

PAULO CESAR DE FRANÇA ROCHA

ESTUDO DOS EFEITOS NO COMPORTAMENTO EM FADIGA DAS  
CAMADAS DE NÍQUEL ELETROLÍTICO, PROCESSO SULFAMATO,  
EM AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA.

Dissertação apresentada à  
Faculdade de Engenharia do  
Campus de Guaratinguetá,  
Universidade Estadual Paulista,  
para a obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Mecânica na área  
Projetos e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald

Guaratinguetá - SP  
2005

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| R672e | <p>Rocha, Paulo Cesar de França</p> <p>Estudo dos efeitos no comportamento em fadiga das camadas de níquel eletrolítico, processo sulfamato, em aços de alta resistência. / Paulo César de França Rocha.- Guaratinguetá : [s.n.], 2005<br/>103f.: il.</p> <p>Bibliografia: f. 100-103</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2005</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald</p> <p>1. Fadiga 2. Cromo duro 3. Níquel 4. sulfamato I. Título</p> <p>CDU 620.178.3</p> |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## **DADOS CURRICULARES**

**PAULO CESAR DE FRANÇA ROCHA**

|            |                                                           |
|------------|-----------------------------------------------------------|
| NASCIMENTO | 22.12.1949 – Guaratinguetá / SP                           |
| FILIAÇÃO   | Antonio Rocha Filho<br>Maria da Conceição de França Rocha |
| 1971/1974  | Curso de Graduação<br>Engenharia Química – UFRRJ          |

de modo especial, à minha filha Paloma pelo incentivo, ao meu filho Paulo, e à minha esposa Célia.

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho só foi possível em virtude da colaboração direta e indireta de muitas pessoas. Manifesto minha gratidão a todas, e especialmente:

ao Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald, pela dedicação, apoio e incentivo, amizade e conhecimento;

ao Grupo de Fadiga e Materiais Aeronáuticos do Departamento de Materiais e Tecnologia, DMT da FEG-UNESP, pelo auxílio e discussão dos resultados;

ao técnico Manoel Francisco do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP, pelo auxílio valioso na execução dos ensaios de fadiga;

à/ELEB – Embraer Liebherr Equipamentos do Brasil S/A, nas pessoas dos Engenheiros Walter Luis Pigatin e Vanderlei Faria, pela fornecimento dos corpos de prova para os ensaios de fadiga e pelo apoio técnico;

ao CTA-IAE-AMR, na pessoa do Engenheiro Dalcy Roberto dos Santos pela utilização do microscópio eletrônico de varredura.;

ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Amorin, pela amizade, apoio e auxílio na execução dos ensaios de fadiga;e

a todos os professores do Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP/FEG, pelos ensinamentos transmitidos.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

RESUMO

ABSTRACT

|          |                                                                      |    |
|----------|----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                              | 17 |
| 1.1      | CONSIDERAÇÕES GERAIS.....                                            | 17 |
| 1.2      | OBJETIVOS.....                                                       | 19 |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                                   | 20 |
| 2.1      | FADIGA.....                                                          | 20 |
| 2.2      | PREDIÇÃO DA VIDA EM FADIGA.....                                      | 22 |
| 2.3      | ENSAIOS DE FADIGA.....                                               | 23 |
| 2.4      | TENSÕES APLICADAS NOS ENSAIOS DE FADIGA.....                         | 24 |
| 2.5      | CURVAS $\sigma$ - N.....                                             | 27 |
| 2.5.1    | <b>Limite de resistência à fadiga</b> .....                          | 27 |
| 2.5.2    | <b>Resistência à fadiga</b> .....                                    | 28 |
| 2.5.3    | <b>Fadiga de alto e baixo ciclo</b> .....                            | 28 |
| 2.6      | FATORES QUE INFLUENCIAM NA VIDA EM FADIGA.....                       | 28 |
| 2.6.1    | <b>Efeitos na superfície</b> .....                                   | 29 |
| 2.6.2    | <b>Efeitos da tensão média (<math>\sigma_m</math>)</b> .....         | 30 |
| 2.6.3    | <b>Efeitos ambientais</b> .....                                      | 31 |
| 2.6.4    | <b>Efeitos de variáveis metalúrgicas</b> .....                       | 32 |
| 2.6.5    | <b>Efeitos das tensões residuais</b> .....                           | 34 |
| 2.7      | TENSÕES RESIDUAIS.....                                               | 36 |
| 2.7.1    | <b>Considerações iniciais</b> .....                                  | 36 |
| 2.7.2    | <b>Definição e tipos de tensões residuais</b> .....                  | 36 |
| 2.7.3    | <b>Formação das tensões residuais</b> .....                          | 38 |
| 2.7.3.1  | Indução de tensão residual pelo tratamento <i>shot peening</i> ..... | 39 |
| 2.7.3.2  | Indução de tensão residual pela eletrodeposição de metais.....       | 41 |
| 2.7.3.3  | Fatores que influenciam na tensão residual dos eletrodepósitos....   | 44 |
| 2.7.3.4  | Controle das tensões residuais dos eletrodepósitos.....              | 47 |
| 2.7.3.5  | Determinação das tensões residuais.....                              | 48 |

|           |                                                                                                                                                                    |    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.7.3.5.1 | Método de determinação da tensão residual por difração de raio X.....                                                                                              | 49 |
| 2.7.3.5.2 | Método do contractômetro ( <i>Espiral Contractômeter</i> ) para determinação da tensão residual de camadas metálicas química ou eletroliticamente depositadas..... | 51 |
| 2.8       | <b>ELETRODEPOSIÇÃO DE METAIS.....</b>                                                                                                                              | 54 |
| 2.8.1     | <b>Considerações iniciais.....</b>                                                                                                                                 | 54 |
| 2.8.2     | <b>Lei de Faraday e eficiência catódica....</b>                                                                                                                    | 56 |
| 2.8.3     | <b>Fragilidade de Hidrogênio.....</b>                                                                                                                              | 59 |
| 2.8.3.1   | Desidrogenação.....                                                                                                                                                | 60 |
| 2.8.4     | <b>Processo de eletrodeposição dos metais.....</b>                                                                                                                 | 61 |
| 2.8.4.1   | Pré-tratamento.....                                                                                                                                                | 61 |
| 2.8.4.2   | Eletrodeposição de Níquel pelo processo a base de sulfamato.....                                                                                                   | 63 |
| 2.8.4.2.1 | Histórico.....                                                                                                                                                     | 63 |
| 2.8.4.2.2 | O Sulfamato de níquel.....                                                                                                                                         | 63 |
| 2.8.4.2.3 | Usos dos eletrodepósitos de níquel, processo sulfamato.....                                                                                                        | 64 |
| 2.8.4.2.4 | Propriedades físicas do eletrodepósitos de níquel sulfamato.....                                                                                                   | 65 |
| 2.8.4.2.5 | Controle operacional do processo sulfamato de niquelação.....                                                                                                      | 65 |
| 2.8.4.3   | Eletrodeposição de Cromo.....                                                                                                                                      | 67 |
| 2.8.4.3.1 | Histórico.....                                                                                                                                                     | 67 |
| 2.8.4.3.2 | Cromeação dura ou funcional.....                                                                                                                                   | 67 |
| 2.8.4.3.3 | Processos para a cromeação funcional.....                                                                                                                          | 68 |
| 2.8.4.4   | Pós-tratamento.....                                                                                                                                                | 69 |
| <b>3</b>  | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                                                                                                                    | 70 |
| 3.1       | CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....                                                                                                                                        | 70 |
| 3.2       | MATERIAL.....                                                                                                                                                      | 71 |
| 3.3       | MÉTODOS.....                                                                                                                                                       | 71 |
| 3.3.1     | <b>Tratamento térmico.....</b>                                                                                                                                     | 71 |
| 3.3.2     | <b>Preparação dos corpos de prova.....</b>                                                                                                                         | 72 |
| 3.3.3     | <b>Tratamento <i>Shot Peening</i>.....</b>                                                                                                                         | 73 |
| 3.3.4     | <b>Revestimentos superficiais.....</b>                                                                                                                             | 73 |
| 3.3.4.1   | Revestimento de cromo duro.....                                                                                                                                    | 73 |
| 3.3.4.2   | Revestimento de níquel.....                                                                                                                                        | 73 |
| 3.3.4.3   | Espessura dos revestimentos.....                                                                                                                                   | 74 |
| 3.3.5     | <b>Determinação da tensão residual.....</b>                                                                                                                        | 74 |
| 3.3.5.1   | Método de difração de raio X.....                                                                                                                                  | 74 |
| 3.3.5.2   | Método do contractômetro ( <i>Espiral Contractômeter</i> ) ASTM B 636..                                                                                            | 75 |

|           |                                                                                                                                                                                          |     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.6     | <b>Ensaaios de Microdureza Vickers.....</b>                                                                                                                                              | 75  |
| 3.3.7     | <b>Ensaaios de fadiga por flexão rotativa.....</b>                                                                                                                                       | 75  |
| 3.3.8     | <b>Análise das superfícies de fratura.....</b>                                                                                                                                           | 76  |
| <b>4</b>  | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                                                                                                                                       | 77  |
| 4.1       | ESPESSURA DAS CAMADAS.....                                                                                                                                                               | 77  |
| 4.2       | MEDIDAS DE MICRODUREZA.....                                                                                                                                                              | 79  |
| 4.3       | MEDIDAS DE TENSÕES RESIDUAIS .....                                                                                                                                                       | 80  |
| 4.3.1     | <b>Análise do perfil da tensão residual do grupo de cdp GP1 .....</b>                                                                                                                    | 81  |
| 4.3.2     | <b>Análise do perfil da tensão residual do grupo de cdp GP2 (Metal Base+ Shot Peening+Níquel + Cromo).....</b>                                                                           | 82  |
| 4.3.3     | <b>Análise do perfil da tensão residual do grupo de cdp GP4 (Metal Base+ Shot Peening+ Níquel )......</b>                                                                                | 83  |
| 4.3.4     | <b>Análise do perfil da tensão residual do grupo de cdp GP5 (Metal Base+ Níquel).....</b>                                                                                                | 84  |
| 4.4       | ENSAIOS DE FADIGA .....                                                                                                                                                                  | 85  |
| 4.4.1     | <b>Considerações gerais .....</b>                                                                                                                                                        | 85  |
| 4.4.1.1   | Critérios para análises dos resultados dos ensaios de fadiga .....                                                                                                                       | 86  |
| 4.4.2     | <b>Análise dos resultados.....</b>                                                                                                                                                       | 88  |
| 4.4.2.1   | Efeito do revestimento de níquel processo sulfamato associado ao revestimento de cromo (Grupo GP3).....                                                                                  | 88  |
| 4.4.2.1.1 | Análise das superfícies de fratura do aço ABNT 4340 53 HRc com revestimentos de níquel e níquel mais cromo – GP3).....                                                                   | 89  |
| 4.4.2.2   | Efeito do revestimento de níquel processo sulfamato na resistência à fadiga. (Grupo GP5).....                                                                                            | 92  |
| 4.4.2.2.1 | Análise da superfície de fratura do aço ABNT 4340 revestido com níquel – GP5.....                                                                                                        | 92  |
| 4.4.2.3   | Efeitos do revestimento de níquel processo sulfamato associado ao recobrimento de cromo e ao tratamento <i>shot peening</i> , na resistência à fadiga do aço 4340 53HRc.(Grupo GP2)..... | 94  |
| 4.4.2.3.1 | Análise das superfícies de fratura do aço ABNT 4340 53 HRc com <i>shot peening</i> e revestimentos de níquel mais cromo- GP2.....                                                        | 94  |
| 4.4.2.4   | Efeito do revestimento de níquel processo sulfamato associado ao tratamento <i>shot peening</i> na resistência à fadiga.(Grupo GP4)...                                                   | 96  |
| 4.4.2.4.1 | Análise das superfícies de fratura do aço ABNT 4340 53 HRc com <i>shot peening</i> e revestimentos de níquel - GP4.....                                                                  | 96  |
| <b>5</b>  | <b>CONCLUSÕES.....</b>                                                                                                                                                                   | 98  |
|           | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                                                                                                                                                    | 99  |
|           | REFERÊNCIAS.....                                                                                                                                                                         | 100 |

