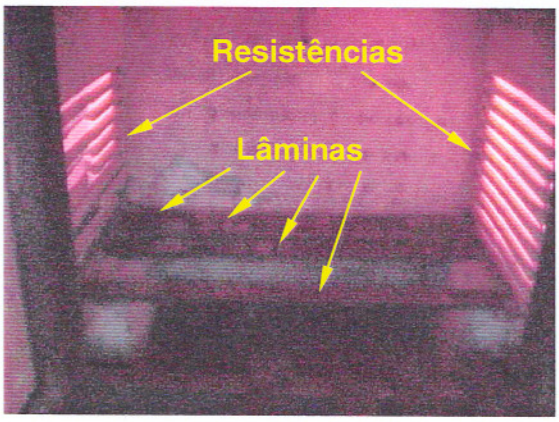



Figura 3.4 – Forno mufla com grupo de lâminas antes de ir para o jateamento.

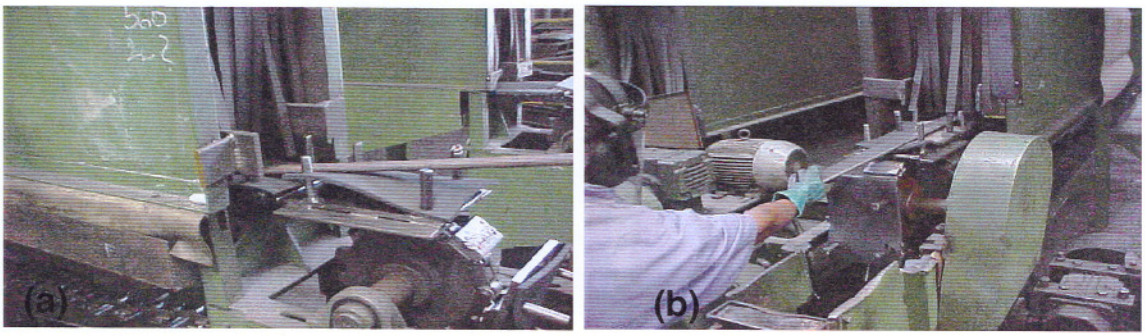



Figura 3.5 – Equipamento de jateamento. (a) posição em que o corpo de prova entra e (b) posição em que o corpo de prova sai da máquina de jateamento por granalhas.

No jateamento por granalhas foram medidas as temperaturas das lâminas ao entrar e ao sair do equipamento de jateamento conforme apresentado na Figura 3.5, usando-se um medidor de temperatura marca GULTON DO BRASIL LTDA modelo GUL term 1200 utilizando termopar tipo K. Os valores médios da variação da temperatura são apresentados na Tabela 4.1 no capítulo 4.

Os processos de endurecimento superficial por jateamento com granalhas realizados nos corpos de prova foram classificados de acordo com a dureza após tratamento térmico de têmpera e revenido e a temperatura de jateamento nas seguintes condições:

**Condição A:** quatro corpos de prova tratados para dureza 528HV ($d_B$ = 2,75), submetidos ao jateamento na temperatura de 25°C.

**Condição B:** quatro corpos de prova tratados para dureza 491HV ($d_B$ = 2,85), submetidos ao jateamento na temperatura de 25°C.

**Condição C:** quatro corpos de prova tratados para dureza 491HV ($d_B$ = 2,85mm) submetidos ao jateamento na temperatura de 100°C, que iniciaram o tratamento a 103°C e terminaram a 100°C.

**Condição D:** quatro corpos de prova tratados para dureza 491HV ($d_B$ = 2,85mm) submetidos ao jateamento a quente, na temperatura de 150°C, que iniciaram o tratamento a 152°C e terminaram a 142°C.

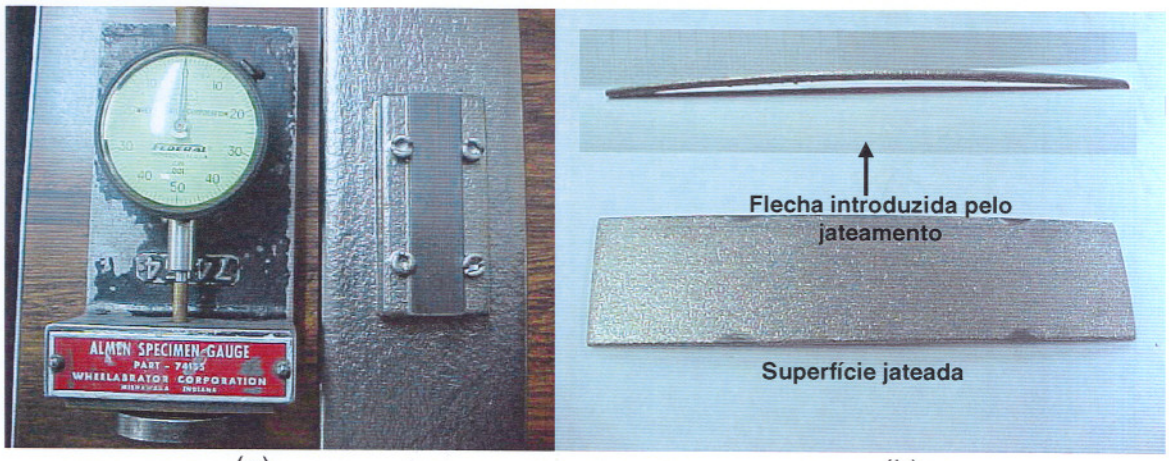
**Condição E:** quatro corpos de prova tratados para dureza 491HV ($d_B$ = 2,85mm) submetidos ao jateamento a quente, na temperatura de 200°C, que iniciaram o tratamento a 202°C e terminaram a 175°C.

**Condição F:** quatro corpos de prova tratados para dureza 491HV ($d_B$ = 2,85mm) submetidos ao jateamento a quente, na temperatura de 250°C, que iniciaram o tratamento a 253°C e terminaram a 218°C.

**Condição G:** quatro corpos de prova tratados para dureza 491HV ($d_B$ = 2,85mm) submetidos ao jateamento a quente, na temperatura de 300°C, que iniciaram o tratamento a 296°C e terminaram a 253°C.

Para avaliar empiricamente a intensidade do jateamento antes da execução do jateamento nas laminas, foi determinado o parâmetro Almen (flecha) utilizando o dispositivo apresentado na Figura 3.6(a). Desta forma, foi determinado um valor do parâmetro Almen do tipo A de 0,533mm (0,021"). Na Figura 3.6 (b)

pode ser observada a superfície jateada da plaqueta padrão, bem como a fecha formada devido à introdução de tensões residuais.




(a) (b)

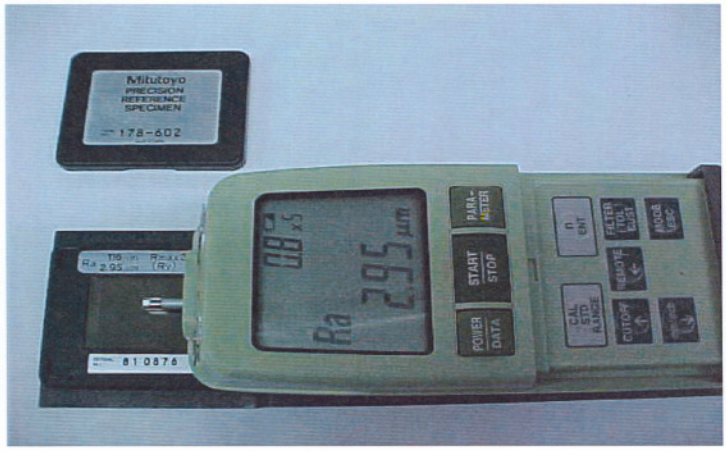
Figura 3.6 – (a) Medidor do parâmetro ALMEN (flecha) e dispositivo de fixação da lâmina padrão para o jateamento. (b) Detalhe da superfície jateada da plaqueta padrão Almen após o jateamento. Percebe-se a flecha formada pela tensão residual introduzida pelo processo.

### 3.4. Rugosidade Superficial

Como é de conhecimento, a condição superficial exerce uma grande influência na vida em fadiga dos componentes mecânicos. Desta forma, após o processo de jateamento, foram realizadas medidas de rugosidade superficial utilizando um equipamento medidor marca MITUTOYO modelo Surftest SJ-201, de maneira a avaliar a influencia da temperatura de jateamento na rugosidade superficial e conseqüentemente na vida em fadiga.

Antes de realizar as leituras, o medidor foi calibrado com o padrão de referência, Figura 3.7, da MITUTOYO com o parâmetro de rugosidade Ra de 2,95μm. Após a calibração, foram apresentados na Tabela 4.2, os valores dos

parâmetros de rugosidade Ra e Rz . As medidas foram realizadas no sentido longitudinal da lâmina, com um curso de medida (CUT-OFF) selecionado em 0,8 x 5, conforme especificado pelo fabricante e apresentados na Figura 3.7.




(a)

(b)

Figura 3.7 – (a) Calibração do Rugosímetro Mitutoyo e (b) Execução da medida de rugosidade na lâmina.

### 3.5. Tensão Residual

A medida da tensão residual introduzida na superfície dos corpos de prova pelo processo de jateamento, foi realizado em um equipamento de difração de Raios X, Figura 3.8.

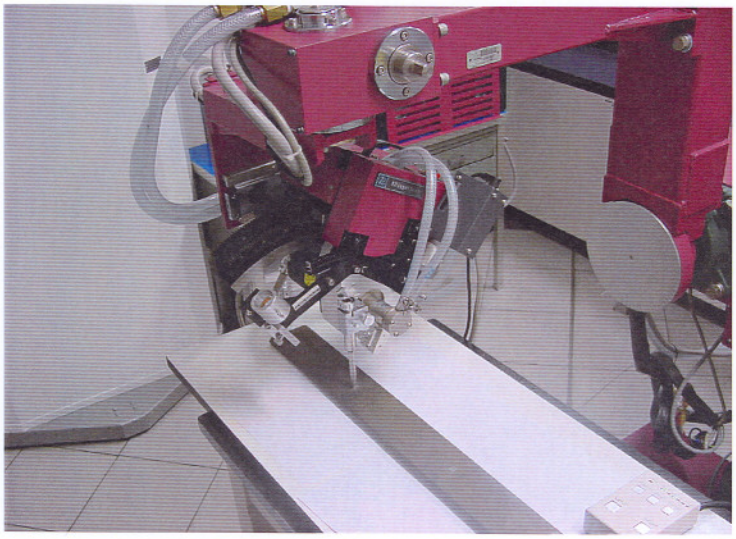


Figura 3.8 – Equipamento para medida da tensão residual.

Antes da medida da tensão residual, o ponto escolhido era polido eletroliticamente como apresentado nas Figuras 3.9 e 3.10.

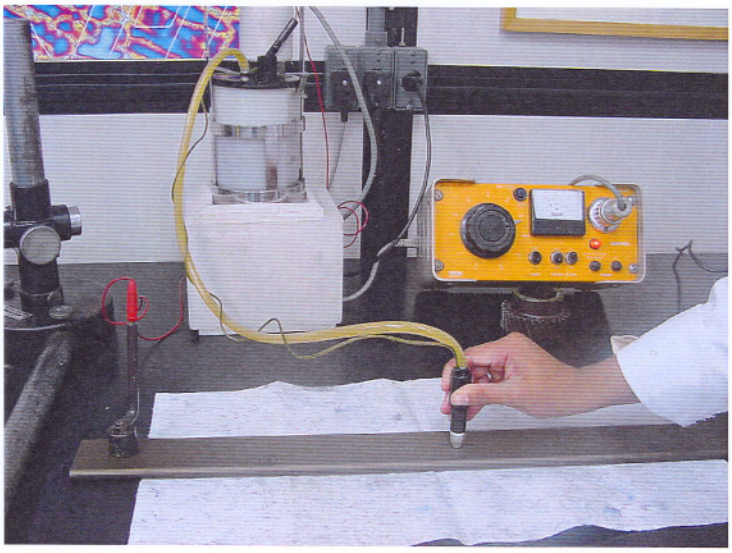


Figura 3.9 – Equipamento realizando polimento eletrolítico com profundidade de 50μm.

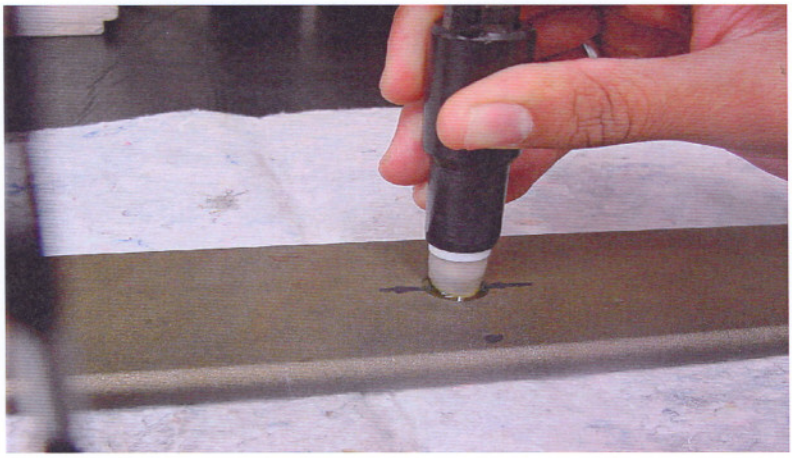


Figura 3.10 – Detalhe do polimento eletrolítico.

O polimento eletrolítico foi necessário para evitar erros de leitura devido a deformações plásticas e formação de óxidos na superfície. Em cada caso, foram realizadas três medidas em diferentes posições da superfície jateada, conforme apresentado nas Figuras 3.11 e 3.12.

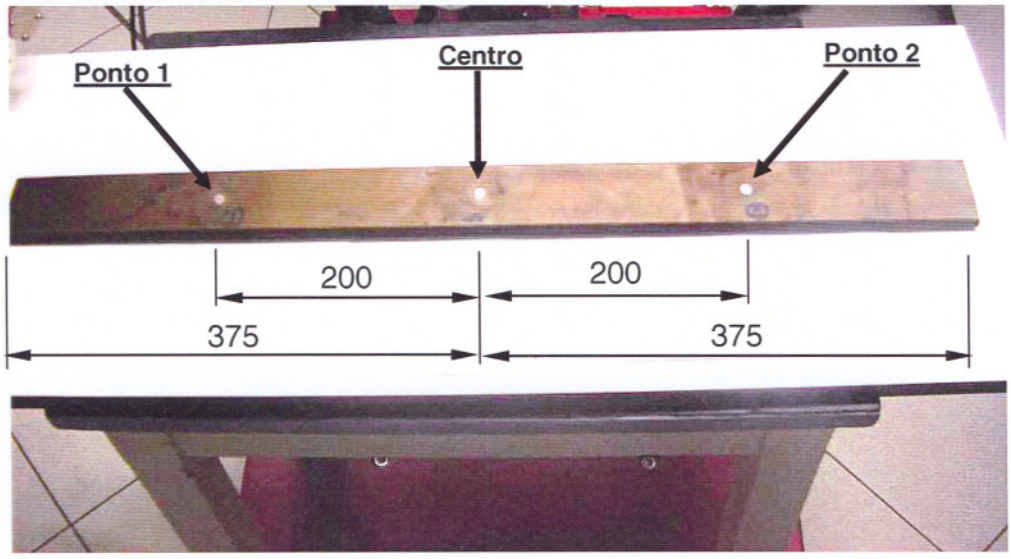



Figura 3.11 – Localização dos pontos para a medida da tensão nas lâminas.

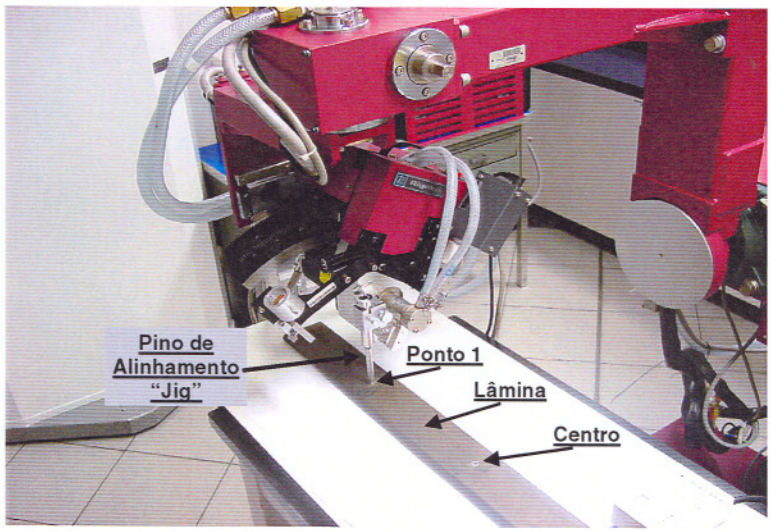



Figura 3.12 – Posicionamento do Ponto 1 na máquina de Raio X, para a medição da tensão residual.

Os pontos para a medida da tensão residual foram definidos como apresentado na Figura 3.11. Os pontos 1 e 2 estão distantes, de 200 mm em cada um dos lados do ponto central que situa-se à 375mm da extremidade da lâmina.

A medida da tensão residual introduzida consiste em posicionar os pontos alinhados e perfeitamente perpendiculares com o emissor de Raios X. É apresentado na Figura 3.12, que o pino de alinhamento chamado de "Jig" de alinhamento é utilizado como referencial no posicionamento do ponto a ser medido.

O cabeçote da máquina de Raio X, faz uma varredura sobre o ponto posicionado como apresentado na Figura 3.12, realizando a varredura com o cabeçote, conforme apresentado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Realização da medida da tensão residual introduzida pelo processo de jateamento.

Após a varredura, os dados são processados e os relatórios são fornecidos por um microcomputador, por meio de um programa apropriado.

## 3.6. Ensaio de Fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados em equipamento de acionamento mecânico, que faz o ensaio em duas lâminas de cada vez, conforme Figura 3.14, sendo registrado o número de ciclos para falhar de cada lâmina. Para este ensaio, os corpos de prova apresentam geometria e dimensões especificadas pelo fabricante.

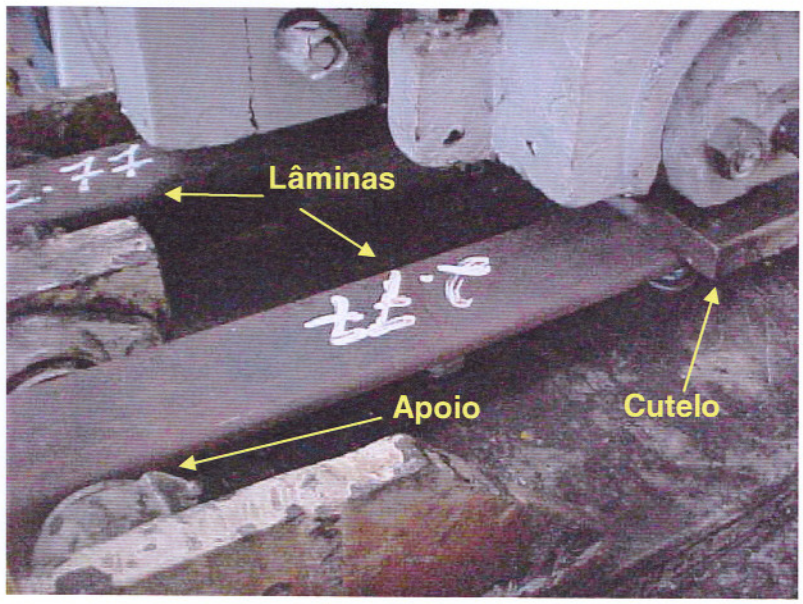



Figura 3.14 – Ensaio de fadiga em duas lâminas.

As lâminas são flexionadas na sua posição de repouso, até que seja alcançado um curso pré-estabelecido, conforme Figura 3.15.

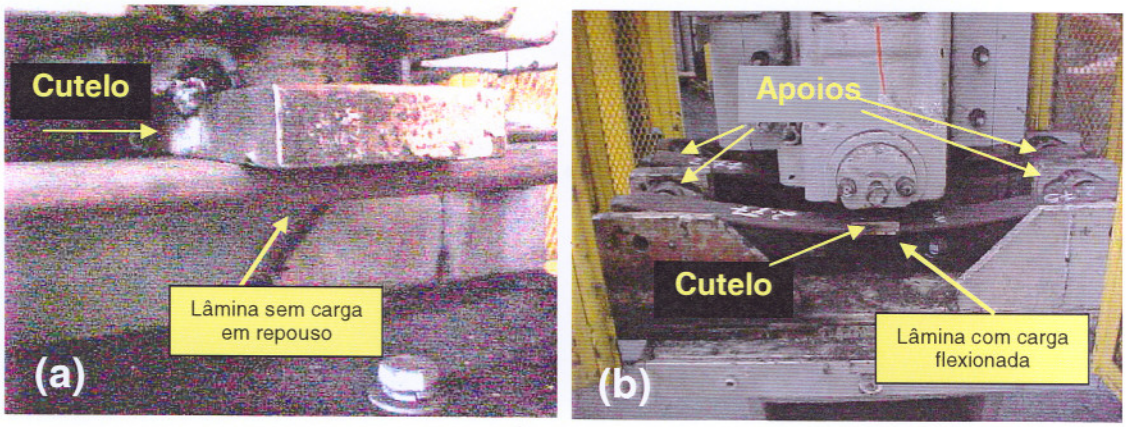



Figura 3.15 – Posição das Lâminas na máquina de ensaio (a) sem carga em repouso e (b) com carga flexionada.

Os ensaios foram realizados em apenas um nível de tensão, para analisar se ocorreram modificações na vida em fadiga relativas às condições de jateamento nas temperaturas de 25°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C e 300°C.

O ensaio foi realizado em um equipamento, submetendo o corpo de prova a um esforço em flexão em três pontos, onde a lâmina (corpo de prova) era colocada sobre dois apoios e uma força aplicada no centro, conforme pode ser observado nas Figura 3.15 e 3.16.

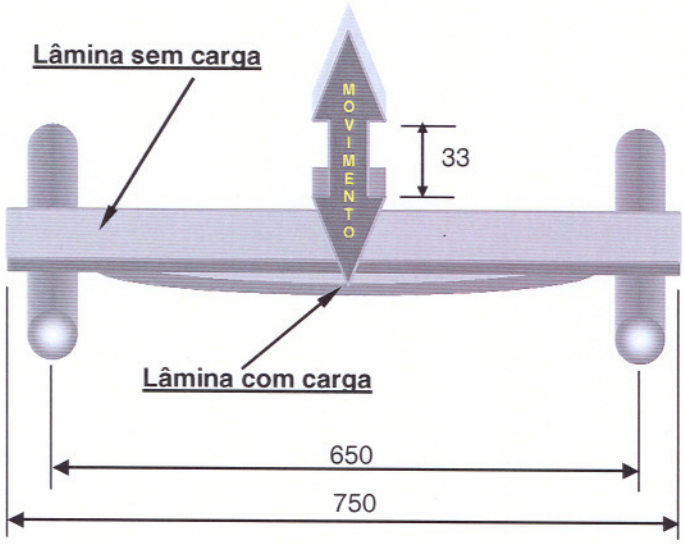



Figura 3.16 – Esquema do ensaio de fadiga.

As duas lâminas apresentaram mesma condição de jateamento nos ensaios simultâneos. A freqüência de ensaio é de 2 Hz e razão de carga R=0.

A distância entre centros dos apoios das lâminas é de 650 mm, e a força é aplicada no centro da lâmina, em um curso de 33 mm, conforme apresenta o esquema apresentado na Figura 3.16. Com este curso, por meio de um programa

do fabricante, é esperada uma vida em torno de 39.000 ciclos, para o jateamento na temperatura de 25$^0$C.