## LISTA DE FIGURAS

|             |                                                                                                             |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1.1  | Influência de tratamentos superficiais na vida em fadiga.....                                               | 17 |
| FIGURA 2.1  | Fadiga em um eixo de vagão ferroviário.....                                                                 | 21 |
| FIGURA 2.2  | Representação esquemática mostrando o modelo da iniciação e propagação da trinca por fadiga.....            | 21 |
| FIGURA 2.3  | Ensaio de fadiga em um componente aeronáutico.....                                                          | 23 |
| FIGURA 2.4  | Ensaio de fadiga em uma estrutura.....                                                                      | 23 |
| FIGURA 2.5  | Esquemas de carregamento em flexão rotativa ( a ) e de fadiga axial ( b ).....                              | 24 |
| FIGURA 2.6  | Tensão alternada ou totalmente reversa.....                                                                 | 26 |
| FIGURA 2.7  | Tensão de tração flutuante.....                                                                             | 26 |
| FIGURA 2.8  | Tensão pulsante ou repetitiva.....                                                                          | 26 |
| FIGURA 2.9  | Tensão flutuante trativa/compressiva.....                                                                   | 26 |
| FIGURA 2.10 | Curvas $\sigma - N$ usadas para estudar o comportamento em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com cromo..... | 27 |
| FIGURA 2.11 | Demonstração de como o projeto pode reduzir a concentração de tensão.....                                   | 29 |
| FIGURA 2.12 | Efeito da tensão média $\sigma_m$ na curva $\sigma - N$ .....                                               | 31 |
| FIGURA 2.13 | Limite de fadiga de aços em função da dureza Rockwell C...                                                  | 33 |
| FIGURA 2.14 | Trinca nucleada a partir de uma inclusão superficial.....                                                   | 33 |
| FIGURA 2.15 | Representação gráfica da interação tensão residual – carregamento externo.....                              | 35 |
| FIGURA 2.16 | Limite de resistência a fadiga de aço com eletrodepósitos de níquel com tensões residuais controladas.....  | 35 |
| FIGURA 2.17 | Equilíbrio de tensões residuais do tipo I ao longo de uma amostra.....                                      | 37 |
| FIGURA 2.18 | Equilíbrio de tensões residuais do tipo II ao longo de um ou mais grãos.....                                | 38 |
| FIGURA 2.19 | Comparação das tensões dos tipos I, II e III na microestrutura do material.....                             | 38 |
| FIGURA 2.20 | Resultados de medições de tensões residuais aço ABNT 4340 53 HRc.....                                       | 40 |
| FIGURA 2.21 | Esquema do sistema placa Almen.....                                                                         | 41 |
| FIGURA 2.22 | Depósito com tensão de tração.(espiral expandida).....                                                      | 42 |
| FIGURA 2.23 | Depósito com tensão de compressão.(espiral comprimida)...                                                   | 42 |
| FIGURA 2.24 | Depósito com tensão trativa – superfície côncava.....                                                       | 43 |
| FIGURA 2.25 | Depósito com tensão compressiva – superfície convexa.....                                                   | 43 |

|             |                                                                                                                                                                                    |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.26 | Microtrincas em depósito de cromo duro obtido a partir de processo acelerado.....                                                                                                  | 43 |
| FIGURA 2.27 | Valores de tensão residual de eletrodepósitos de cromo em várias temperaturas e espessuras de camada.....                                                                          | 45 |
| FIGURA 2.28 | Variação da tensão interna de eletrodepósitos de níquel processo sulfamato em função da temperatura (a) e em função da densidade de corrente (b).....                              | 46 |
| FIGURA 2.29 | Variação da tensão interna de eletrodepósitos de níquel em função do PH, processo sulfamato de níquel.....                                                                         | 46 |
| FIGURA 2.30 | Perfil da tensão interna em eletrodepósitos de níquel em função da variação da composição química de eletrólitos a base de sulfamato de níquel.....                                | 47 |
| FIGURA 2.31 | Princípio da medida por difração de raio x.....                                                                                                                                    | 49 |
| FIGURA 2.32 | Esquema de medição das tensões residuais no equipamento Síntese.....                                                                                                               | 50 |
| FIGURA 2.33 | Esquema da hélice e suas partes.....                                                                                                                                               | 52 |
| FIGURA 2.34 | Esquema do contractômetro e suas partes.....                                                                                                                                       | 52 |
| FIGURA 2.35 | Representação esquemática da eletrodeposição de metais...                                                                                                                          | 55 |
| FIGURA 2.36 | Curva Espessura de camada versus densidade de corrente processos de cromeação convencional, acelerado e teórico..                                                                  | 58 |
| FIGURA 2.37 | Curvas de eficiência catódica processos de cromeação convencional e acelerado.....                                                                                                 | 59 |
| FIGURA 2.38 | Variação da eficiência catódica de um processo de cromeação em função da densidade de corrente e da temperatura.....                                                               | 59 |
| FIGURA 2.39 | Comparação das fórmulas estruturais do ácido sulfúrico e ácido sulfâmico.....                                                                                                      | 63 |
| FIGURA 3.1  | Representação esquemática do tratamento térmico de têmpera e revenimento para a dureza de 53 HRC.....                                                                              | 72 |
| FIGURA 3.2  | Dimensões do corpo de prova para ensaio de flexão rotativa.....                                                                                                                    | 72 |
| FIGURA 3.3  | Modo de carregamento do ensaio de fadiga por flexão rotativa.....                                                                                                                  | 76 |
| FIGURA 4.1  | (a)Espessura do revestimento de níquel, processos de deposição química e eletrolítica; (b)Distribuição da corrente elétrica em uma peça durante o processo de eletrodeposição..... | 78 |
| FIGURA 4.2  | Perfil da tensão residual do aço ABNT 4340 53HRC utilizado neste trabalho.....                                                                                                     | 82 |
| FIGURA 4.3  | Perfil da tensão residual do aço ABNT 4340 com <i>shot peening</i> e revestido com níquel e cromo.....                                                                             | 82 |

|             |                                                                                                                                                                                               |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 4.4  | Perfil da tensão residual do aço ABNT 4340 com <i>shot peening</i> e revestido com níquel.....                                                                                                | 83 |
| FIGURA 4.5  | Perfil da tensão residual do aço ABNT 4340 revestido com níquel.....                                                                                                                          | 84 |
| FIGURA 4.6  | Gráfico indicativo de tendência do comportamento da vida em fadiga.....                                                                                                                       | 86 |
| FIGURA 4.7  | Curva $\sigma$ -N traçada a partir de valores de $N_f$ conservativos...                                                                                                                       | 87 |
| FIGURA 4.8  | Curva $\sigma$ -N traçada a partir de valores de $N_f$ não conservativos.....                                                                                                                 | 87 |
| FIGURA 4.9  | Superfície de fratura corpo de prova grupo GP3 (1200 MPa – 9600 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região A.....                                             | 90 |
| FIGURA 4.10 | Superfície de fratura corpo de prova grupo GP3 (900 MPa – 15400 ciclos): (a) Visão geral; (b) e (c) detalhes da região A; (d) e (e) detalhes da região B; (f) e (g) detalhes da região C..... | 91 |
| FIGURA 4.11 | Superfície de fratura corpo de prova grupo GP5 (1200 MPa – 5600 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região B.....                                             | 93 |
| FIGURA 4.12 | Superfície de fratura corpo de prova grupo GP5 (950 MPa – 67200 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região B.....                                             | 93 |
| FIGURA 4.13 | - Superfície de fratura corpo de prova grupo GP2 (1200 MPa – 8100 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região B.....                                           | 95 |
| FIGURA 4.14 | Superfície de fratura corpo de prova grupo GP2 (810 MPa – 128000 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região B.....                                            | 95 |
| FIGURA 4.15 | Superfície de fratura corpo de prova grupo GP4 (1200 MPa – 9600 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região B.....                                             | 97 |
| FIGURA 4.16 | Superfície de fratura corpo de prova grupo GP4 (950 MPa – 171300 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região B.....                                            | 97 |

## LISTA DE TABELAS

|             |                                                                                                                                  |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1.1  | Alternativas de tratamentos utilizados neste estudo.....                                                                         | 18 |
| TABELA 1.2  | Entidades e centros de pesquisa envolvidos neste trabalho...                                                                     | 18 |
| TABELA 2.1  | Estatística geral de falhas por fadiga em elementos estruturais de aeronaves.....                                                | 22 |
| TABELA 2.2  | Vida em fadiga de amostras de aço SAE 3130, ensaiadas em tensão alternada ( $\sigma_m=0$ ) a 67 Kgf/mm <sup>2</sup> .....        | 30 |
| TABELA 2.3  | Variação da vida média em fadiga aço 35NCD16 exposto à atmosfera marítima.....                                                   | 32 |
| TABELA 2.4  | Exemplos de processos de fabricação que induzem tensões residuais.....                                                           | 39 |
| TABELA 2.5  | Variáveis que afetam a tensão residual dos eletrodepósitos..                                                                     | 44 |
| TABELA 2.6  | Revestimentos metálicos eletrodepositados e algumas de suas aplicações.....                                                      | 54 |
| TABELA 2.7  | Pré-tratamentos utilizados na limpeza das superfícies dos metais.....                                                            | 62 |
| TABELA 2.8  | Propriedades físicas dos eletrodepósitos de níquel, processos sulfamato eletrodeposição convencional e eletrodeposição dura..... | 65 |
| TABELA 2.9  | Parâmetros operacionais dos processos sulfamato convencional e de eletrodeposição dura.....                                      | 66 |
| TABELA 2.10 | Principais constituintes o eletrólito de sulfamato de níquel e suas respectivas funções.....                                     | 66 |
| TABELA 3.1  | Características dos grupos de corpos de prova (cdp).....                                                                         | 70 |
| TABELA 3.2  | Ensaio realizados nos grupos de corpos de prova.....                                                                             | 70 |
| TABELA 3.3  | Composição química do aço ABNT 4340.....                                                                                         | 71 |
| TABELA 4.1  | Espessuras de camadas dos revestimentos de níquel e de cromo.....                                                                | 77 |
| TABELA 4.2  | Espessuras de camadas encontradas nos cdps do aço 4340...                                                                        | 78 |
| TABELA 4.3  | Valores de microdureza Vickers (HV)- Grupos de cdps GP2 e GP3.....                                                               | 79 |
| TABELA 4.4  | Valores de microdureza Vickers (HV)- Aço ABNT 4340:52HRc revestidos com níquel químico e cromo duro...                           | 80 |
| TABELA 4.5  | Medidas de tensões residuais nos grupos de corpos de prova.....                                                                  | 81 |
| TABELA 4.6  | Ensaio de fadiga dos grupos de corpos de prova.....                                                                              | 85 |

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

|                        |                                                          |
|------------------------|----------------------------------------------------------|
| $\Delta\sigma$         | Variação de tensão                                       |
| $\mu\text{m}$          | Micrometro                                               |
| $\sigma$               | Tensão aplicada                                          |
| $\sigma_a$             | Amplitude de tensão                                      |
| $\sigma_e$             | Tensão limite de escoamento                              |
| $\sigma_{f\ m}$        | Tensão de flexão máxima                                  |
| $\sigma_0$             | Resistência à fadiga                                     |
| $\sigma_m$             | Tensão média                                             |
| $\sigma_{\text{máx.}}$ | Tensão máxima                                            |
| $\sigma_{\text{mín.}}$ | Tensão mínima                                            |
| $\sigma_r$             | Campo de variação de tensão.                             |
| $\sigma - N$           | Tensão <i>versus</i> N° de ciclos                        |
| A                      | Ampère ou Intencidade de peening na placa Almen “A”.     |
| ABNT                   | Associação Brasileira de Normas Técnicas                 |
| AISI                   | American Iron and Steel Institute                        |
| AMR                    | Atividade em Materiais Raros (Divisão de Materiais)      |
| ASTM                   | American Society for Testing and Materials               |
| ASME                   | American Society of Mechanical Engineers                 |
| atm                    | Atmosfera                                                |
| °C                     | Graus Celsius                                            |
| cdp                    | Corpo de prova                                           |
| cm                     | Centímetro                                               |
| CTA                    | Centro Técnico Aeroespacial                              |
| COPPE                  | Coordenação dos Programas de Pós-graduação em Engenharia |
| DP                     | Desvio padrão                                            |
| dm                     | Decímetro                                                |
| E                      | Módulo de elasticidade                                   |
| ELEB                   | Embraer Liebherr Equipamentos do Brasil S/A              |

|                   |                                             |
|-------------------|---------------------------------------------|
| EMBRAER           | Empresa Brasileira de Aeronáutica           |
| FEG               | Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá    |
| $F_{\text{máx.}}$ | Carga máxima a ser ajustada                 |
| $g$               | Grama                                       |
| GP                | Grupo de corpo de prova                     |
| $h$               | Hora (s)                                    |
| HRc               | Dureza Rockwell C                           |
| HV                | Dureza Vickers                              |
| Hz                | Hertz                                       |
| kgf               | Quilograma força                            |
| kN                | Quilonewton                                 |
| $l$               | Litro                                       |
| $m$               | Massa                                       |
| m                 | Metro                                       |
| $M_f$             | Momento de flexão                           |
| MEV               | Microscópio Eletrônico de Varredura         |
| mm                | Milímetro                                   |
| MPa               | Megapascal                                  |
| N                 | Número de ciclos                            |
| $N_f$             | Número de ciclos para fraturar              |
| $N$               | Newton                                      |
| P                 | Carga                                       |
| R                 | Razão de tensão                             |
| S                 | Área.                                       |
| s                 | Segundo                                     |
| SAE               | Society of Automotive Engineers             |
| SENAI             | Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial |
| t                 | Tonelada                                    |
| UFRJ              | Universidade Federal do Rio de Janeiro      |
| UNESP             | Universidade Estadual Paulista              |

ROCHA, P.C.F. **Estudo dos efeitos no comportamento em fadiga das camadas de níquel eletrolítico, processo sulfamato, em aços de alta resistência.** 2005. 103f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.,2005.