Com o corpo de prova ajustado no equipamento, inicia-se o teste sob flexão em 3 pontos a uma freqüência de 2 Hz. O número de ciclos é registrado por um dispositivo fixado na máquina, conforme pode ser observado na Figura 3.17.

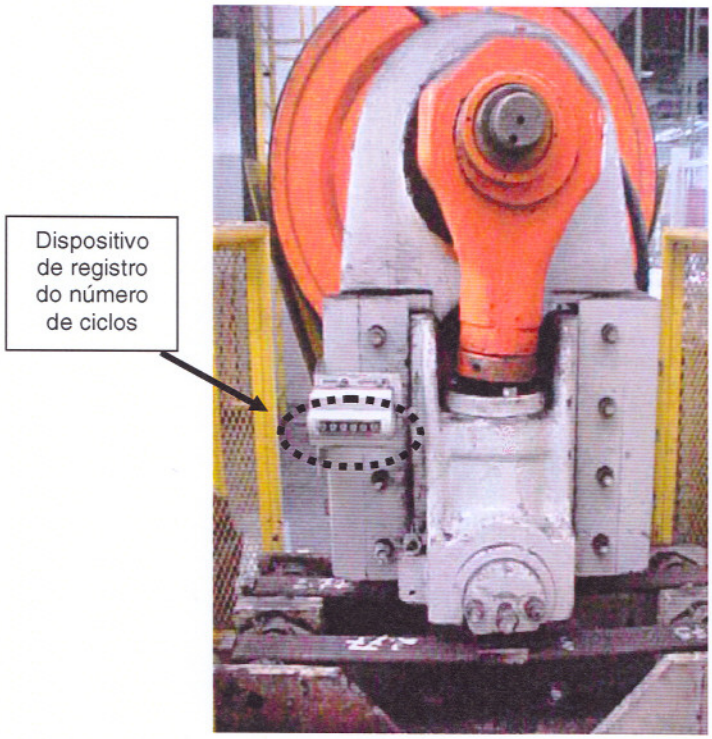



Figura 3.17 – Equipamento para ensaio de fadiga. Seta indica o marcador do número de ciclos.

Com o rompimento do corpo de prova, é registrado o valor do número de ciclos que o corpo de prova resistiu.

Os ensaios foram realizados em todas as condições de jateamento dos corpos de prova e os valores obtidos foram analisados para que fossem avaliadas as influências das condições de tratamento em relação à vida do componente.

Após a ruptura, os corpos tiveram a superfície de fratura retirada, assim como outras amostras, para análise micrográfica e microdureza, conforme apresenta a Figura 3.18.

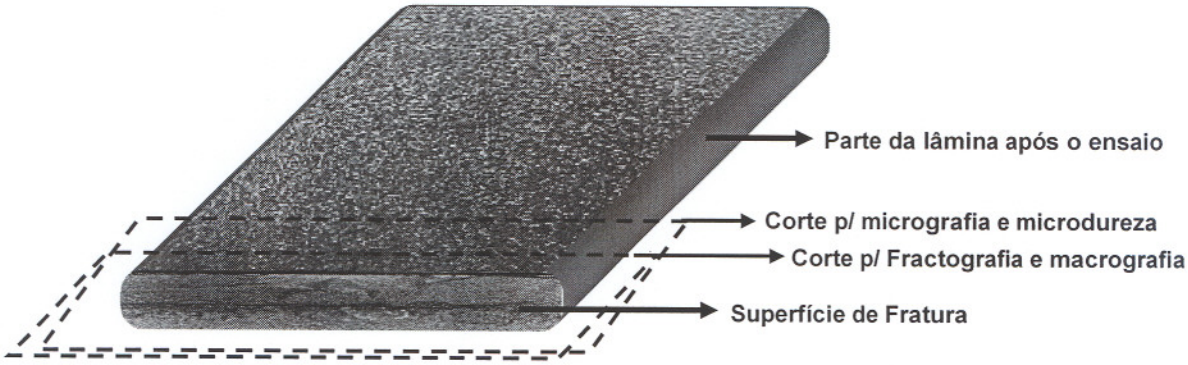



Figura 3.18 – Esquema representando a parte do corpo de prova para retirada onde ocorreu a ruptura e representando também outros dois cortes para a retirada de amostras.

## 3.7. Análise Fratográfica.

As superfícies de fratura dos corpos de prova ensaiados, nas várias condições de jateamento, foram examinadas utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura. Para isto, foi utilizado um microscópio eletrônico ZEISS modelo DNS960.

## 3.8. Análise Micrográfica.

A análise micrográfica foi realizada em um microscópio LEICA com câmera fotográfica incorporada para registro das imagens das amostras retiradas

dos corpos de prova, conforme Figura 3.18. Foram fotografados corpos de prova sem ataque e com ataque químico. O ataque químico para revelar as microestruturas foi realizado com nital 2%.

### 3.9. Análise de Dureza e Microdureza.

Para a análise de dureza foi utilizando um durômetro Vickers com carga de 10 kg.

Para a análise de microdureza foi utilizando um microdurômetro Büehler Micromet série 2100 com carga de 100g e penetrador tipo Knoop.

# 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 4.1. Medidas de Temperatura

Conforme descrito no capítulo anterior, foram medidas as temperaturas nas lâminas antes e depois do tratamento de jateamento, por meio de um medidor de temperatura marca GULTON DO BRASIL LTDA modelo GUL term 1200 utilizando termopar tipo K. Os valores médios da variação da temperatura são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. – Valores médios das variações de temperatura no processo.

| Condição | Temperatura de Entrada (°C) | Temperatura de Saída (°C) | Média da Variação (°C) | Desvio Padrão |
|---|---|---|---|---|
| C (100°C) | 103 | 100 | 101,5 | 2,12 |
| D (150°C) | 152 | 142 | 147,0 | 7,07 |
| E (200°C) | 202 | 175 | 188,5 | 19,09 |
| F (250°C) | 253 | 218 | 235,5 | 24,75 |
| G (300°C) | 296 | 253 | 274,5 | 30,41 |

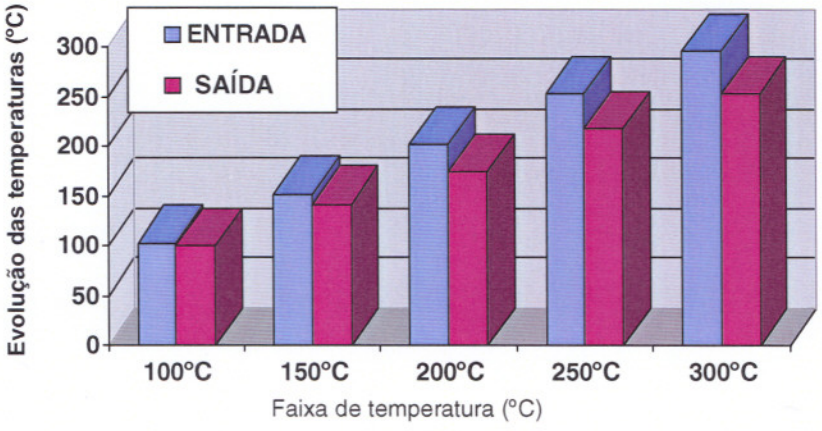



Figura 4.1 – Gráfico com a variação das temperaturas inicial e final no processo de jateamento.

Conforme apresenta a Figura 4.1 e a Tabela 4.1, houve uma redução da temperatura do corpo de prova durante o processo de jateamento e quanto maior a temperatura, maior a diferença entre a temperatura inicial e final dos corpos de prova. Desta forma, será considerada somente a temperatura de entrada, como referência, neste estudo.

## 4.2. Rugosidade dos Corpos de Prova.

Após o processo de jateamento, foram realizadas medidas de rugosidade superficial utilizando um aparelho marca MITUTOYO modelo Surftest SJ-201. Após a calibração do instrumento, foram obtidos os dados conforme a Tabela 4.3.

A análise da rugosidade nos parâmetros Ra e Rz, Figura 4.2 e 4.3 respectivamente, são os parâmetros utilizados pela empresa no controle de qualidade. A Tabela 4.2 apresenta a média dos parâmetros da rugosidade realizado da Tabela 4.3.

Tabela 4.2 – Valores médios da rugosidade em função das condições do processo de Jateamento. Obs: os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

| Condição | Temperatura (°C) | Ra (μm) | Rz (μm) |
|---|---|---|---|
| A | 25 | 3,69 (0,44) | 20,20 (3,06) |
| B | 25 | 3,09 (0,01) | 17,10 (0,90) |
| C | 100 | 3,98 (0,21) | 21,66 (1,42) |
| D | 150 | 4,25 (0,41) | 22,42 (2,34) |
| E | 200 | 4,55 (0,01) | 24,07 (3,35) |
| F | 250 | 5,03 (0,49) | 25,35 (3,27) |
| G | 300 | 5,17 (0,53) | 26,82 (3,22) |

Tabela 4.3 – Medida dos parâmetros de rugosidade em função das condições do processo de Jateamento.

| Condição de Jateamento | Temperatura (°C) | Dureza $d_{Brinell}$ (mm) | Rugosidade Superficial(μm) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Ra | Rz |
| A | 25 | 2,77 | 3,69 | 21,94 |
| | | 2,77 | 3,12 | 15,65 |
| | | 2,77 | 4,18 | 21,17 |
| | | 2,77 | 3,76 | 22,03 |
| B | 25 | 2,85 | 3,03 | 17,66 |
| | | 2,85 | 2,84 | 16,99 |
| | | 2,84 | 3,39 | 17,48 |
| | | 2,83 | 3,11 | 16,26 |
| C | 100 | 2,84 | 4,22 | 23,23 |
| | | 2,84 | 4,07 | 21,12 |
| | | 2,84 | 3,76 | 22,32 |
| | | 2,84 | 3,86 | 19,97 |
| D | 150 | 2,85 | 4,90 | 26,90 |
| | | 2,85 | 4,00 | 20,05 |
| | | 2,85 | 4,60 | 23,02 |
| | | 2,85 | 4,35 | 22,23 |
| E | 200 | 2,84 | 4,68 | 24,19 |
| | | 2,84 | 4,56 | 27,22 |
| | | 2,84 | 4,33 | 20,59 |
| | | 2,84 | 4,63 | 24,28 |
| F | 250 | 2,85 | 5,10 | 26,23 |
| | | 2,85 | 5,14 | 24,58 |
| | | 2,85 | 4,71 | 25,20 |
| | | 2,85 | 5,16 | 25,40 |
| G | 300 | 2,82 | 5,15 | 26,06 |
| | | 2,83 | 5,16 | 28,10 |
| | | 2,78 | 5,00 | 25,36 |
| | | 2,82 | 5,38 | 27,75 |

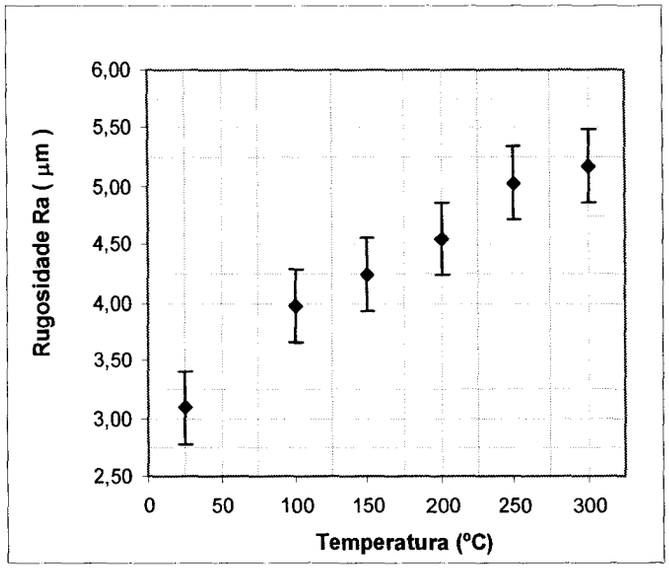



Figura 4.2 – Gráfico com valores médios da rugosidade superficial, parâmetro Ra, em função da temperatura do jateamento, considerando-se as condições B, C, D, E , F e G.

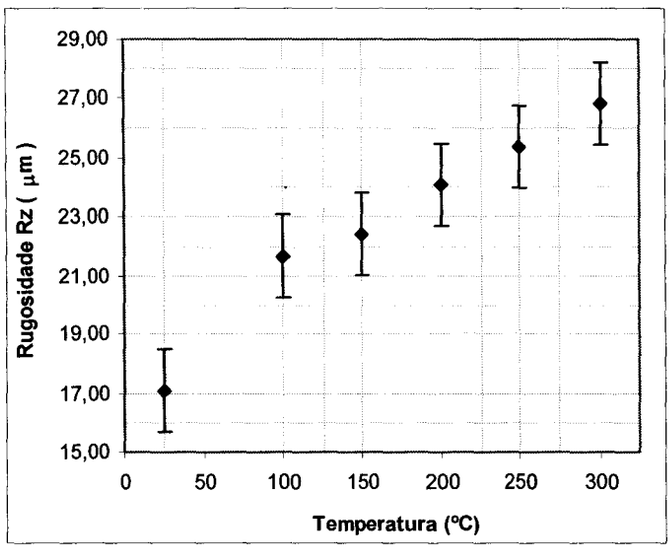



Figura 4.3 – Gráfico com valores médios da rugosidade superficial, parâmetro Rz, em função da temperatura do jateamento, considerando-se as condições B, C, D, E , F e G.

Analisando-se as Tabelas 4.2 e 4.3, e as Figuras 4.2 e 4.3, conclui-se que, a rugosidade superficial do corpo de prova aumenta com o aumento da temperatura do corpo de prova no processo de jateamento.

## 4.3. Tensão Residual

A medida das tensões residuais introduzidas nos corpos de prova pelo jateamento foi realizada em um equipamento de difração de raios X. Os valores da tensão residual dos três pontos de medição previamente escolhidos em cada corpo de prova, bem como a sua média e desvio padrão são apresentados na Tabela 4.4. A Tabela 4.5 apresenta a média da tensão residual por temperatura de jateamento, sendo estes dados apresentados na forma de gráfico na Figura 4.4.

Tabela 4.4. – Valores das medidas de tensão residual.

| **Temperatura de jateamento (°C)** | **Tensão Residual Transversal (MPa)** | | |
|---|---|---|---|
| | **Ponto 1** | **Centro** | **Ponto 2** |
| **25** | -572 | -516 | -506 |
| | -586 | -569 | -545 |
| **100** | -629 | -570 | -590 |
| **150** | -636 | -533 | -668 |
| | -633 | -517 | -515 |
| **200** | -605 | -631 | -597 |
| | -556 | -607 | -562 |
| | -561 | -471 | -538 |
| | -597 | -478 | -529 |
| **250** | -468 | -486 | -497 |
| **300** | -450 | -458 | -412 |

Tabela 4.5. – Média dos valores da tensão residual, por temperatura de jateamento.

| Temperatura (°C) | Tensão Residual (MPa) | Desvio Padrão |
|---|---|---|
| 25 | -549 | 32 |
| 100 | -596 | 29 |
| 150 | -583 | 69 |
| 200 | -561 | 51 |
| 250 | -484 | 15 |
| 300 | -440 | 24 |

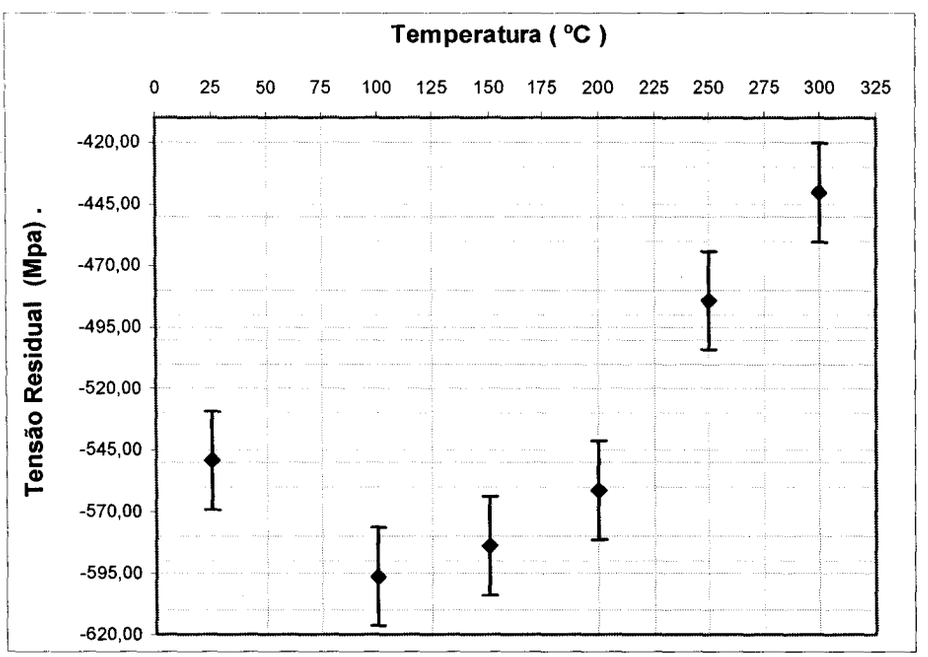



Figura 4.4. – Valores médios da tensão residual em função da temperatura de jateamento.

Analisando as Tabelas 4.4 e 4.5 e a Figura 4.4, pode ser observado que para as condições de jateamento utilizadas neste trabalho, à medida que a temperatura de jateamento foi sendo elevada, ocorreu uma redução no nível das tensões residuais compressivas introduzidas pelo jateamento por granalhas. Em

temperaturas de aproximadamente 100 ± 25 °C e, foram obtidos os valores máximos de tensão residual compressiva, aproximadamente -600 MPa, sendo este valor reduzido para aproximadamente -450 MPa quando a temperatura foi elevada para 300 °C. Este resultado era esperado uma vez que a medida que a temperatura de jateamento é elevada o limite de escoamento é reduzido e sendo a intensidade da tensão residual diretamente dependente do limite de escoamento a medida que este é reduzido a intensidade de tensão residual é reduzida(Totten et al., 2002).

## 4.4. Análise Fractográfica

### 4.4.1 Macrografia

De maneira a avaliar o posicionamento preferencial dos sítios de início das trincas formadas durantes os ensaios de fadiga, foi realizado uma análise geral das superfícies de fratura. Desta forma, uma análise macrográfica foi realizada utilizando-se um microscópio ótico estereoscópico. Exemplos dos diferentes locais preferenciais de nucleação são apresentados nas Figuras 4.5 a 4.8. Foi constatado que alguns sítios de nucleação de trinca ocorreu no centro da lâmina (Figs. 4.5 e 4.6), outros próximo dos cantos (Fig. 4.7) e em alguns casos foram também formados sítios múltiplos (Fig. 4.8).

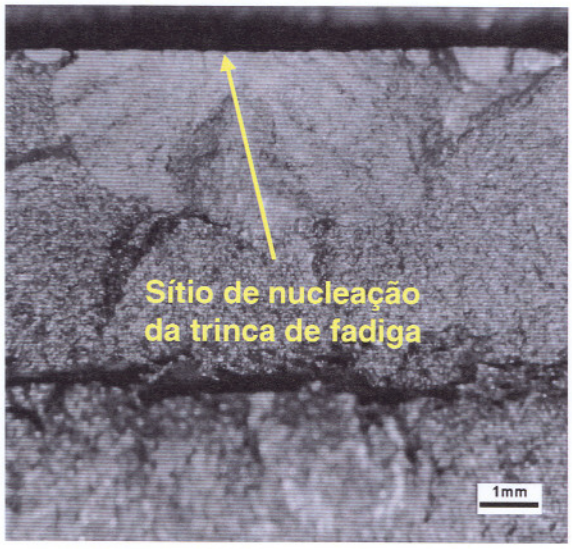



Figura 4.5 – Posicionamento no centro da lâmina. A seta amarela aponta para o local do sítio de nucleação da trinca de um corpo de prova jateado na temperatura ambiente, condição A.

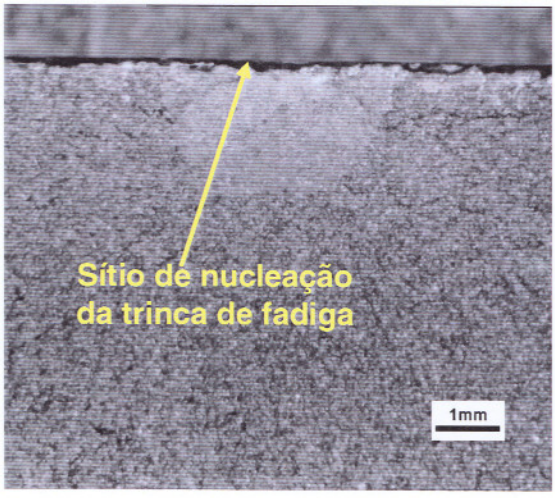



Figura 4.6 – Posicionamento no centro da lâmina. A seta amarela aponta para o local do sítio de nucleação da trinca de um corpo de prova jateado à temperatura 100°C, condição C.

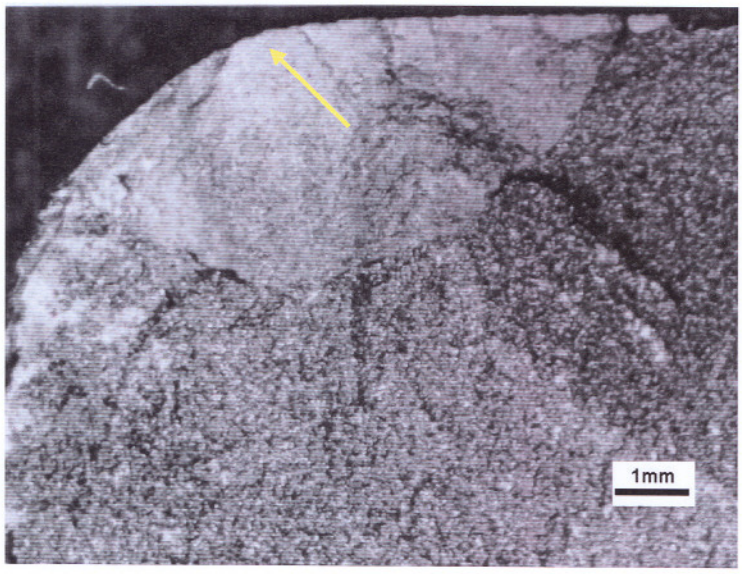



Figura 4.7 – A seta amarela indica o local do sítio de nucleação da trinca, jateado na temperatura de 200°C, condição E.

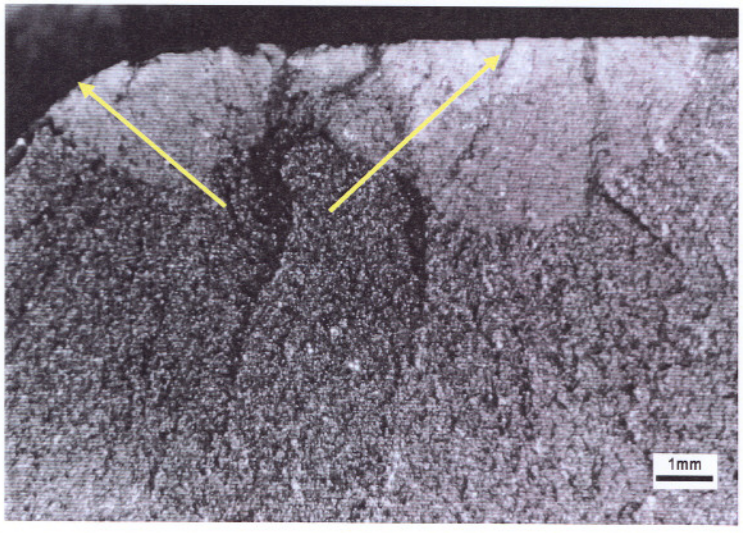



Figura 4.8 – As setas indicam os dois sítios de nucleação de duas trincas que se uniram e formaram a trinca principal. Corpo de prova jateado à temperatura de 150°C, condição de jateamento D.