## RESUMO

O tema proposto surgiu do interesse da ELEB - Embraer Liebherr Equipamentos do Brasil, em buscar por novas alternativas para a recuperação dimensional de peças.

O processo de niquelação tipo sulfamato, é com frequência utilizada em aplicações de engenharia devido às excelentes propriedades mecânicas do revestimento, tais como, alta ductibilidade e baixa tensão residual. Este estudo objetivou analisar a influência do revestimento de níquel, processo sulfamato, eletrodepositado no aço de alta resistência, ABNT 4340 , na dureza 53 HRC, como camada simples e como camada intermediária sob cromo duro convencional. A análise foi realizada por meio de dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa, em amostras revestidas somente com níquel, com cromo duro mais camada intermediária de níquel, ambas com e sem pré-tratamento *shot peening*, comparativamente às amostras do metal base. Os resultados demonstram que a aplicação da camada de níquel, processo sulfamato, reduziu o desempenho em fadiga tanto na alternativa somente níquel como na alternativa camada intermediária sob o cromo duro. Entretanto, o pré-tratamento *shot peening* se mostrou eficaz, atenuando o efeito da redução em fadiga nas duas alternativas estudadas.

Palavras-chave: Fadiga, Cromo duro, Níquel , Sulfamato.

**ROCHA, P.C.F. Studies of electrolytic nickel layer fatigue effects behavior, sulphamate process, on high strength steel.** 2005. 103f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.,2005.

## **ABSTRACT**

This work proposes to reach the interest of ELEB- Embraer Liebherr Equipamentos do Brasil in searching for new alternatives to parts dimensional recovery.

The process of nickel electroplating sulphamate has often been used on engineering appliances due to its high mechanical property, such as ductility and low residual stress. This study aims to analyse the nickel layer effect, sulphamate process, electroplated on high strength steel, ABNT 4340 on hardness HRc 53, as simple layer and as interlayer under conventional hard chromium. The analysis was performed by means of obtained data from rotating bending fatigue tests of specimens coated with nickel only and coated with hard chromium plus nickel sulphamate interlayer, both with and without shot peening pre-treatment, in relation to ABNT 4340 specimens.

The results showed that the nickel sulphamate coat decreased the ABNT 4340 fatigue performance in both cases, in the one coated with nickel only, and the one coated with hard chromium plus nickel sulphamate interlayer. However, the shot peening pre-treatment was efficient, because the fatigue loss effects have been reduced in both alternatives studied.

**Keywords:** Fatigue, Hard chromium, Nickel, Sulphamate.

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A mais comum solução para eletrodeposição de níquel utilizada para aplicações funcionais na indústria é a de sulfamato de níquel. O termo funcional é utilizado para diferenciar as aplicações em engenharia das aplicações no segmento decorativo. Exemplos de aplicações funcionais na indústria incluem os depósitos para contato elétrico, soldagem, resistência ao desgaste, moldagens (*electroforming*), recuperação dimensional de peças, nas quais a espessura do depósito nas duas últimas aplicações pode atingir uma polegada ou mais (BAUDRAND, 1996).

Os efeitos dos depósitos metálicos na resistência à fadiga do substrato têm sido amplamente pesquisados. Uma importante característica que influi na resistência à fadiga é a tensão residual ou tensão interna originada durante o processo de eletrodeposição. As tensões trativas contribuem para a propagação das trincas reduzindo a resistência à fadiga. As tensões compressivas, ao contrário, retardam a propagação das trincas aumentando a resistência à fadiga. Estudos realizados na queda da resistência à fadiga no aço ABNT 4340, ocasionado pelas tensões trativas de depósitos de cromo duro e recuperação através de tratamentos prévios de *shot peening* e níquel químico, que induzem tensões compressivas, demonstram esta condição conforme ilustrado na figura 1.1 (NASCIMENTO, 1999; TORRES, 2002).

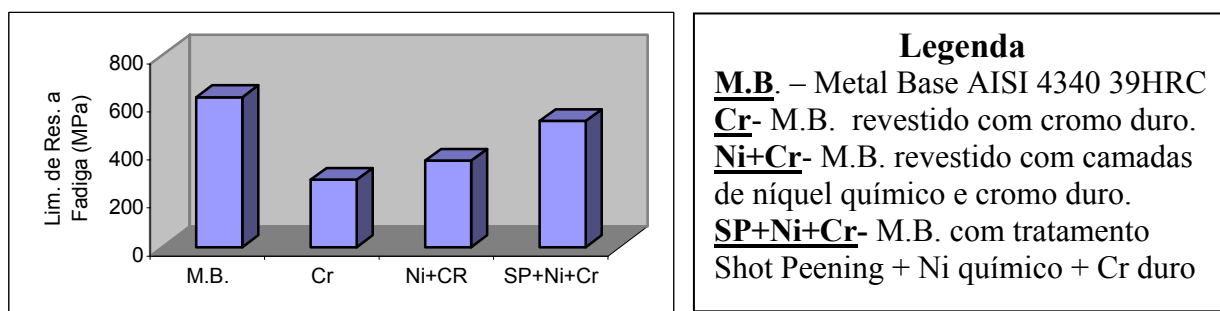


Figura 1.1 – Influência de tratamentos superficiais na vida em fadiga (NASCIMENTO, 1999).

Sob determinadas condições de ajustes dos parâmetros de processo, os depósitos de níquel obtidos a partir de soluções de sulfamato de níquel possuem tensões compressivas. Devido a esta propriedade são atribuídos a este tipo de camada, efeitos

benéficos no aumento da resistência à fadiga em aços de alta resistência (BAUDRAND, 1996; DI BARI, 1999; MACDERMID INCORPORATED, 2001).

Na busca de dados para substantiar estas citações, foram consultados em torno de 400 documentos, selecionados a partir das palavras chave tais como fadiga, níquel, sulfamato e aço, porém, não foram localizados dados experimentais quantificando o ganho da vida em fadiga de aços de alta resistência revestidos com depósitos de níquel eletrolítico processo sulfamato.

Nos trabalhos de NASCIMENTO (1999) e de TORRES (2002) foram apresentados os resultados da influência do *shot peening* na resistência a fadiga associado ao cromo duro e ao níquel químico em aços de alta resistência, mas não associado ao níquel sulfamato.

Este estudo irá avaliar o comportamento da vida em fadiga em flexão rotativa do aço ABNT 4340 com tratamento *shot peening*, revestimento de cromo duro e níquel processo sulfamato conforme as alternativas sumarizadas na tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Alternativas de tratamentos utilizados neste estudo.

| Alternativa 1       | Alternativa 2    | Alternativa 3       | Alternativa 4    |
|---------------------|------------------|---------------------|------------------|
| <i>Shot peening</i> | Níquel Sulfamato | <i>Shot peening</i> | Níquel Sulfamato |
| Níquel Sulfamato    | Cromo duro       | Níquel Sulfamato    |                  |
| Cromo duro          |                  |                     |                  |

Na tabela 1.2 estão apresentadas as entidades e centros de pesquisa onde foram realizadas as diversas etapas deste trabalho.

Tabela 1.2 - Entidades e centros de pesquisa envolvidos neste trabalho.

| Entidade / Centro de Pesquisa | Atividade desenvolvida                     |
|-------------------------------|--------------------------------------------|
| Eleb                          | Preparação dos corpos de prova (CDP)       |
| Eleb                          | Revestimento de Cromo duro nos CDPs        |
| Eleb                          | Tratamento de <i>Shot Peening</i> nos CDPs |
| Varig                         | Revestimento de Ni Sulfamato nos CDPs      |
| FEG/UNESP                     | Ensaio de fadiga                           |
| COPPE/UFRJ                    | Medições das tensões residuais             |
| AMR/CTA                       | MEV nas superfícies fraturadas dos CDPs    |

## 1.2 OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho são:

Avaliar o comportamento da vida em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com níquel eletrolítico processo sulfamato.

Avaliar o efeito combinado do tratamento shot peening mais revestimento intermediário de níquel eletrolítico processo sulfamato mais revestimento de cromo duro, no comportamento da vida em fadiga do aço ABNT 4340.

Avaliar o efeito combinado do revestimento de níquel eletrolítico processo sulfamato mais revestimento de cromo duro na vida em fadiga do aço ABNT 4340.

Avaliar o efeito combinado do tratamento shot peening mais revestimento de níquel eletrolítico processo sulfamato no comportamento da vida em fadiga do aço ABNT 4340.

## **CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 - FADIGA**

Componentes de máquinas, veículos e estruturas, estão sujeitas aos carregamentos repetitivos, também denominados de carregamentos cíclicos. Os carregamentos cíclicos resultam em tensões cíclicas que podem causar danos físicos microscópicos no material envolvido.

Seja um material submetido a tensões cíclicas, mesmo que estas tensões estejam bem abaixo do seu limite de ruptura, estes danos irão se acumular afetando a integridade física do componente, devido à ciclagem contínua. O acúmulo dos danos conduz a formação de trincas que podem se propagar levando o material a fraturar.

Este processo acumulativo de danos que podem conduzir à falhas do material devido a carregamentos cíclicos é denominado de fadiga (DOWLING, 1993).

O estudo moderno de fadiga iniciou em meados do século XIX, a partir do trabalho de A. Wöhler, um tecnologista do sistema ferroviário germânico. Wöhler estava preocupado com as falhas de eixos, depois de repetidas utilizações em serviço sob um carregamento menor que o esperado. (ROYLANCE, 2001).

Um eixo de um vagão ferroviário é essencialmente uma viga de metal cilíndrica flexionada em quatro pontos, os quais produzem uma tensão compressiva ao longo da superfície superior e uma tensão trativa ao longo da superfície inferior, conforme a figura 2.1. Após o eixo completar meia rotação, a superfície inferior torna-se a superior e vice-versa. Então, as tensões sobre uma região particular na superfície do material variam de forma senoidal de tração para compressão e vice-versa. Atualmente este fenômeno é conhecido como um carregamento cíclico totalmente reverso (ROYLANCE, 2001).

Em uma abordagem simplificada da fadiga em metais, o processo se inicia a partir de uma falha interna ou superficial no metal, no qual as tensões são concentradas, consistindo inicialmente de um fluxo de cisalhamentos ao longo dos planos de escorregamento. Ao fim de um determinado número de ciclos, estes escorregamentos geram intrusões e extrusões que começam a se assemelhar a uma trinca. A verdadeira trinca movendo internamente em uma região de intrusão pode

propagar inicialmente ao longo de plano de escorregamento original, mas ao final muda de direção para propagar perpendicularmente à tensão principal ( ROYLANCE, 2001).

A figura 2.2 mostra de forma esquemática o modelo de iniciação e propagação de trinca por fadiga descrita acima.

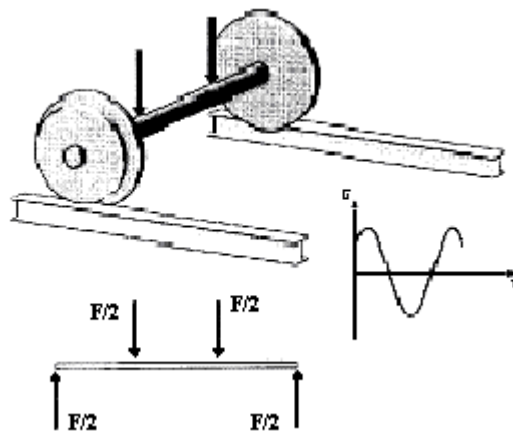


Figura 2.1 – Fadiga em um eixo de vagão ferroviário. (ROYLANCE, 2001).