Ainda que seja esperado que as trincas exibissem uma preferência pela nucleação nas bordas, Figura 4.7, pelo efeito de concentração de tensões que normalmente ocorrem nestas regiões, uma significativa quantidade de sítios foram localizados no centro dos corpos de prova, Figura 4.6. Isto foi decorrente do fato de que, nestes casos, a rugosidade provocada pelo jateamento sobre os corpos de provas, induziu localmente uma maior concentração de tensão do que a causada pelo efeito de borda, que possuía um raio de curvatura justamente para redução deste efeito.

Quanto à formação de sítios múltiplos, Figura 4.8, é de conhecimento que basta que um ou mais locais na superfície estarem sujeitos a similares concentradores de tensões que a formação de nucleação de múltiplas trincas poderá ocorrer. Isto acontece na existência conjugada de defeitos superficiais de geometrias e tensões diferentes ou similares, causando concentradores de tensões similares.

### 4.4.2 Análise em Microscopia Eletrônica de Varredura (M.E.V.).

As superfícies de fratura dos corpos de prova ensaiados, nas várias condições de jateamento, foram analisadas utilizando-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura. As superfícies de fratura bem como os sítios de nucleação da trinca por fadiga foram examinados e não apresentaram variação física significativa em função das temperaturas de jateamento. Desta forma, somente alguns exemplos são mostrados nas Figuras 4.9 até 4.13.

A Figura 4.9 mostra o aspecto geral de uma superfície de fratura de um corpo de prova jateado na temperatura ambiente, condição B, onde é possível observar um único e bem definido sítio formado na superfície a partir de uma endentação causada pelas esferas, Figura 4.10.

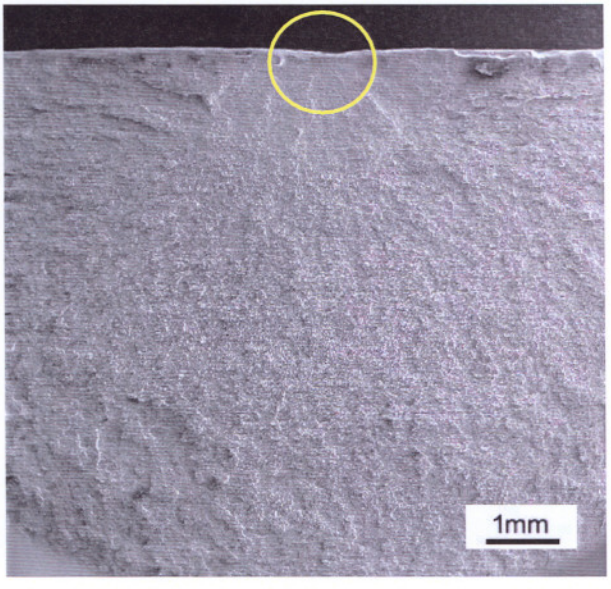



Figura 4.9 – Área da nucleação da trinca de fadiga no corpo de prova jateado na temperatura ambiente, condição B.

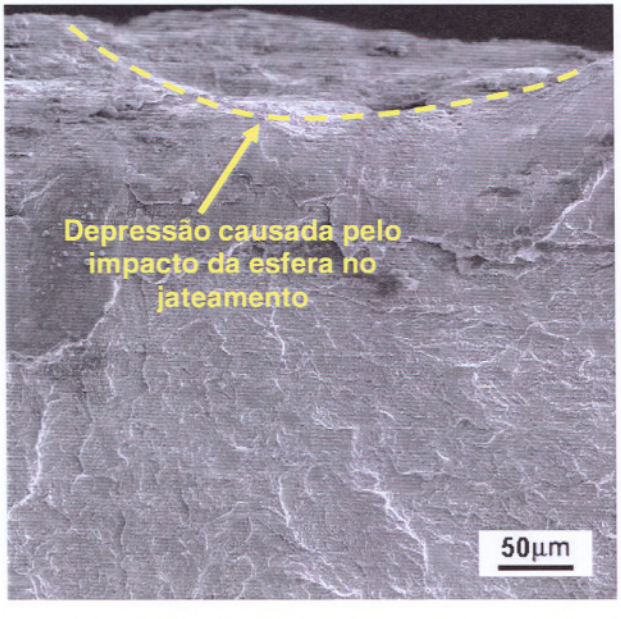



Figura 4.10 – Detalhe do sítio de nucleação apresentado na figura anterior, mostrando que a trinca foi iniciada a partir de uma depressão causada pelo processo de jateamento (rugosidade).

Estas endentações de jateamento são formadas como ilustrado nas Figuras 2.5 e 2.6 e na grande maioria das vezes são responsáveis pela formação dos sítios de nucleação das trincas de fadiga. A Figura 4.11 apresenta detalhes da região de propagação onde se observa a formação de estrias de fadiga, comprovando que o processo de falha se deu por fadiga.

A Figura 4.12 apresenta o aspecto geral da superfície de fratura de um corpo de prova jateado na temperatura de 200 °C, condição E. Novamente, pode ser observada a formação de múltiplos sítios de nucleação de trincas no centro do corpo de prova. A Figura 4.13 apresenta detalhes destes sítios.

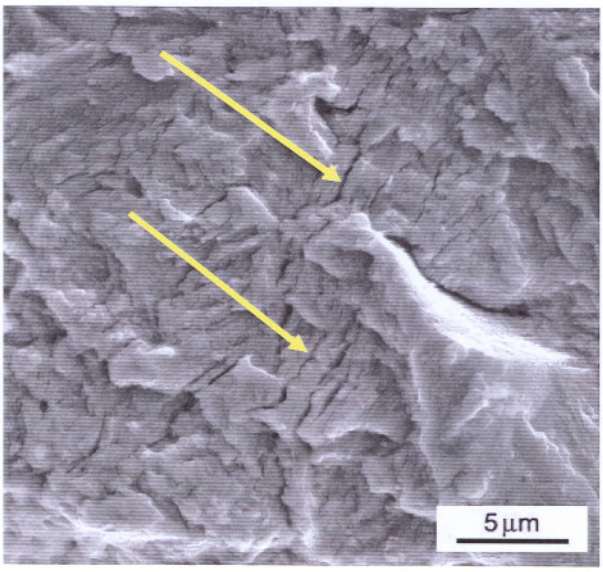



Figura 4.11 – Detalhe da região de propagação da trinca no estágio 2. As setas indicam a formação de estrias de fadiga. Condição B, jateamento à temperatura ambiente.

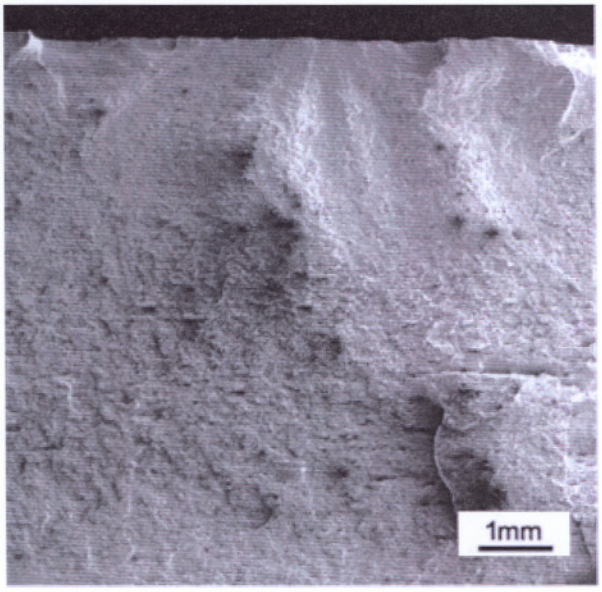



Figura 4.12 – Área da nucleação da trinca por fadiga na condição E de jateamento, à temperatura de 200°C.

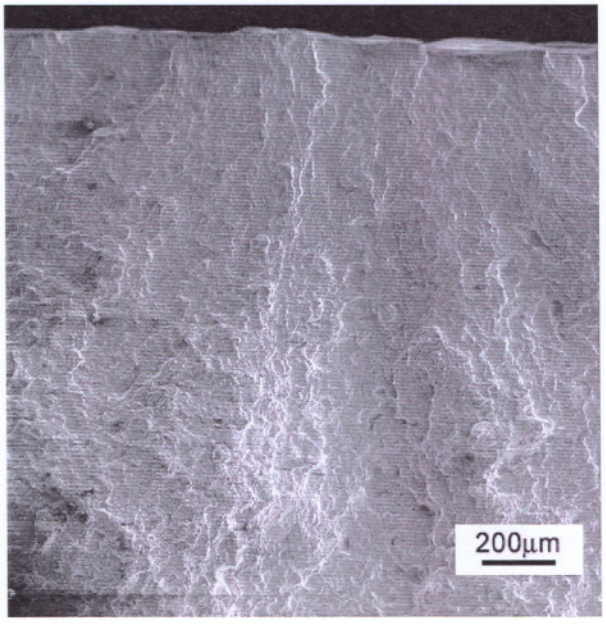
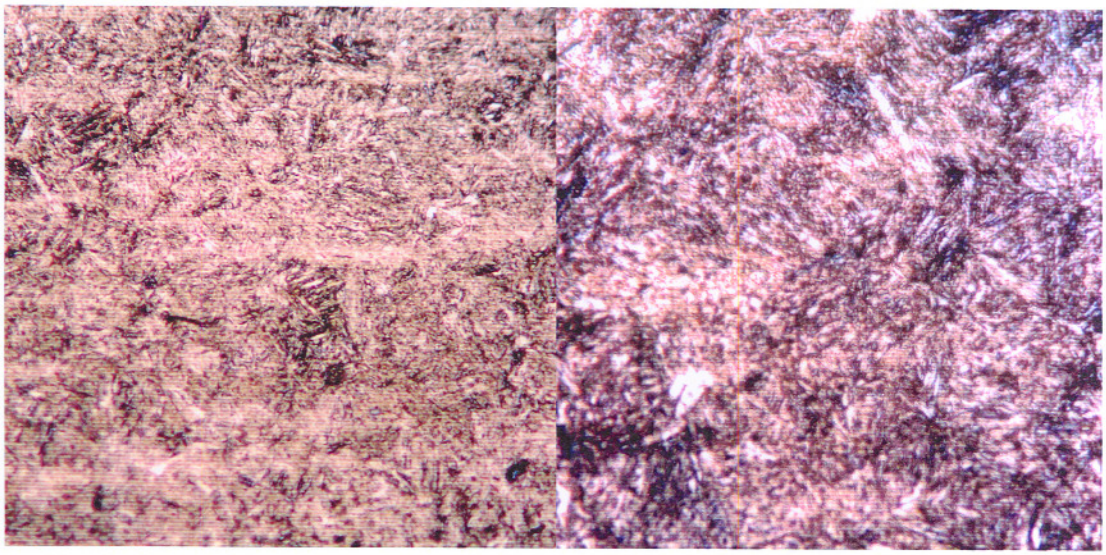



Figura 4.13 – Detalhe da figura anterior, mostrando os vários sítios de nucleação das trincas.