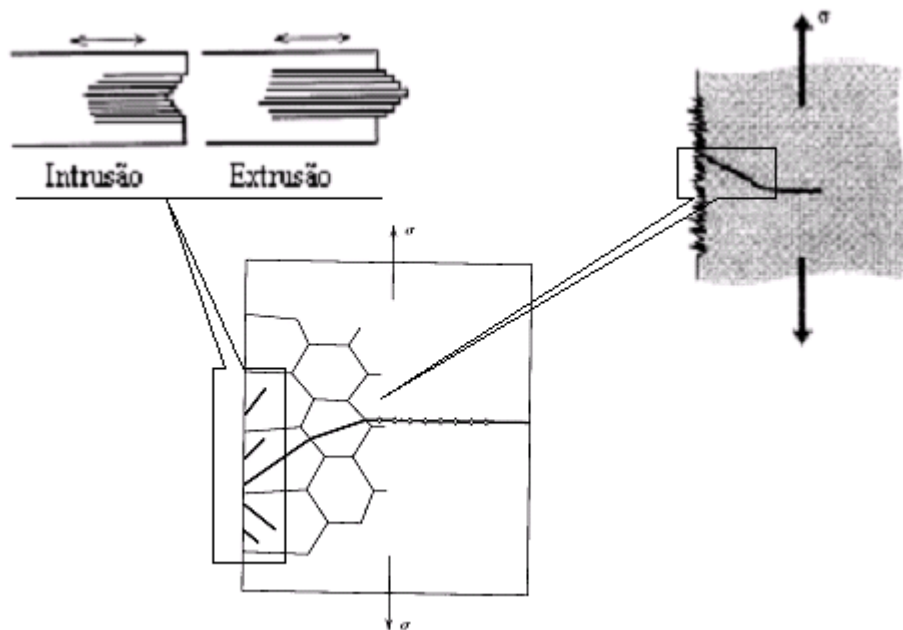


Figura 2.2 – Representação esquemática mostrando o modelo da iniciação e propagação da trinca por fadiga. Adaptado de (DIETER, 1981; ROYLANCE, 2001; CALLIETER, 1999).

A tabela 2.1 fornece dados estatísticos de falhas por fadiga em elementos estruturais de aeronaves. A longarina das asas que durante o voo é submetida a carregamentos em maior intensidade e em maior número de ciclos que os demais elementos, lideram as estatísticas de falhas por fadiga.

Tabela 2.1 - Estatística geral de falhas por fadiga em elementos estruturais de aeronaves (COSTA, 2003).

|                                                         |        |
|---------------------------------------------------------|--------|
| Leme, <i>aileron</i> s, <i>nacele</i> do motor e portas | 1,5%   |
| <i>Flapes</i> , comandos e suas fixações:               | 3,0%   |
| Profundor                                               | 4,5%   |
| Revestimento e cavernas                                 | 6,0 %  |
| Berço do motor e rodas                                  | 7,5 %  |
| Treliças e fixações de superfícies de comando           | 12 %   |
| Trem de pouso principal                                 | 13 %   |
| Reforçadores                                            | 16 %   |
| Trem de pouso de nariz                                  | 17,5 % |
| Longarina da asa                                        | 19 %   |

Fraturas por fadiga são causadas pela ação simultânea da tensão cíclica, tensões trativas e deformação plástica. Se algum destes três fatores não estiver presente, as trincas por fadiga não iniciam e nem propagam. As tensões cíclicas iniciam a trinca, as tensões trativas propagam-na. Embora a tensão compressiva não cause propagação de trincas, carregamento dinâmico compressivo poderá causar iniciação de trincas de fadiga. (METALS HANDBOOK, 1975).

O processo de fadiga pode ser considerado como constituído por três estágios:

- Dano inicial da fadiga, conduzindo a iniciação da trinca.
- Propagação da trinca até a seção reta não trincada remanescente da peça tornar-se muito fraca para suportar a carga imposta.
- Fratura final repentina da seção reta remanescente.

## 2.2 PREDIÇÃO DA VIDA EM FADIGA

Um importante parâmetro que caracteriza o comportamento de fadiga de um material é a vida em fadiga, representada pelo número de ciclos  $N_f$ , necessários para

causar a falha em um determinado nível de tensão. Infelizmente, existe uma dispersão considerável nos dados de fadiga, isto é, uma variação do valor de  $N_f$  medido para vários corpos de prova testados sob o mesmo nível de tensão. Isto pode levar à incertezas de projeto significativas quanto a predição da vida em fadiga. O espalhamento nos resultados é consequência da sensibilidade da fadiga à uma variedade de parâmetros do ensaio e do material que são impossíveis de serem controlados de maneira precisa. Estes parâmetros incluem a fabricação do corpo de prova, preparação da superfície, variáveis metalúrgicas, a tensão média e a frequência da ciclagem nos testes (CALLISTER, 2002).

### 2.3 ENSAIOS DE FADIGA

Os ensaios de fadiga são utilizados no estudo de comportamento em fadiga dos materiais e realizados em pequenos corpos de prova padronizados ou em corpos de prova em escala real. Este último apresenta dados mais precisos, porém deve ser levado em conta o fator de ordem prática e econômica na execução destes testes.



Figura 2.3 - Ensaio de fadiga em um componente aeronáutico (COSTA 2003)



Figura 2.4- Ensaio de fadiga em uma estrutura (AMORIM 2003).

Os ensaios de fadiga utilizando pequenos corpos de prova normalizados são mais viáveis, por apresentarem resultados com maior rapidez e envolvem menores custos (AMORIM 2003).

Apesar dos ensaios de fadiga, executados em pequenos corpos de prova, não

serem suficientemente precisos para estabelecer a vida em fadiga de um material, eles são úteis para analisar os dados obtidos, por:

- Serem a maior fonte de critérios de falhas por fadiga.
- Isolarem as variáveis de carregamento envolvidas na fadiga.
- Serem úteis na classificação dos materiais em termos relativos de suas resistências à fadiga.
- Fornecerem dados preliminares para a elaboração de projetos.
- Serem utilizados para estabelecer a importância relativa em termos de métodos de fabricação, acabamentos superficiais, tratamentos superficiais, tratamentos térmicos, técnicas de montagem e do meio ambiente, na vida em fadiga (METALS HANDBOOK, 1975).

## 2.4 TENSÕES APLICADAS NOS ENSAIOS DE FADIGA

A maioria dos ensaios de fadiga em laboratórios é feita com carregamento axial (figura 2.5 b) ou em flexão rotativa (figura 2.5 a), produzindo somente tensões de compressão ou de tração. A tensão é usualmente ciclada entre a máxima e a mínima tensão de tração ou entre a máxima tensão de tração e a máxima tensão de compressão. Esta última é considerada uma tensão de tração negativa, a qual recebe o sinal algébrico menos ( - ), e conseqüentemente chamada de tensão mínima (METALS HANDBOOK, 1975).

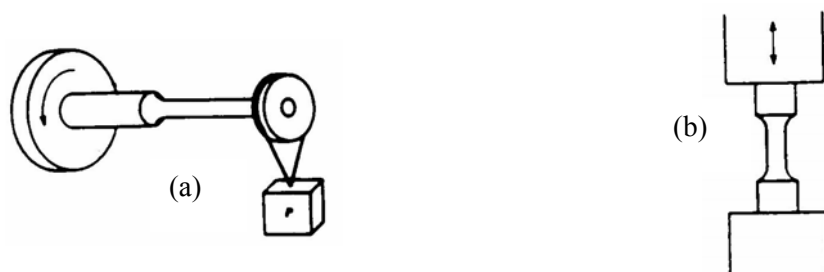


Figura 2.5 - Esquemas de carregamento em flexão rotativa ( a ) e de fadiga axial ( b ) (PERES, 1996 ).

Parâmetros relativos às tensões aplicadas nos ensaios de fadiga:

- **R** – Razão de tensão. É a razão entre a tensão mínima e a tensão máxima aplicada.

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (2.1)$$

- **$\sigma_m$**  – Tensão média. É a média aritmética entre as tensões máxima e mínima de um ciclo.

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 \quad (2.2)$$

- **$\sigma_r$**  – Campo de variação da tensão ( $\Delta\sigma$ ). É a diferença entre as tensões máxima e mínima de um ciclo.

$$\sigma_r = \Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.3)$$

- **$\sigma_a$**  – Amplitude da tensão. É a metade do valor do campo de variação da tensão.

$$\sigma_a = \sigma_r / 2 = \Delta\sigma / 2 \quad (2.4)$$

Algumas das possíveis combinações de  $\sigma_a$  e  $\sigma_m$  são mostradas nas figuras 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9. Quando  $\sigma_m = 0$  (figura 2.6) a tensão trativa máxima é igual a tensão compressiva máxima, esta é chamada de tensão alternada ou totalmente reversa. Quando  $\sigma_m = \sigma_a$  (figura 2.8) a tensão mínima do ciclo é zero e é chamada de tensão pulsante ou tensão repetitiva (que pode ser de tração ou de compressão). Outra combinação é conhecida como tensão flutuante que pode ser uma tensão de tração flutuante (figura 2.7) ou uma tensão flutuante entre valores de compressão e de tração (figura 2.9) (METALS HANDBOOK, 1975).

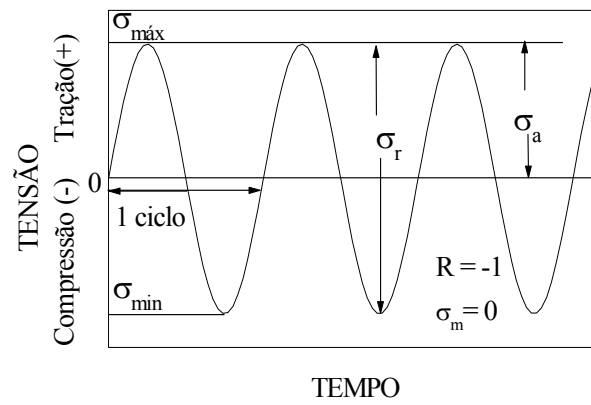


Figura 2.6 – Tensão alternada ou totalmente reversa

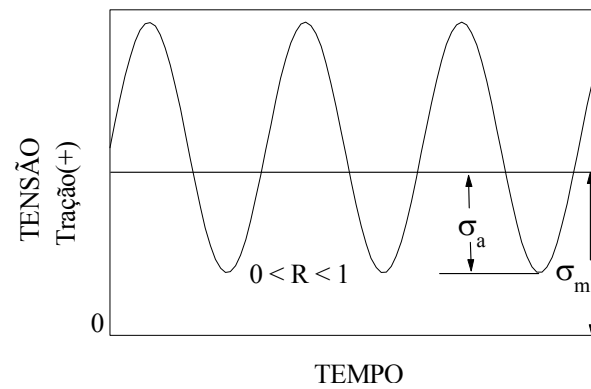


Figura 2.7 – Tensão de tração flutuante

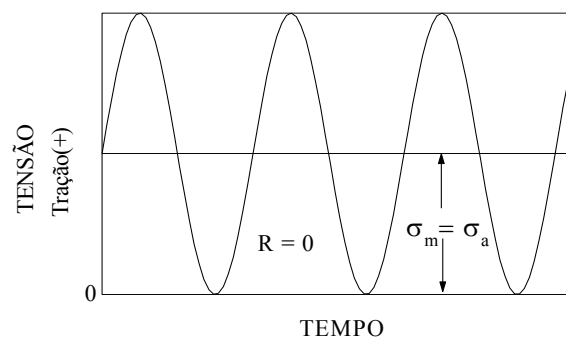


Figura 2.8 – Tensão pulsante ou repetitiva

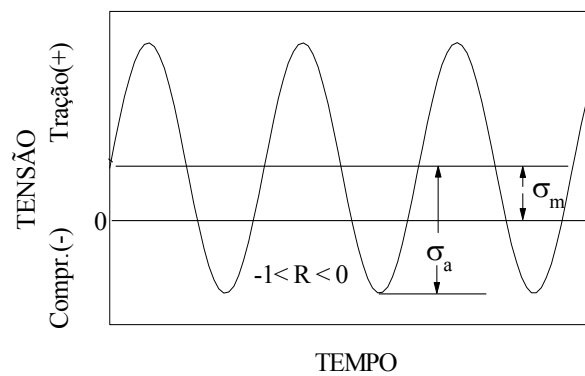


Figura 2.9 – Tensão flutuante compressiva/trativa

## 2.5 CURVAS $\sigma - N$

Tradicionalmente, a vida em fadiga é expressa como o número total de ciclos em uma determinada tensão requeridos para a trinca por fadiga se iniciar e crescer suficientemente para produzir a falha catastrófica (separação do corpo de prova em duas partes). (METALS HANDBOOK, 1975).

A representação gráfica relacionando os diversos níveis de tensão com os respectivos números de ciclos, obtidos nos ensaios de fadiga, é denominada de curva de Wöhler ou curva  $\sigma - N$ , onde  $\sigma$  representa a tensão aplicada e  $N$  o número de ciclos para produzir a fratura do material ensaiado. A figura 2.10, mostra através das curvas  $\sigma - N$  queda da resistência a fadiga do aço ABNT 4340 devido ao revestimento de cromo.

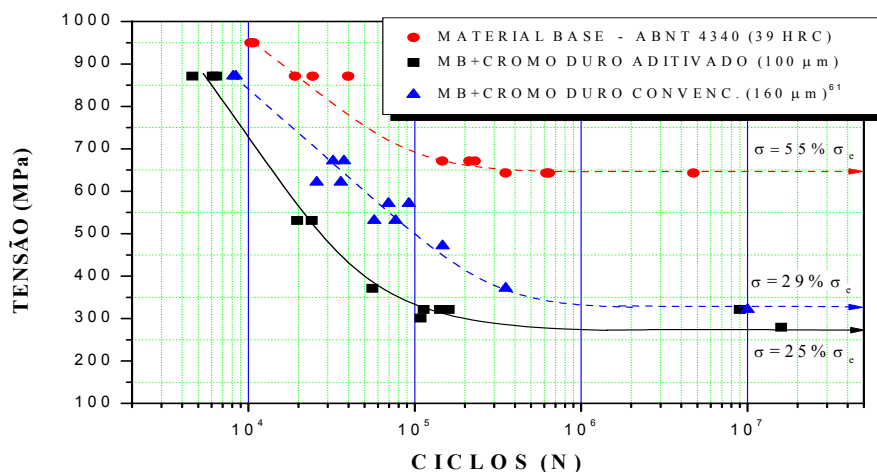


Figura 2.10 – Curvas  $\sigma - N$  usadas para estudar o comportamento em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com cromo ( NASCIMENTO 1999).

### 2.5.1 Limite de resistência à fadiga.

Para algumas ligas ferrosas e de titânio, a curva  $\sigma - N$  se torna horizontal para valores de  $N$  mais elevados, ou existe um nível de tensão limitante chamado de limite de resistência à fadiga, também chamado de *endurance limit*, abaixo do qual a falha por fadiga não irá ocorrer. Esse limite de resistência à fadiga representa o maior valor de tensão oscilante que não irá causar a falha após essencialmente um número infinito de ciclos (CALLISTER, 2002)

### **2.5.2- Resistência à fadiga**

A maioria dos metais não ferrosos não apresenta limite de resistência à fadiga. No lugar do limite de resistência (região horizontal da curva  $\sigma - N$ ), suas curvas prosseguem a uma baixa taxa de declínio nos elevados números de ciclos. Para estes metais, em vez de limite de resistência à fadiga, é necessário informar a resistência à fadiga, a qual é a tensão que o metal pode ser submetido para um especificado número de ciclos. Não existe um número de ciclos padrão, portanto, é necessário que cada tabela de resistência à fadiga especifique o número de ciclos para as quais as resistências são informadas. Algumas vezes, a resistência à fadiga de metais não ferrosos a  $10^8$  ou  $5 \times 10^8$  ciclos é erroneamente denominada de limite de resistência à fadiga. (METALS HANDBOOK, 1975).

### **2.5.3- Fadiga de alto e baixo ciclo**

Os comportamentos de fadiga podem ser classificados em dois domínios. Um associado com cargas relativamente elevadas que produzem não somente deformações elásticas, mas também alguma deformação plástica durante cada ciclo. Consequentemente, as vidas em fadiga são relativamente curtas. Este domínio é conhecido por fadiga de baixo ciclo. Para níveis de tensão mais baixos, nos quais as deformações são totalmente elásticas, tem-se como resultado vidas mais longas. Isto é chamado de fadiga de alto ciclo, uma vez que números de ciclos relativamente grandes são necessários para produzir falha por fadiga. (CALLISTER, 2002).

Na prática, esta distinção é feita determinando, se o componente da força aplicada durante o carregamento cíclico é elástico (alto ciclo) ou plástico (baixo ciclo), o qual por sua vez depende das propriedades do metal, bem como da magnitude da tensão nominal. Em condições extremas, a linha divisória entre fadiga de alto ciclo e de baixo ciclo pode ser menor que 100 ciclos. (METALS HANDBOOK, 1975).

## **2.6 FATORES QUE INFLUENCIAM NA VIDA EM FADIGA**

As curvas  $\sigma - N$  variam amplamente com as diferentes classes de materiais e estes são afetados por uma variedade de fatores. Processos que alteram as propriedades

mecânicas do material ou a sua microestrutura são passíveis de afetar as curvas  $\sigma - N$ . Outros fatores importantes incluem a tensão média, geometria da peça, meio ambiente, temperatura e tensões residuais (DOWLING, 1993).

### 2.6.1-Efeitos na superfície

Para muitas situações comuns de carregamentos, a tensão máxima em componentes ou estruturas ocorre em sua superfície. Consequentemente, a maioria das trincas que conduzem uma falha por fadiga também se origina na superfície, especialmente nos locais de concentração de tensões. Observa-se que a vida em fadiga é especialmente sensível à condição da superfície e à configuração do componente (CALLISTER, 1999).

Configurações, tais como: entalhes, furos, rasgos, cantos vivos, reduzem a vida em fadiga e devem ser levadas em conta nos critérios de projeto e evitadas dentro do possível. O exemplo de um projeto deficiente que permite a ocorrência de canto vivo, é apresentado na figura 2.11(a). Um bom exemplo de projeto, no qual a vida em fadiga foi melhorada com incorporação de um perfil arredondado na região de variação do diâmetro, é apresentado na figura 2.11(b).

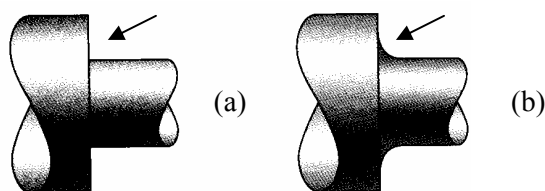


Figura 2.11 – Demonstração de como o projeto pode reduzir a concentração de tensão (CALLISTER, 1999).

Durante as operações de usinagem, pequenos arranhões e sulcos são invariavelmente introduzidos na superfície da peça pela ação de corte da ferramenta. Estas marcas superficiais reduzem a vida em fadiga. A melhora no acabamento superficial aumenta significativamente a vida em fadiga (CALLISTER, 1999).

A relação entre o acabamento superficial e vida em fadiga é apresentada na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Vida em fadiga de amostras de aço SAE 3130, ensaiadas em tensão alternada ( $\sigma_m=0$ ) a 67 Kgf/mm<sup>2</sup> (DIETER, 1981).

| Acabamento          | Rugosidade $\mu\text{m}$ | Vida em ciclos |
|---------------------|--------------------------|----------------|
| Torneado            | 2,67                     | 24.000         |
| Polimento parcial   | 0,15                     | 91.000         |
| Polido manualmente  | 0,13                     | 137.000        |
| Retificado          | 0,18                     | 217.000        |
| Retificado e polido | 0,05                     | 234.000        |
| Super acabado       | 0,18                     | 212.000        |

Outros tratamentos que alteram as propriedades da superfície dos metais, tais como: decarbonetação, cementação, nitretação, *shot peening*, eletrodeposição de metais, dentre outros, causam variações na resistência à fadiga. Os efeitos na resistência à fadiga são atribuídos principalmente à indução na superfície de tensões residuais (DIETER, 1981).

Melhorias na resistência à fadiga são obtidas com a indução de tensões compressivas na superfície dos metais, bem como através do aumento da dureza superficial (DIETER, 1981).

### 2.6.2 - Efeitos da tensão média ( $\sigma_m$ )

A variação da vida em fadiga em função da variação amplitude da tensão  $\sigma_a$ , pode ser representada em uma curva  $\sigma - N$ . A maioria das curvas  $\sigma - N$  são levantadas para a situação de tensão alternada ou ciclo reverso ( $R = -1$  e  $\sigma_m = 0$ ). A tensão média, contudo, pode ter um papel importante na vida em fadiga, cujo efeito pode ser demonstrado por uma série de curvas  $\sigma - N$  cada qual com diferentes valores de  $\sigma_m$ .

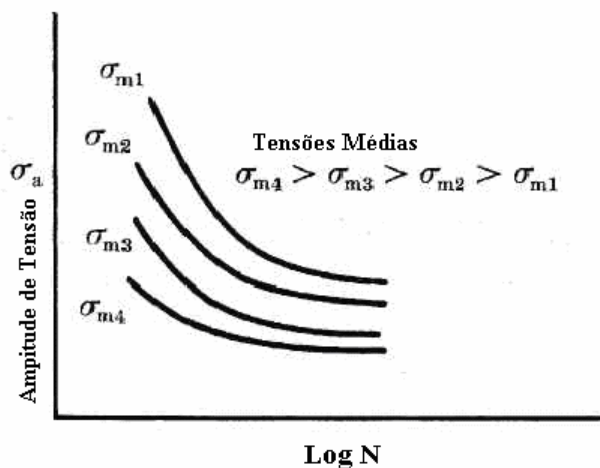


Figura 2.12 – Efeito da tensão média  $\sigma_m$  na curva  $\sigma - N$  (CALLISTER,1999).

Observando-se a figura 2.12, verifica-se que à medida que a tensão média aumenta, diminui o valor da amplitude de tensão  $\sigma_a$  que pode ser suportada sem que ocorra a fratura.

### 2.6.3 – Efeitos ambientais

O ambiente contendo agentes químicos agressivos pode acelerar a iniciação e o crescimento das trincas por fadiga. Um mecanismo é o desenvolvimento de *pits* de corrosão, os quais atuam como concentradores de tensão. Em outros casos, o meio ambiente agressivo causa aceleração no crescimento da trinca pela reação química e dissolução do material em sua ponta (DOWLING, 1993).

A falha que ocorre pela ação simultânea de uma tensão cíclica e um ataque químico é conhecida por fadiga associada à corrosão. Ambientes corrosivos possuem uma influência negativa e produzem vidas em fadiga mais curtas. Mesmo a atmosfera normal irá afetar o comportamento de fadiga de alguns materiais. Adicionalmente, a taxa de propagação de trincas é aumentada como resultado de um ambiente corrosivo. A natureza dos ciclos de tensão irá influenciar o comportamento de fadiga, por exemplo, a redução da frequência da aplicação da carga leva a períodos mais longos durante os quais a trinca encontra-se aberta e em contato com o ambiente, e assim a uma redução da vida em fadiga (CALLISTER,2002).

Amorim (2003) demonstrou o efeito ambiental ao ensaiar corpos de prova confeccionados com aço 35NCD16. Os corpos de prova foram ensaiados durante

quatro meses em um dispositivo simulador de uma atmosfera marítima. E na sequência foram submetidos ao ensaio de flexão rotativa. Os resultados deste ensaio estão sumarizados na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Variação da vida média em fadiga aço 35NCD16 exposto à atmosfera marítima (AMORIM, 2003).

| Ensaio de flexão rotativa<br>Tensão (MPa) | Vida média em fadiga (ciclos) |                                  | Percentual. de redução na vida em fadiga no CDP exposto à atm. marítima |
|-------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
|                                           | CDP original                  | CDP exposto à atmosfera marítima |                                                                         |
| 791*                                      | 10.200                        | -                                | 93%                                                                     |
| 801*                                      | -                             | 147.500                          |                                                                         |
| 691                                       | 256.500                       | 12.900                           | 99,5%                                                                   |

\* Níveis de tensão próximos o suficiente para que a comparação seja feita sem erros grosseiros, dada a inclinação da curva do metal base não exposto nesta região.