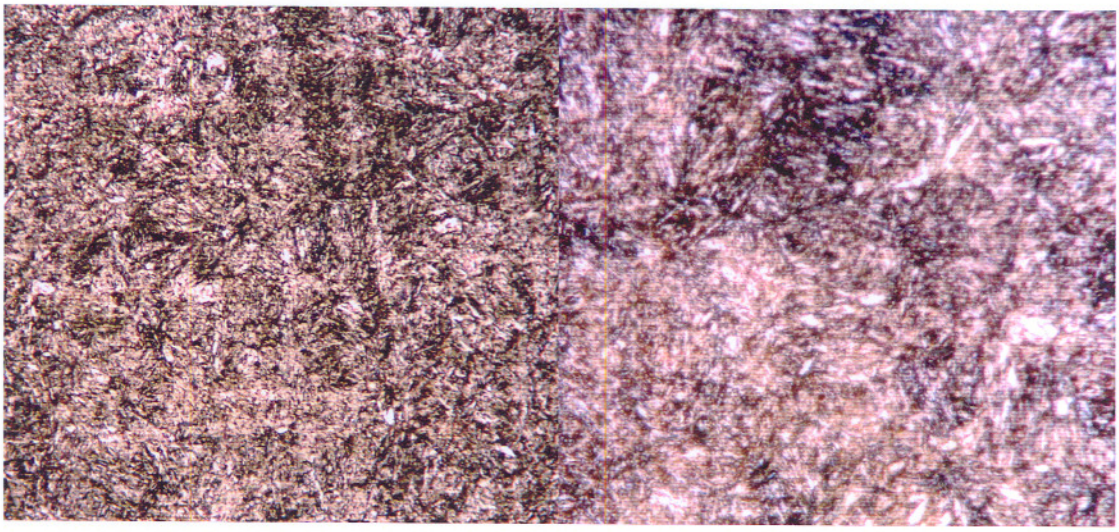
## 4.5. Análise Metalográfica e Dureza

Após a ruptura dos corpos de prova de fadiga, foram removidas amostras para análise microestrutural para verificação se o aquecimento para o jateamento fora da temperatura ambiente causou alterações microestruturais que pudessem afetar a vida em fadiga. As Figuras 4.14 a 4.18 apresentam detalhes das microestruturas em função da temperatura de jateamento.



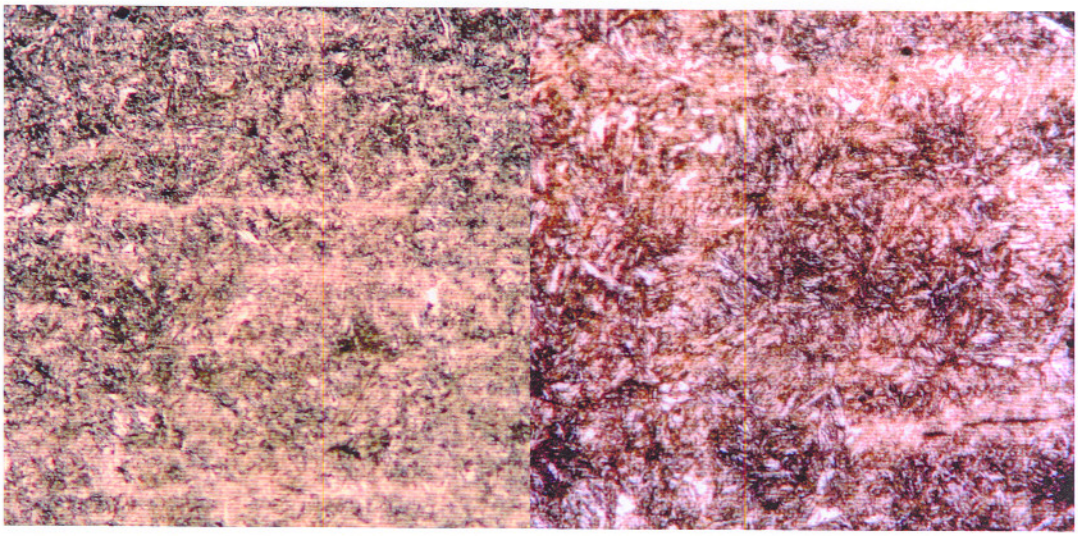
(a) (b)

Figura 4.14 – Detalhe da microestrutura do corpo de prova na condição A de jateamento, na temperatura de 25°C e dureza 528HV ($d_{Brinell}$~2,75mm). Ataque nital 2%. Aumento: (a) 500x e (b) 1000x.



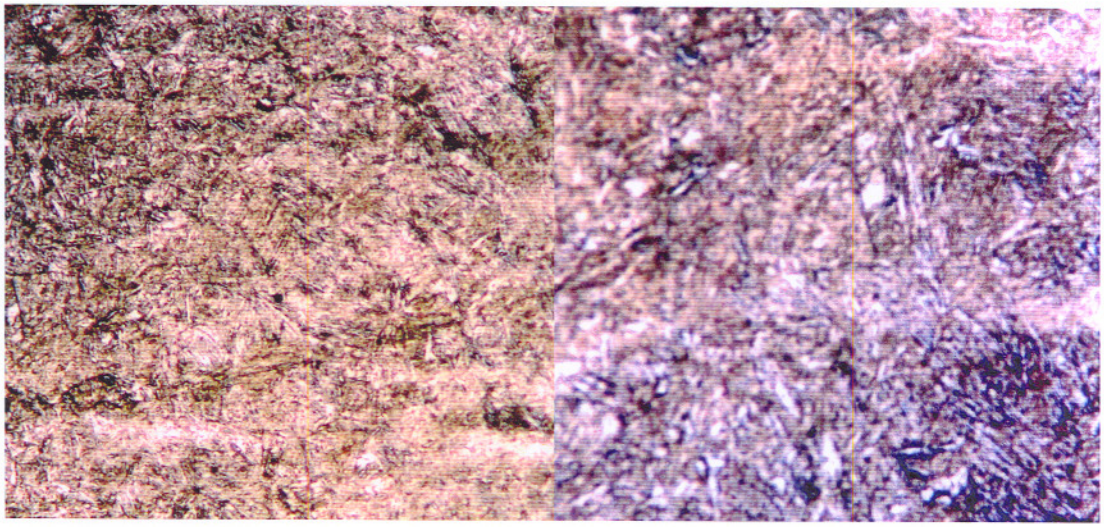
(a) (b)

Figura 4.15 – Detalhe da microestrutura do corpo de prova na condição B de jateamento, na temperatura de 25°C e dureza 491HV ($d_B$~2,85). Ataque nital 2%. Aumento: (a) 500x e (b) 1000x.



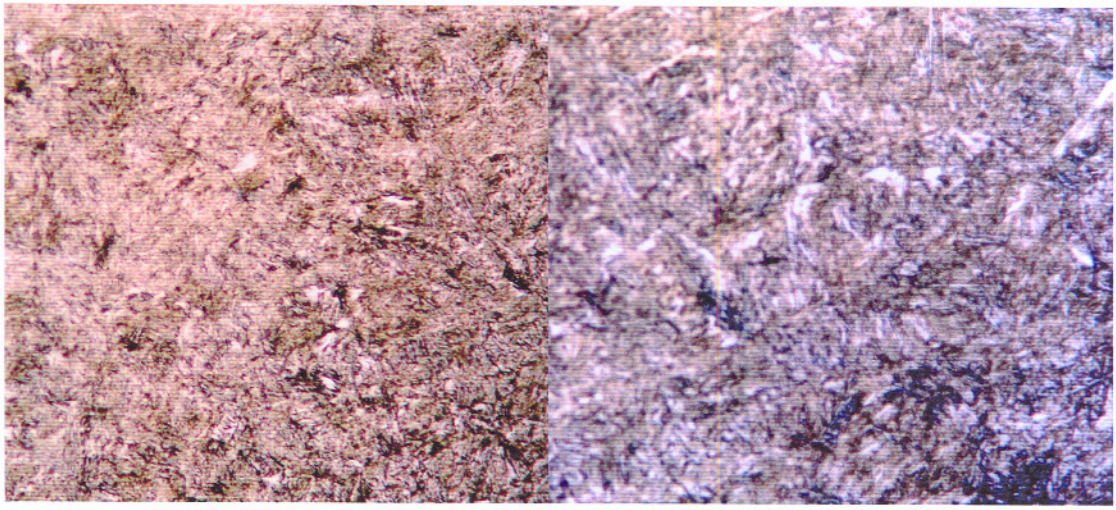
(a) (b)

Figura 4.16 – Detalhe da microestrutura do corpo de prova na condição C de jateamento, na temperatura de 100°C e dureza 491HV ($d_B$~2,85). Ataque nital 2%. Aumento: (a) 500x e (b) 1000x.



(a) (b)

Figura 4.17 – Detalhe da microestrutura do corpo de prova na condição E de jateamento, na temperatura de 200°C e dureza 491HV ($d_B$~2,85). Ataque nital 2%. Aumento: (a) 500x e (b) 1000x.



(a) (b)

Figura 4.18 – Detalhe da microestrutura do corpo de prova na condição G de jateamento, na temperatura de 300°C e dureza 491HV ($d_B$~2,85). Ataque nital 2%. Aumento: (a) 500x e (b) 1000x.

Pode ser observado que a microestrutura do aço SAE 5160 após tratamento térmico de tempera e revenido conforme especificação do fabricante é composta de martensita de alto teor de carbono, revenida, com durezas nos limites de 491HV ($d_{Brinell}$ = 2,85mm) e 528HV ($d_{Brinell}$ = 2,75mm), apresentadas respectivamente nas Figuras 4.14 e 4.15. A partir da Figura 4.16 à Figura 4.18, pode ser observado que as temperaturas de jateamento de 100, 200, e 300 °C associada a um tempo de encharque e jateamento não superior a 15 minutos, não foi suficiente para causar mudanças microestruturais que pudessem ser notadas pela análise em microscópio ótico ou pelo ensaio de dureza Vickers, Tabela 4.6. Desta forma, as microestruturas são formadas por martensita revenida com uma dureza média de 509 HV, microestrutura esta, similar à microestrutura após jateamento à temperatura ambiente.

Tabela 4.6 – Medida da dureza Vickers em cinco pontos diferentes do corpo de prova.

| | **Dureza Vickers (HV) 10kg** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Temperatura** | **Medida 1** | **Medida 2** | **Medida 3** | **Medida 4** | **Medida 5** | **Média** | **Desvio Padrão** |
| 25°C (a) | 508 | 508 | 508 | 508 | 508 | 508 | 0,0 |
| 25°C (b) | 473 | 473 | 478 | 478 | 478 | 476 | 2,7 |
| 100°C | 508 | 508 | 508 | 508 | 508 | 508 | 0,0 |
| 150°C | 450 | 450 | 450 | 473 | 473 | 459 | 12,6 |
| 200°C | 508 | 508 | 508 | 508 | 508 | 508 | 0,0 |
| 250°C | 473 | 450 | 473 | 450 | 450 | 459 | 12,6 |
| 300°C | 459 | 468 | 468 | 459 | 468 | 465 | 4,9 |

(a) Corpos de prova com jateamento na **Condição A**.

(b) Corpos de prova com jateamento na **Condição B**.

### 4.6. Fadiga

Como as molas de autoveículos são principalmente solicitas em carregamentos flexurais dinâmicos, foram executados ensaios de fadiga do tipo flexão três pontos, com amplitudes constantes e freqüência 2 Hz e razão de carga,

R = 0. A sistemática e o equipamento de ensaio de fadiga foram os mesmos utilizados pelo fabricante na avaliação da vida em fadiga de seus componentes.

Neste trabalho foi escolhido um nível de tensão, o qual foi previamente determinado pela engenharia do fabricante de 610 MPa baseado nas cargas máximas de projeto do componente mola, pois a idéia era aumentar o desempenho do componente, atualmente submetido ao processo de jateamento superficial a temperatura ambiente (procedimento normal do fabricante), pela alteração da temperatura de jateamento.

Recentemente, tem sido discutida por alguns pesquisadores TANGE et al (1999), a possibilidade do aumento da vida em fadiga pela execução do jateamento em temperaturas mais elevadas. Entretanto, isto tem criado algumas controvérsias a respeito, pois ao mesmo tempo em que a elevação da temperatura pode proporcionar um aumento do encruamento pela diminuição do limite de escoamento dos aços facilitando a deformação plástica e permitindo um maior encruamento superficial, ela pode causar a redução do nível de tensão residual compressiva devido à redução do limite de escoamento e pelo alívio causado pela elevação da temperatura. Assim, é necessário avaliar qual seria a melhor temperatura que pudesse promover um aumento da vida em fadiga em função da maximização dos níveis das tensões residuais compressivas e do encruamento superficial. Desta forma vários conjuntos de corpos de prova do aço SAE 5160, com a mesma dureza após os tratamentos de têmpera e revenido foram jateados nas temperaturas de 100, 150, 200, 250 e 300 °C. Para efeito de comparação, foi também determinada a vida em fadiga do componente mola sem o jateamento por granalhas.

Como pode ser observado na Tabela 4.7, existe uma melhora significativa na vida em fadiga quando as molas são submetidas ao processo de jateamento, passando a vida em fadiga de aproximadamente 8400 ciclos para 46.154 ciclos,

um aumento de aproximadamente 5,5 vezes. Este aumento é atribuído as tensões residuais compressivas introduzidas e ao endurecimento superficial devido à deformação plástica, ambos originados pelo jateamento com granalhas.

Segundo COURTNEY (2000), o jateamento é usado para melhorar o comportamento de materiais em fadiga, pois causa uma deformação plástica local, normalmente na superfície do material, que aumenta a tensão compressiva na superfície. Com isto, há um acréscimo do tempo para a nucleação de uma trinca, aumentando a vida em fadiga.

Pode ser observado ainda, que pelo simples fato de se usar corpos de prova com dureza após os tratamentos térmicos de têmpera e revenido com valor mínimo de 491 Vickers e máximo de 528 Vickers, especificados como valores extremos do limite de durezas de projeto antes do jateamento por granalhas causa um aumento na vida em fadiga de aproximadamente 46154 para 155038 ciclos, um aumento de aproximadamente 3 vezes. Isto é devido ao fato de que no caso de fadiga de alto ciclo, os limites de escoamento mais elevados promovem uma vida em fadiga maior pelo simples fato de que um limite de escoamento maior dificulta os mecanismos de intrusão e extrusão responsáveis pela nucleação de trincas superficiais nos metais. Este aumento é devido ao aumento do encruamento (ancoramento e aumento da densidade das discordâncias).

Comparando agora os resultados da vida em fadiga dos corpos de prova jateados à temperatura ambiente, com os jateados em temperaturas mais elevadas, ver Tabela 4.7, Tabela 4.8 e Figura 4.19, pode ser observado que à medida que a temperatura de jateamento é aumentada a vida em fadiga ficou maior, passando por um máximo na temperatura de 200 °C e decrescendo quando a temperatura foi aumentada para 300 °C.

Tabela 4.7 – Dados dos ensaios de fadiga.

| Condição | Temperatura (°C) | Dureza ($d_{Brimell}$) mm | Fadiga (ciclos) |
|---|---|---|---|
| Sem Jateamento | 25 | 2,84 | 3698 |
| | | 2,83 | 8733 |
| | | 2,77 | 10730 |
| | | 2,77 | 10424 |
| A | 25 | 2,77 | 156830 |
| | | 2,77 | 153245 |
| | | 2,77 | 156830 |
| | | 2,77 | 153245 |
| B | 25 | 2,85 | 29292 |
| | | 2,85 | 66230 |
| | | 2,84 | 28008 |
| | | 2,83 | 61084 |
| C | 100 | 2,84 | 61084 |
| | | 2,84 | 109631 |
| | | 2,84 | 60055 |
| | | 2,84 | 65212 |
| D | 150 | 2,85 | 197807 |
| | | 2,85 | 131487 |
| | | 2,85 | 122237 |
| | | 2,85 | 198685 |
| E | 200 | 2,84 | 511937 |
| | | 2,84 | 445847 |
| | | 2,84 | 541902 |
| | | 2,84 | 403547 |
| F | 250 | 2,85 | 198311 |
| | | 2,85 | 113289 |
| G | 300 | 2,82 | 136430 |
| | | 2,83 | 73147 |
| | | 2,78 | 83147 |

Tabela 4.8 – Média e desvio padrão do número de ciclos dos corpos de prova para cada condição de ensaio.

| Condição | Temperatura (°C) | $D_{Brinell}$ média(mm) | Média dos Ciclos | Desvio Padrão |
|---|---|---|---|---|
| Sem Jateamento | 25 | 2,80 | 8.396 | 3.253 |
| A | 25 | 2,77 | 155.038 | 2.070 |
| B | 25 | 2,84 | 46.154 | 20.327 |
| C | 100 | 2,84 | 73.996 | 23.861 |
| D | 150 | 2,85 | 162.554 | 41.388 |
| E | 200 | 2,84 | 475.808 | 62.698 |
| F | 250 | 2,85 | 155.800 | 60.119 |
| G | 300 | 2,81 | 97.575 | 34.019 |

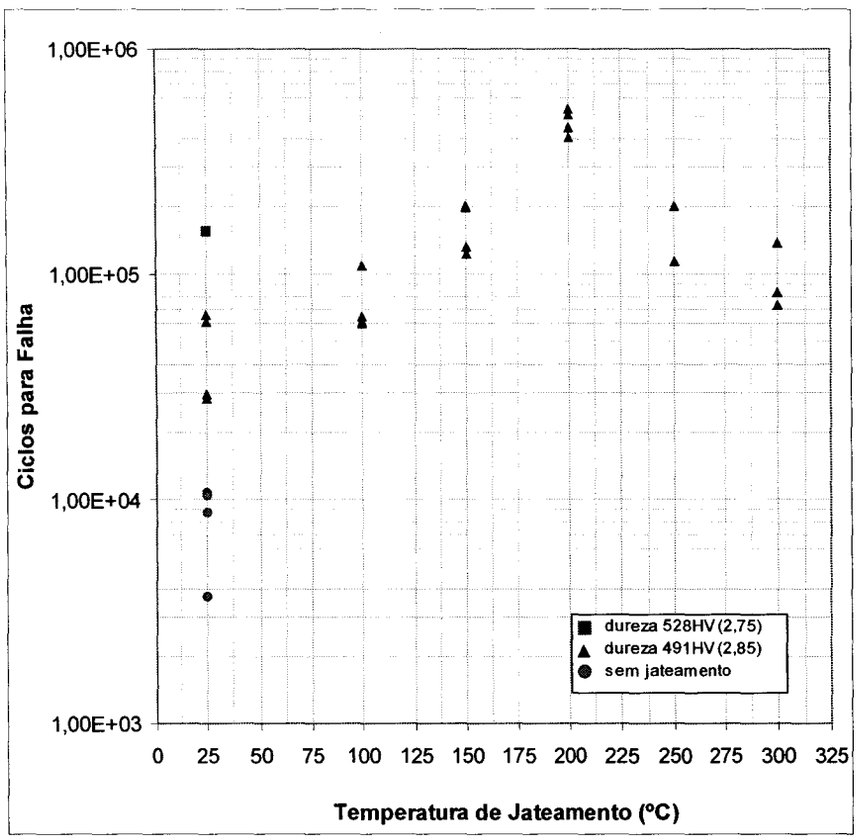



Figura 4.19 – Ciclos para falhar em função da temperatura de jateamento.

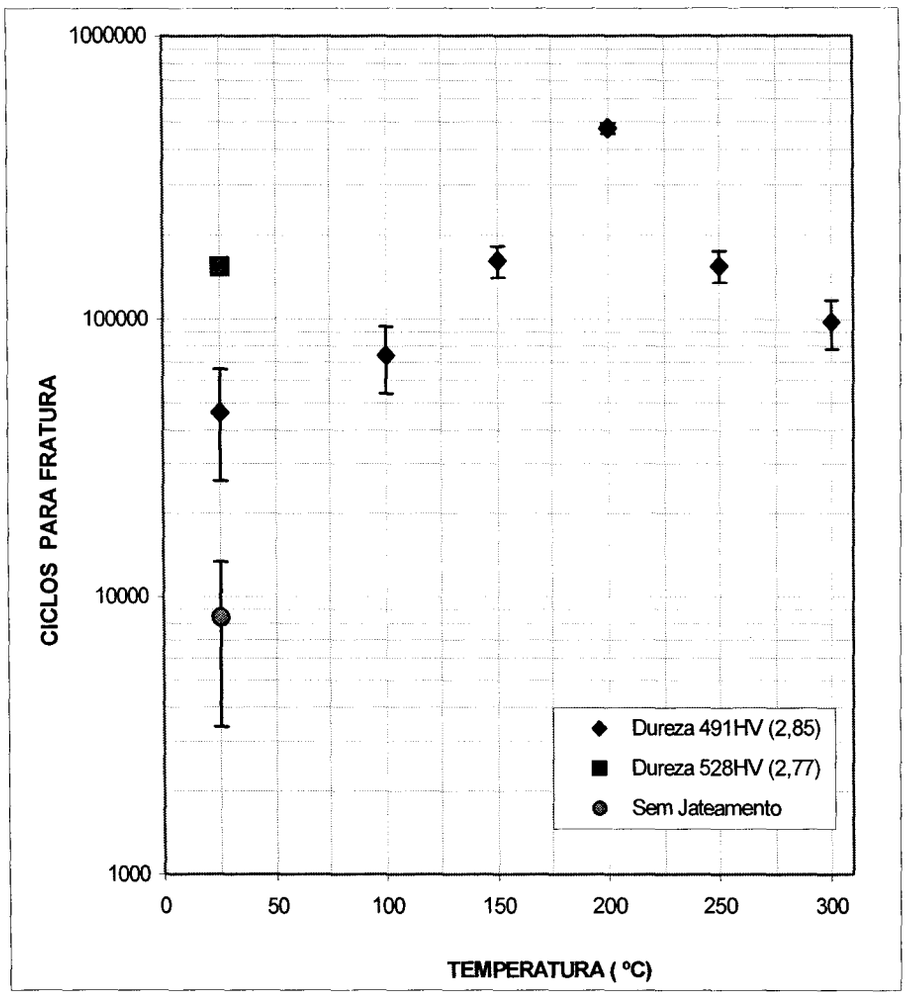



Figura 4.20 – Gráfico com valores médios dos ciclos para fratura em cada condição em função da temperatura de jateamento.

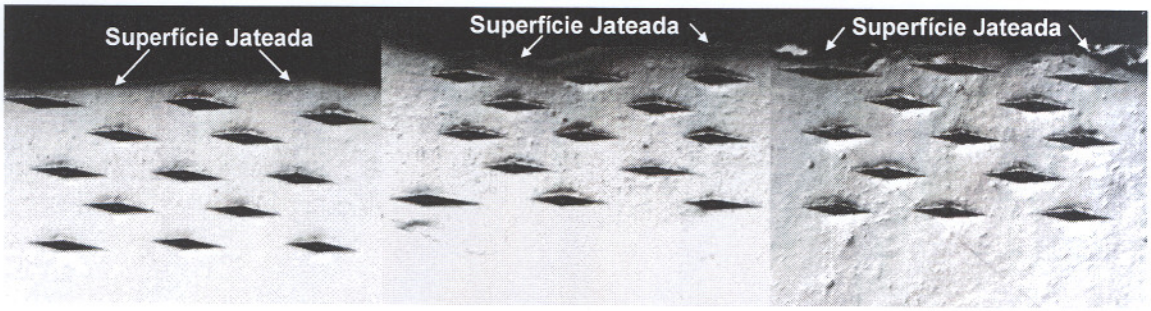
É interessante notar que a medida que a temperatura de jateamento foi elevada, a tensão residual compressiva iniciou em aproximadamente 550 MPa, passou por um máximo em aproximadamente 100 °C e chegando a 440 MPa na temperatura de 300 °C. Com relação a rugosidade, medida em termos de Ra, esta foi de aproximadamente 3 μm a temperatura ambiente e foi aumentando gradativamente com o aumento da temperatura, atingindo o valor de 5,17 μm na

temperatura de 300 °C. Quanto a microestrutura foi observado que não ocorreu nenhuma alteração significativa, a nível de uma análise no microscópio ótico, nas fases presentes, sendo esta composta principalmente de martensita revenida, fato este confirmado pela medição de dureza Vickers que também não apresentou nenhumas variação significativa.