Amorim (2003) constatou que esta redução significativa da vida em fadiga estava relacionada à formação de *pits* de corrosão observados nos corpos de expostos à atmosfera marítima.

#### 2.6.4 – Efeitos de variáveis metalúrgicas.

Variações na microestrutura aumentam o potencial de alteração da curva  $\sigma - N$ , especialmente na fadiga de alto ciclo. Nos metais, a resistência à fadiga é geralmente aumentada pela redução do tamanho das inclusões e dos vazios, pela diminuição do tamanho do grão, bem como pelo aumento da densidade de discordância (DOWLING, 1993).

A figura 2.13 mostra os resultados obtidos com ensaios de corpos de prova polidos em condições de tensão alternada. As propriedades de fadiga para altos níveis de dureza são extremamente sensíveis à condições da superfície, tensões residuais e inclusões. As propriedades de fadiga podem ser reduzidas drasticamente apenas por traços de decarbonetação na superfície (DIETER, 1981).

Observa-se também, na figura 2.13, que a resistência à fadiga aumenta com o aumento da dureza até um determinado limite a partir do qual a resistência à fadiga diminui com o aumento da dureza. Nos altos níveis de dureza a sensibilidade às

condições da superfície, tensões residuais e inclusões prevalecem sobre os efeitos benéficos do aumento da dureza na resistência à fadiga, ocasionando a inversão da curva.

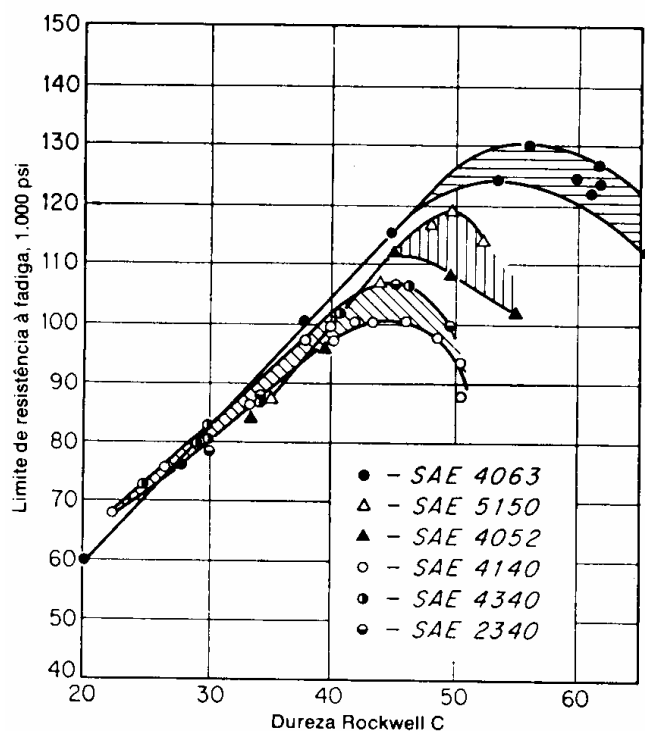


Figura 2.13 – Limite de fadiga de aços em função da dureza Rockwell C (DIETER, 1981).

As inclusões funcionam como concentradores de tensão ocasionando a nucleação de trincas. A figura 2.14 mostra uma trinca sendo nucleada a partir de uma inclusão superficial.



Figura 2.14 – Trinca nucleada a partir de uma inclusão superficial (AMORIM, 2003).

### 2.6.5 – Efeitos das tensões residuais

Geralmente a tensão compressiva melhora a vida em fadiga, porque ela retarda a iniciação e a propagação da trinca. A tensão trativa, ao contrário, facilita a iniciação da trinca reduzindo o limite de resistência à fadiga do material (PHYSIQUE & INDUSTRIE, 2003).

A aplicação de carga externa no componente deve introduzir uma distribuição de tensões de acordo com a carga aplicada e a geometria do componente. Se o comportamento é elástico, o material responde com a soma das distribuições de tensões externa e residual:

$$\sigma = \sigma_{\text{carga externa}} + \sigma_{\text{residual}} \quad (2.5)$$

Se é aplicada uma carga cíclica, a tensão cíclica externa terá uma certa amplitude de tensão ( $\sigma_a$ ) e uma tensão média ( $\sigma_m$ ). Entretanto, a tensão residual está permanentemente presente. Ela não afeta a amplitude de tensão, mas interfere na tensão média:

$$\sigma_m = \sigma_{m, \text{ carga externa}} + \sigma_{\text{residual}} \quad (2.6)$$

Se a tensão residual é trativa (+) ela aumenta a tensão média, implicando em uma diminuição da amplitude de tensão que pode ser suportada pelo material sem que ocorra a fratura, o que reduz a vida em fadiga, conforme ilustra a figura 2.12. Se a tensão for compressiva (-) ocorre o inverso, neste caso, aumentando a vida em fadiga. (PADILHA, 2004).

Se um corpo receber um carregamento externo, a tensão real será a composição das tensões causadas pelos esforços externos e a tensão residual pré-existente (TORRES, 2002).

Na figura 2.15, a curva (a) representa a tensão residual pré-existente, a curva (c) o carregamento externo e a curva (b) representa a tensão real resultante das curvas (a) e (c).

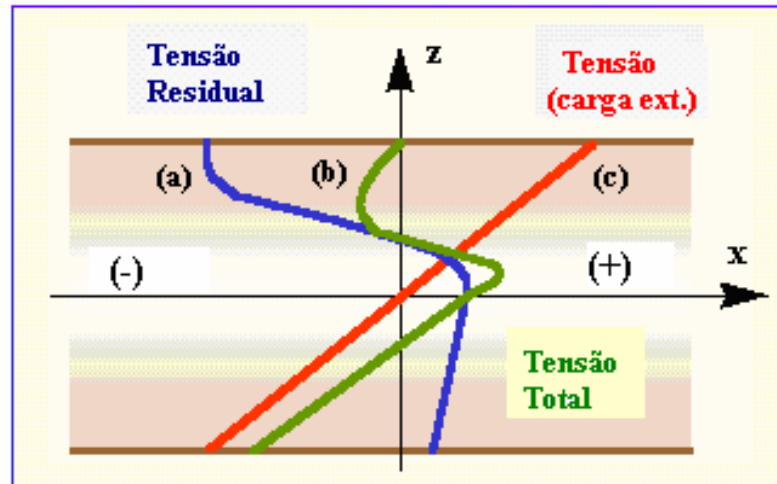


Figura 2.15 – Representação gráfica da interação da tensão residual pré-existente com um carregamento externo. (PHYSIQUE & INDUSTRIE, 2003).

A figura 2.16 representa as curvas  $\sigma$  - N para um aço nas seguintes condições: sem recobrimento, com recobrimento de níquel com tensão compressiva de 6000 psi e recobrimento de níquel com tensão de tração de 25.000 psi. O recobrimento de níquel com tensão trativa reduziu em 35% o limite de resistência à fadiga enquanto o outro, com tensão compressiva, praticamente não alterou o limite de resistência à fadiga (ALMEN, 1951).

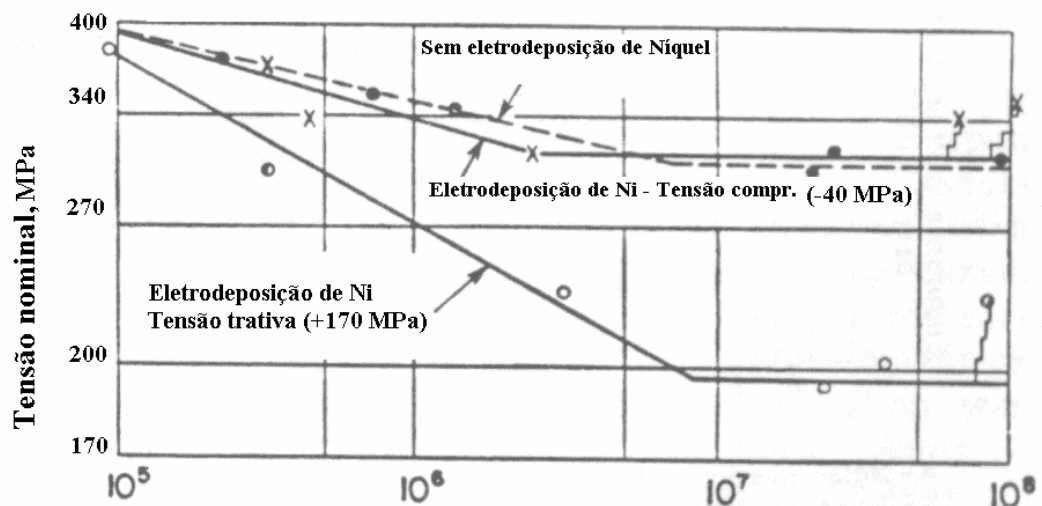


Figura 2.16 - Limite de resistência à fadiga de aço com eletrodepósitos de níquel com tensões residuais controladas. (ALMEN, 1951)

## 2.7 - TENSÕES RESIDUAIS

### 2.7.1 – Considerações iniciais

Tensões residuais ou tensões internas existem em diversos componentes de projetos, podendo ser benéficas ou prejudiciais. Aplicações comuns de tensões residuais benéficas são encontradas em revólveres, raios de roda de bicicleta, rebites, rotor de turbina, pontes, etc. Tensões residuais em componentes de máquinas são geralmente consideradas indesejáveis, devido a empenamentos e distorções após tratamento térmico, trincas produzidas na têmpera, corrosão sob tensão, dentre outras. Através de uma melhor compreensão da origem e controle das tensões residuais, muitas destas características indesejáveis são superadas. Nas últimas décadas, importantes avanços na engenharia têm contribuído para a utilização da tensão residual para melhorar a resistência à fadiga de componentes fabricados (METAL ENGINEERING – DESIGN, 1965).

### 2.7.2 - Definição e tipos de tensões residuais.

Tensões residuais são constituídas por um sistema de tensões trativas e compressivas que existem nos materiais, sem a aplicação de um carregamento externo. O sistema de tensões residuais em um corpo deve estar em equilíbrio estático. Assim, a força total que atua em qualquer plano do corpo e o momento total das forças em qualquer plano devem ser zero (DIETER, 1981).

A tensão residual é causada geralmente pela heterogeneidade da deformação plástica. Devido à deformação plástica local, a zona plástica alonga-se nas vizinhanças da zona elástica e introduz tensão residual após a retirada de carga do sistema (SCHIJVE; RICE, 2001, 1997).

As tensões trativas e compressivas ocorrem simultaneamente em um corpo e são auto equilibradas. Se um carregamento externo for aplicado, a situação de equilíbrio é interrompida.

Dependendo da escala na qual o material é observado, as tensões residuais são

em geral classificadas em três tipos:

- Tipo I – São denominadas macro tensão e se estendem por no mínimo diversos grãos do material.
- Tipo II – Este tipo de tensão está presente em um grão em particular.
- Tipo III – As tensões do tipo III se estendem por áreas sub microscópicas, em distâncias na escala atômica dentro do grão.

As tensões do tipo II e do tipo III são também chamadas de micro tensões. (PHYSIQUE & INDUSTRIE, 2003).

Usualmente, a superposição dos três tipos de tensões residuais determina o estado de tensão residual atuando em um ponto particular do material. Para o estudo do comportamento micro estrutural ou micro localizado, as tensões dos tipos II e III são as que deverão ser consideradas. Para o estudo macroscópico, que ocorre nos projetos mecânico e estrutural, as tensões do tipo I são levadas em consideração (TORRES, 2002).

As figuras 2.17. 2.18 e 2.19 representam respectivamente, de forma esquemática, as tensões do tipo I, do tipo II e a comparação das tensões dos tipos I, II e III na microestrutura do material.

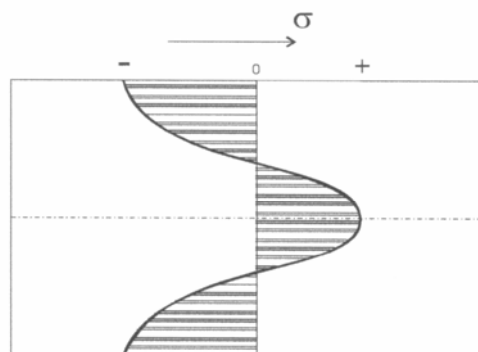


Figura 2.17 – Equilíbrio de tensões residuais do tipo I ao longo de uma amostra (TORRES, 2002).