Diante do acima exposto, conclui-se que o aumento da vida em fadiga ocorrido com o aumento da temperatura de jateamento, não foi ocasionado pela tensão residual compressiva, pois esta foi reduzida, além do que a rugosidade foi aumentada, o que contribuiria para uma redução na vida em fadiga. Desta forma, especulou-se a possibilidade do aumento da vida em fadiga ter ocorrido unicamente em função do aumento do encruamento superficial causado por uma maior deformação plástica. Desta forma, foram realizadas medidas de microdureza Knoop, com carga de 100 gramas, próximo da camada jateada como mostrado na Figura 4.24. Estas medidas foram realizadas com a finalidade de verificar aumento da dureza pelo encruamento, o que acarretaria um aumento do limite de escoamento, dificultando a nucleação de trincas superficiais e por conseqüência um aumento da vida em fadiga.

A Figura 4.21 apresenta respectivamente as impressões de microdurezas Knoop (HK), realizadas nos corpos de prova jateados nas temperaturas de 100°C(a), 200°C(b) e 300°C(c). Os valores médios destas medidas são apresentados na Tabela 4.9 e Figura 4.22 e mostram que para todas as temperaturas ocorreu um pico de dureza a uma determinada distância da superfície, fato este associado ao perfil típico do campo de tensão de compressão residual introduzido pelo processo de jateamento com granalhas conforme apresentado na Figura 2.7. Ainda, foi observado que na temperatura de 200 °C obteve-se um máximo valor de dureza de aproximadamente 544HV (576 HK), sendo superior a dureza do aço após os tratamentos térmicos de tempera e revenido, aproximadamente 476 HV. Na temperatura de 300 °C a dureza volta a

decrescer passando para 465 HV (488 HK). Desta forma, na temperatura de 200 ºC ocorreu uma melhor associação de aumento do limite de escoamento pela deformação plástica e tensão residual compressiva, o que acarretou uma maior vida em fadiga para o corpo de prova quando submetido ao jateamento a 200 ºC.




(a) (b) (c)

Figura 4.21 – Detalhe das impressões de Microdureza Knoop com carga de 100g na temperatura de jateamento de (a) 100ºC, (b) 200ºC e (c) 300ºC. Aumento 40x.

Tabela 4.9 – Média dos resultados de microdureza Knoop, carga de 100g.

| Temperatura (ºC) | 1 Faixa (HK) | | 2 Faixa (HK) | | 3 Faixa (HK) | | 4 Faixa (HK) | | 5 Faixa (HK) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Méd. | D.P. | Méd. | D.P. | Méd. | D.P. | Méd. | D.P. | Méd. | D.P. |
| **100** | 444,2 | 8,8 | 467,1 | 42,4 | 511,2 | 16,5 | 497,1 | 5,2 | 429,3 | 13,1 |
| **200** | 549,3 | 11,1 | 541,7 | 4,5 | 575,70 | 36,3 | 527,7 | 45,9 | 494,3 | 30,3 |
| **300** | 338,5 | 13,4 | 483,6 | 37,8 | 487,9 | 24,2 | 456,5 | 49,5 | 444,5 | 78,6 |

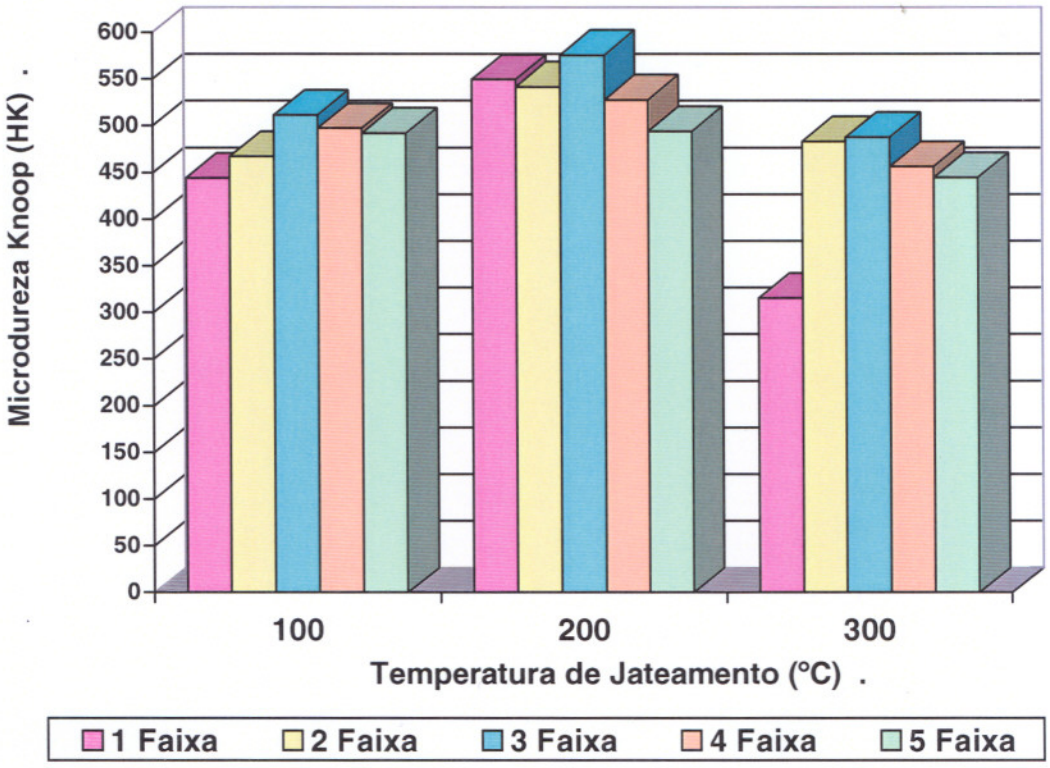



Figura 4.22 – Gráfico representando os valores médios da microdureza Knoop em cada faixa de medida, conforme a temperatura de jateamento.

# 5. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho permitiram a obtenção de algumas conclusões importantes quanto ao processo de jateamento que passam a serem descritas a seguir:

- Em relação às lâminas sem jateamento, foi observado que o processo de jateamento com granalhas à temperatura ambiente proporcionou um aumento na vida em fadiga de aproximadamente 5 vezes, devido a introdução ambos: tensões residuais compressivas e encruamento superficial.

- Com o aumento da temperatura do jateamento foi registrado um aumento crescente da rugosidade superficial. Com relação a tensão residual, ocorreu um acréscimo na faixa de temperatura de 25 °C a 100°C, passando a decrescer continuadamente até a temperatura de 300 °C.

- Comparativamente a temperatura ambiente, o jateamento a 200 °C promoveu um decréscimo na tensão residual e um aumento da rugosidade. Mesmo assim, o processo de jateamento executado nesta temperatura promoveu um acréscimo de aproximadamente 10 vezes.

- A razão principal para este aumento da vida em fadiga foi a elevação do limite de escoamento do aço pelo encruamento causado por uma maior deformação plástica "a frio", ancoramento e aumento da densidade das discordâncias.

# 6. BIBLIOGRAFIA

ALMEN, J. O. (1977). Improving Fatigue strength of machine parts. Special permission for Wheelabrator-Frye Inc P. 127-143.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E3-80. (1991). Standard methods of preparation of metallographic specimens. Philadelphia, ASTM.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E8M(1991). Standard test methods of tension testing of metallic materials. Philadelphia, ASTM.

ANDERSON, T.L.; Fracture Mechanics Fundamentals and Aplication by CRC Press, Inc. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6405(1988). Rugosidade das Superfícies. Rio de Janeiro, ABNT.

ASKELAND, DONALD R.; The Science And Engineering Of Materials - Third Edition - Pws Publishing Company 1994.

BANNANTINE, J. (1990). Fundamentals of metal fadigue analysis. Prentice-Hall Inc. New Jersey. Cap.1 Stress-Life. P.01 – 31.

BROEK, D.; Elementary Engineering Fracture Mechanics – Martinus Nijhoff 1984.

CALLISTER Jr, WILLIAM D.; Ciência e Engenharia de Materiais; Uma Introdução. Editora LTC . 5ª Edição. 2002. P. 146 – 161.

COURTNEY, THOMAS H. ; Mechanical Behavior of Materials – Second Edition , Chapter 12 – McGraw-Hill, 2000. P.574 – 583.

DIETER, G. E.(1981). Metalurgia Mecânica. Tradução Antonio Sergio de Souza e Silva. 2ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois. Cap. 12: Fadiga dos metais, p.344-384.

DUGGAN,TERANCE V. AND BYRNE, JAMES. Fatigue as a Design Criterion, The Macmillan Press LTD. 1977. P. 65 – 84.

FUCHS, H. O.; STEPHENS, R. I. (1981). Metal fatigue in engineering. New York, John Wiley.

GUAGLIANO, M. (2001). Relating Almen intensity to residual stresses induced by jateamento: a numerical approach. Journal of Materials Processing Technology 110 (2001) 277-286

G.H. FARRAHI, J.L. LEBRUN AND D. COURATIN; Effect of Jateamento on Residual Stress and Fatigue Life of a Spring Steel, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struc. Vol 18 nº2 (1995), p. 211-220.

G. TOTTEN, M. HOWES, T. INOUE. Handbook of RESIDUAL STRESS AND DEFORMATION OF STEEL MARCH 2002 ASM International.

HARADA, Y., MORI, K., MAKI, S. (1998). Lining of metal plates with foils using hot jateamento. Journal of Materials Processing Technology 80–81 p. 309–314.

HORGER, O.J. (1977). Mechanical and metallurgical advantages of jateamento. Special permission for Wheelabrator-Frye Inc P. 147-175.

KOBAYASHI, M., MATSUI, T. and MURAKAMI, Y. (1998). Mechanism of creation of compressive residual stress by jateamento. Int. J. Fatigue Vol. 20, No. 5, pp. 351–357, 1998.

LASSANCE, C. A. F. (1976). Blastibrás Tratamento de Metais - Mundo Mecânico. Mês setembro volume 9 -1976.

MANUAL, NCODE FATIGUE REFERENCE, nCode International LTD.

MITUTOYO USER'S MANUAL . Surface Roughness Tester SJ-201. 1999.

MOORE, H. F. Strengthening metal parts by jateamento. Special permission for Wheelabrator-Frye Inc P. 79-122.

SCHIFFNER, K., DROSTE C. (1999). Simulation of residual stresses by jateamento. Computers and Structures 72 (1999) 329-340.

SHACKELFORD, J. ; Introduction to Materials Science for Engineers – Chapman Hall .1990.

SHOT PEENING Wheelabrator-Frye Inc, 1977. P.01-76.

SHOT PEENING APPLICATIONS. seventh edition, Metal Improvement Company, Inc. Paramus, New Jersey, USA, 1989. P.03-07 e P.59-69.

SOUSA, S. D. I. (1980). Estudo das superfícies técnicas. NOBEL. capitulo 8 Superfícies de jateamento. P.183-196.

SOUZA, SÉRGIO A. (2000). Ensaios Mecânicos de materiais metálicos - fundamentos teóricos e práticos. 5ª edição – 7ª reimpressão. Capitulo 8: Ensaio de fadiga, p.172-200.

TANGE, A. KOYAMA, HIROSHI AND TSUJI, HIROTO; Study on Warm Shot Peening for Suspension Coil Spring. S.A.E. Technical Paper Series - International Congress and Exposition Detroit, Michigan . March 1-4, 1999.

VAN VLACK, L ; Princípios de Ciência dos Materiais - 1985.

WICK A., V. SCHULZE, VOHRINGER O.; Effects of warm peening on fatigue life and relaxation behaviour of residual stresses in AISI 4140 steel - Materials Science and Engineering A293 (2000) 191–197.

Wang, S. (1998). Compressive residual stress introduced by jateamento. Journal of Materials Processing Technology 73 (1998) 64–73.