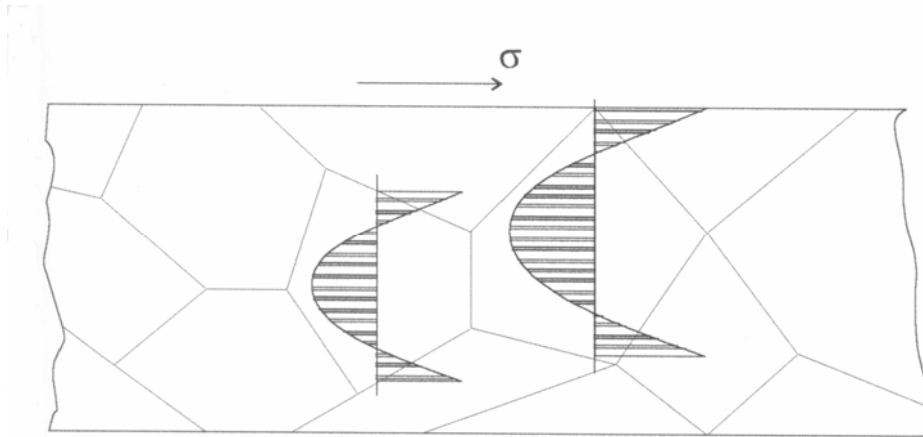


Figura 2.18- Equilíbrio de tensões residuais do tipo II ao longo de um ou mais grãos. (TORRES, 2002).

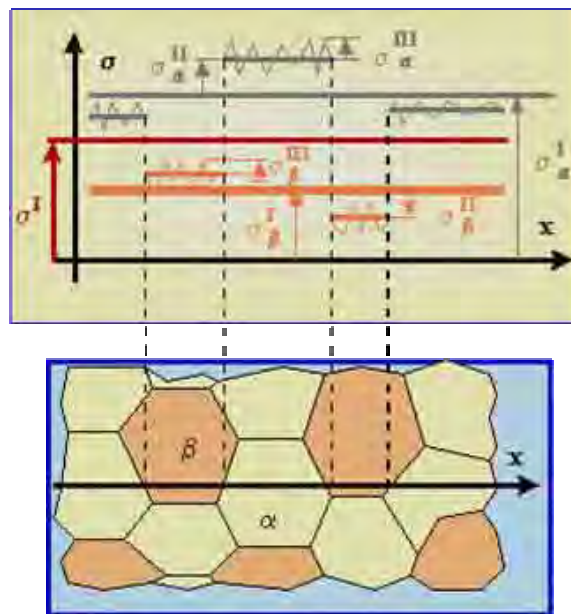


Figura 2.19 - Comparação das tensões dos tipos I, II e III na microestrutura do material (PHYSIQUE & INDUSTRIE, 2003).

### 2.7.3 - Formação das tensões residuais.

As tensões residuais serão produzidas se as regiões do material forem deformadas plasticamente, de tal forma que as incompatibilidades das deformações passem a ser permanentes. Os materiais que contêm tensões residuais, não possuem nenhuma diferença ou indicação externa de sua existência, no entanto, sua presença pode alterar significativamente o seu comportamento físico e mecânico (TORRES, 2002).

Deformações heterogêneas ocasionadas por carregamentos elasto-plásticos,

contrações térmicas, transformação de fase, contrações e expansões de camadas metálicas eletro depositadas, induzem a formação das tensões residuais.

A maioria dos processos de fabricação produz tensões residuais. A tabela 2.4 apresenta alguns destes processos.

Tabela 2.4- Exemplos de processos de fabricação que induzem tensões residuais (PHYSIQUE & INDUSTRIE, 2003).

|                                     |                                                   |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Processos primários                 | Fundição, extrusão, laminação, forgeamento, dobra |
| Remoção de superfície               | Torneamento, fresagem                             |
| Junção                              | Solda, brazagem                                   |
| Tratamentos de superfície mecânicos | <i>Shot peening, peen forming</i>                 |
| Tratamento térmico                  | Têmpera                                           |
| Tratamentos químico e termoquímico  | Nitretação, carbonetação                          |
| Eletrodeposição.                    | Cromação, niquelação, cadmiação.                  |

#### 2.7.3.1 - Indução de tensão residual pelo tratamento *shot peening*

O *shot peening* é um processo de trabalho a frio no qual, esferas de aço, vidro ou cerâmica, são projetadas na superfície do material com alta velocidade. Após o impacto, o material é deformado plasticamente na região superficial, tendendo a alongar-se. Esta tendência ao alongamento é impedida pela parte inferior, que se deforma apenas elasticamente, gerando tensões de compressão nas camadas afetadas plasticamente (TORRES, 2002).

Para aumentar o limite de resistência à fadiga de um material, o *shot peening* é frequentemente recomendado, sendo com frequência, anunciado que este tratamento introduz tensões residuais compressivas. Contudo, as trincas iniciais nucleadas nos grãos próximos à superfície, não são fortemente afetadas por uma pequena tensão compressiva elástica. Realmente, os estágios de propagação de trincas muito longos, podem continuar seus crescimentos sob um campo cíclico remoto de tensão compressiva. A deformação cristalográfica ocasionada pelo amassamento do grão, produzido pelo *shot peening*, é um efeito importante, visto que esta deformação induzirá numerosas facetas na configuração morfológica da trinca. Em resumo, para conseguir a máxima resistência à fadiga é importante que haja diferentes direções no crescimento das trincas iniciais (Miller, 1993).

O estrito controle durante o processo de *shot peening* é essencial para garantir a repetibilidade e a conformidade com as especificações técnicas. O material, tamanho, forma, dureza, bem como o ângulo de impacto das esferas, devem ser rigidamente controlados para os resultados se mantenham dentro dos padrões especificados.

A intensidade de *peening* é controlada pelo teste Almen. A profundidade da camada compressiva é proporcional à intensidade de *peening* definida através do teste Almen (NASCIMENTO, 1999).

A figura 2.20 mostra a profundidade da camada compressiva em várias intensidade de *peening*, para o aço ABNT 4340 53 HRc.

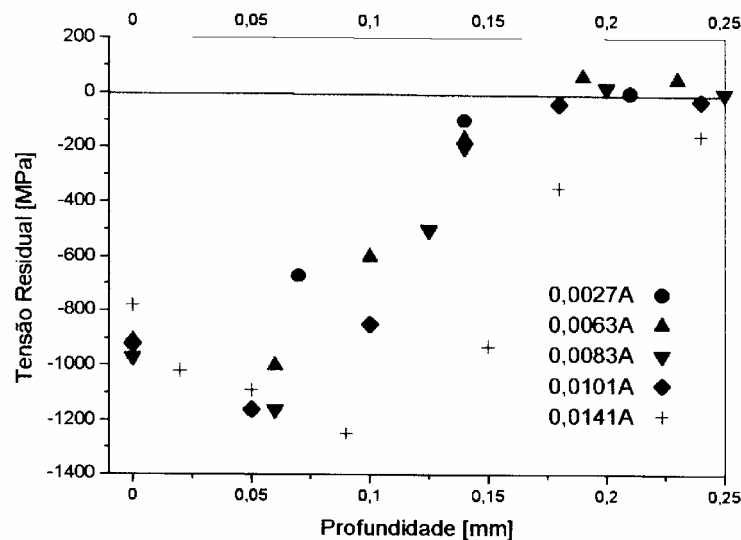


Figura 2.20 – Resultados de medições de tensões residuais aço ABNT 4340 53 HRc (TORRES 2002).

O teste Almen é realizado com o auxílio de placas finas padronizadas, colocadas paralelas ao material tratado, para receber tratamento *shot peening* em iguais condições. O impacto das esferas induz tensões residuais nas placas, que se deformam, formando um pequeno arco. Medindo-se a flecha do arco formado e, com a ajuda de uma tabela, obtêm-se a intensidade Almen expresso em termos da deformação da placa. Existem três padrões de placa Almen: “N”, “A” e “C”. A diferença de cada placa está na sua espessura. A especificação da intensidade Almen deve incluir tanto a deformação ocorrida na placa, em polegada, como o tipo de placa usada. Ex. 0,010A ( 0,01 polegada de deformação  $\cong$  0,25 mm com placa tipo A) (TORRES, 2002).

A figura 2.21 mostra de forma esquemática o sistema placa Almen para o controle da intensidade de *peening*.

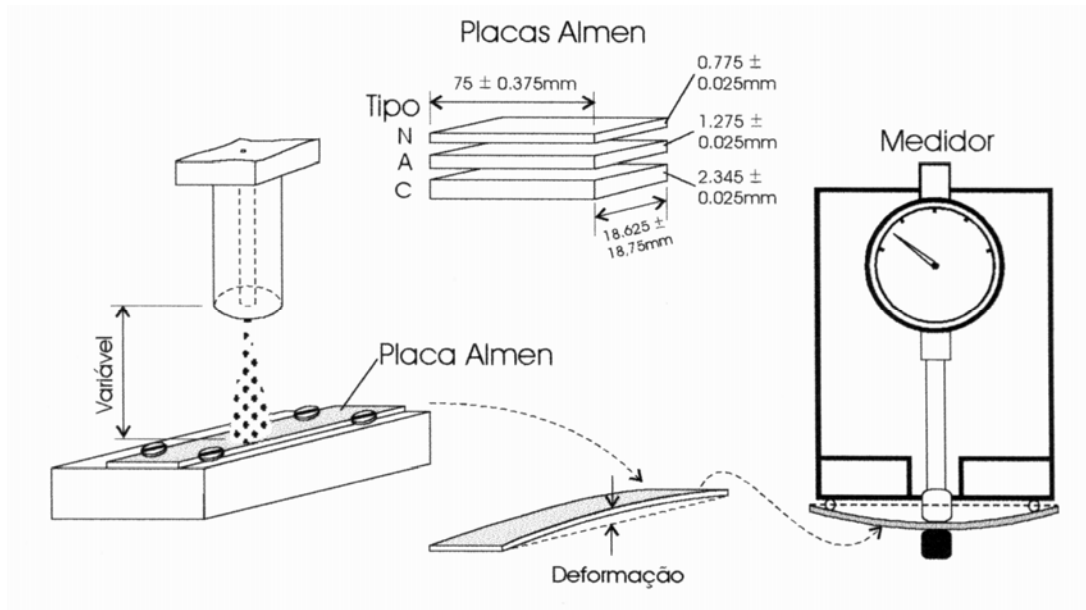


Figura 2.21 - Esquema do sistema placa Almen (TORRES, 2002).

### 2.7.3.2 – Indução de tensão residual pela eletrodeposição de metais

Há muitos anos se sabe da formação de tensões residuais trativas ou compressivas nas camadas metálicas eletrodepositadas. Em 1877, Mills niquelou uma esfera prateada de um termômetro e verificou um aumento da coluna de mercúrio durante a eletrodeposição. Através deste experimento ficou demonstrada uma contração na camada de níquel, resultando em uma tensão de tração (GALVANOTÉCNICA PRÁTICA, 1973).

A norma ASTM B 636 – 84 (2001) define:

- Tensão compressiva (-): Tensão desenvolvida durante o processo de eletrodeposição que tende a causar uma expansão da camada eletrodepositada.
- Tensão interna : Tensão líquida que permanece no depósito quando a mesma está livre de forças externas. A tensão interna tende a comprimir ou alongar o depósito.

- Tensão trativa (+): Tensão desenvolvida durante o processo de eletrodeposição que tende a causar uma contração da camada eletro depositada.

Uma simples analogia pode ser usada para demonstrar a diferença entre as tensões trativas e compressivas.

Depósito com tensão interna trativa pode ser considerado, como uma mola espiral ou uma tira de borracha esticada fixada a um substrato livre de tensões (antes da deposição). O depósito com tensão trativa (espiral expandida), “tenta” uma contração em relação ao substrato gerando uma tensão compressiva em sua superfície, conforme apresentado na figura 2.22.



Figura 2.22 - Depósito com tensão de tração(espiral expandida) (STEIN B., 1996).

Depósitos com tensão compressiva, assemelha-se a uma espiral comprimida fixada ao substrato. O depósito com tensão compressiva, espiral comprimida, “tenta” uma expansão em relação ao substrato gerando uma tensão trativa em sua superfície, conforme apresentado na figura 2.23.



Figura 2.23 - Depósito com tensão de compressão (espiral comprimida) (STEIN B, 1996).

Uma vez que, depósitos reais sempre se formam em camadas bi-dimensionais, o modelo unidimensional de tensão proposto acima, é meramente uma abstração científica conveniente. Por ora, este modelo ajuda a ilustrar que, semelhante a uma espiral, um depósito tensionado mostra uma força elástica interna ocasionando a sua expansão ou contração se a aderência entre o depósito e o substrato pudesse ser rompida. Como a aderência entre o depósito e o substrato em geral é forte, dependendo

da espessura e propriedades elásticas do depósito, o substrato sofre uma distorção, adquirindo uma forma côncava ou convexa, aliviando parcialmente a tensão interna do depósito (STEIN B., 1996).

O depósito com tensão interna trativa aplicada em um substrato composto por uma chapa fina, adquire formato côncavo devido à contração do depósito. Com tensão interna compressiva, adquire formato convexo devido à expansão do depósito.

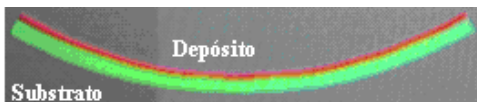


Figura 2.24 – Depósito com tensão trativa – superfície côncava. (STEIN B., 1996).

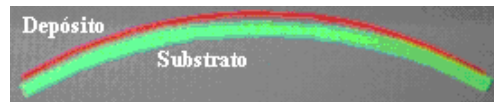


Figura 2.25 – Depósito com tensão compressiva – superfície convexa (STEIN B., 1996).

Este fenômeno foi utilizado por Stoney em 1909 para fazer a primeira medição quantitativa da tensão em eletrodepósitos, utilizando como instrumento uma tira metálica plana com isolamento elétrico em uma das faces (BRENNER A. and Senderoff S. 1949).

Ao contrário se o depósito for feito em uma peça ou chapa grossa, que não podem se deformar pela ação das tensões trativas ou compressivas (contração ou expansão do depósito), o depósito tende a trincar para aliviar as tensões (ASME HANDBOOK, 1965).

As trincas nos eletrodepósitos ocorrem quando as tensões excedem o limite de resistência do metal depositado. Este é o caso do depósito de cromo mostrado na figura 2.26. Durante a eletrodeposição do cromo formam-se hidretos de cromo que são instáveis. Com a contração do volume, devido à decomposição dos hidretos de cromo da camada eletrodepositada, surgem tensões trativas internas elevadas que ultrapassam a resistência do metal numa certa espessura de camada, provocando trincas no filme metálico (GALVANOTÉCNICA PRÁTICA, 1973).

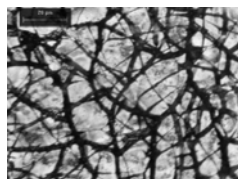


Figura 2.26- Microtrincas em depósito de cromo duro obtido a partir de processo acelerado (NASCIMENTO, 1999).

O depósito de níquel obtido através do processo *hard níquel* e processo a base de cloreto possuem elevado nível de tensão interna as quais podem ocasionar trincas no depósito (LOWENHEIN, 1974).

Quão alta é uma tensão interna elevada? A melhor resposta é através da comparação de alguns processos de eletrodeposição. No processo de cromeação na faixa decorativa (camadas da ordem de décimos de  $\mu\text{m}$ ) a tensão interna é usualmente de 620 a 1390 MPa. No processo Níquel tipo Watt sem aditivos é em torno de 180 a 310 MPa.. No cobre depositado a partir de solução cianídrica sem aditivos é de 36 a 103 MPa, e depositado a partir de solução ácida é de 0,7 a 3,5 MPa (BAUDRAND, 1996).

### 2.7.3.3 – Fatores que influenciam na tensão residual dos eletrodepósitos.

Numerosas publicações sobre teorias de tensões em eletrodepósitos, parecem concordar em um ponto: é difícil encontrar uma variável de processo que não influencie na tensão residual. A tensão residual, talvez seja a mais abrangente característica de um sistema de eletrodeposição (STEIN B., 1996).

A tabela 2.5 mostra algumas variáveis típicas que afetam a tensão residual dos depósitos.

Tabela 2.5 – Variáveis que afetam a tensão residual dos eletrodepósitos (STEIN B., 1996).

---

|                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Densidade de Corrente.                                                                                                               |
| Concentração dos componentes da solução de eletrodeposição (Sais metálicos, sais condutivos, agentes tamponadores, molhadores, etc). |
| Concentração de aditivos (Orgânicos e inorgânicos).                                                                                  |
| Concentração de impurezas (Químicas ou físicas), incluindo traços de impurezas.                                                      |
| Temperatura do banho.                                                                                                                |
| Taxa de agitação.                                                                                                                    |
| pH da solução.                                                                                                                       |
| Geometria da célula de eletrodeposição.                                                                                              |
| Composição e condição dos anodos.                                                                                                    |
| Relação entre as superfícies anodo/catodo.                                                                                           |
| Qualidade da fonte de corrente (Ondulações residuais da DC - <i>ripple</i> ).                                                        |
| Espessura do depósito.                                                                                                               |
| Natureza e condição do substrato.                                                                                                    |

---

Esta longa lista de variáveis pode parecer que o controle da tensão interna seja algo muito difícil. Contudo, com metódicas tentativas de aproximação aliadas a um rígido controle de processo e um bom gerenciamento, o controle das tensões internas na eletrodeposição é perfeitamente possível.

O campo de variação dos valores das tensões internas varia de processo a processo. Por exemplo, o processo de niquelação a base de sulfamato de níquel possui uma amplitude de variação que vai de tensões compressivas a tensões trativas.

A figura 2.27 mostra a variação da tensão residual de eletrodepósitos de cromo obtido a várias temperaturas. Nos eletrodepósitos obtidos em temperaturas mais baixas, 46 e 50 °C, nas faixas de menor espessura de camada o valor da tensão é mais elevado. Com as trincas que surgem neste depósito, ocorre alívio de tensões, reduzindo a tensão residual da camada de cromo. Nos eletrodepósitos obtidos em temperaturas mais elevadas os eletrodepósitos de cromo existem sem produzirem trincas e portanto com um nível de tensão residual mais elevado. (BRENNER A. and SENDEROFF S., 1949).

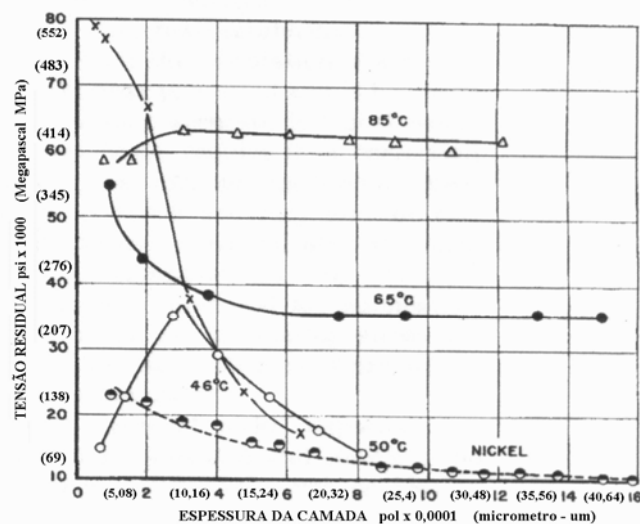


Figura 2.27 – Valores de tensão residual de eletrodepósitos de cromo em várias temperaturas e espessura de camada. (BRENNER A. and SENDEROFF S., 1949).

\*(A curva do níquel foi incluída na mesma escala para comparação).

A tensão interna do eletrodepósitos de níquel processo sulfamato diminui com o aumento da temperatura do eletrólito, como mostra a figura 2.28(a), mas em relação à densidade de corrente ocorre o inverso. A figura 2.28(b) mostra o aumento da tensão residual com o aumento da densidade de corrente.

Para eletrólitos tipo sulfamato com alta taxa de deposição, operados com alta densidade de corrente, quando bem controlados, é possível a obtenção de eletrodepósitos com tensão residual em níveis próximos a zero ou até em faixas compressivas. O aumento da tensão ocasionado pela alta densidade de corrente é compensado pela operação do eletrólito em temperaturas mais elevadas, que diminuem a tensão residual. (DI BARI, 1999).

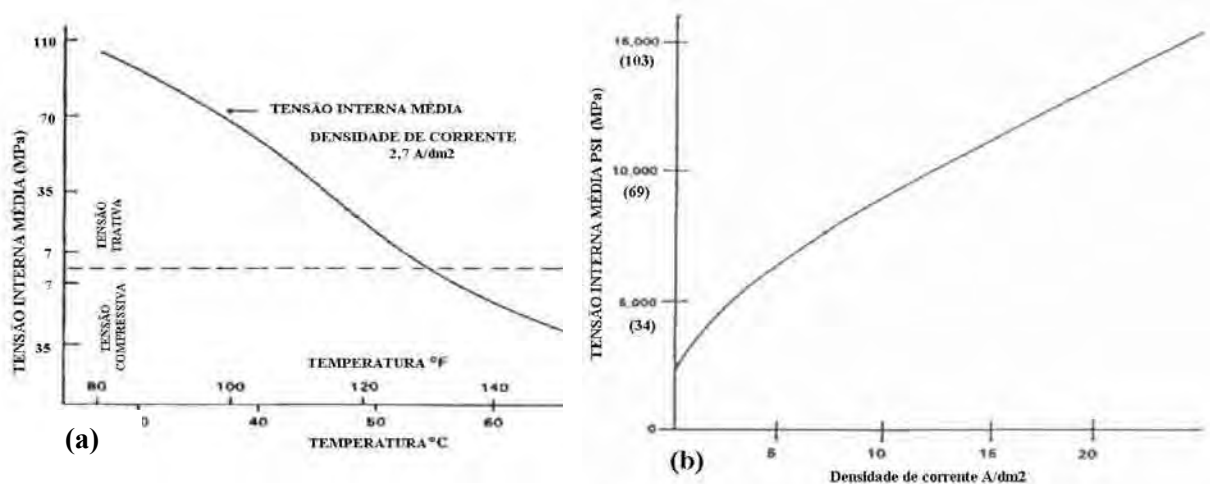


Figura 2.28 – Variação da tensão interna de eletrodepósitos de níquel processo sulfamato em função da temperatura (a) e em função da densidade de corrente (b) Adaptado de (MACDERMID INCORPORATED, 2001).

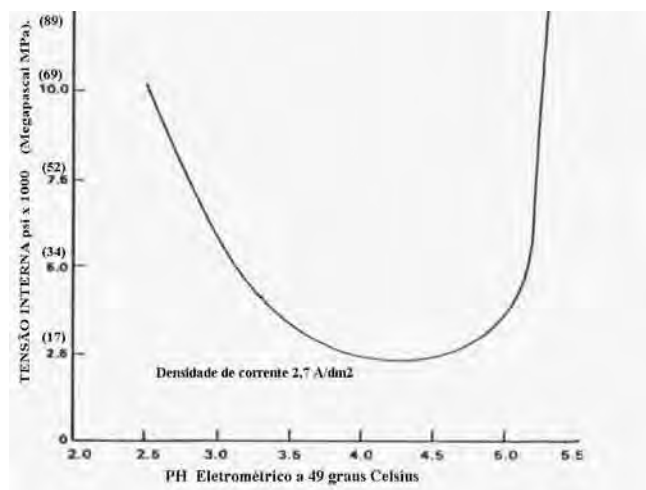


Figura 2.29 - Variação da tensão interna de eletrodepósitos de níquel em função do pH, processo sulfamato de níquel ( MACDERMID INCORPORATED, 2001).

Componentes químicos dos eletrólitos de níquel, por exemplo, os ácidos cuja concentração é controlada através do pH, influem também na tensão residual do eletrodepósito. A figura 2.29 mostra a variação da tensão residual em função da

variação do pH de um eletrólito de níquel a base de sulfamato cujo menor valor de tensão residual situa-se na faixa pH entre 3,8 a 4,2.(GALVANOTÉCNICA PRÁTICA, 1973).

#### 2.7.3.4 – Controle da tensão residual dos eletrodepósitos.

As variáveis de processo que influem na tensão residual dos eletrodepósitos mostradas na tabela 2.5, ou são constantes para uma dada combinação de processo/equipamento (Por exemplo, geometria da célula de eletrodeposição, relação anodo/catodo) ou podem ser mantidas dentro de uma pequena faixa de variação por meio de controles do processo (Por exemplo, concentração dos principais componentes do eletrólito, temperatura, pH). Este conjunto de variáveis definidas e controladas caracteriza um eletrólito em particular (STEIN B., 1996).

Através da seleção de um eletrólito, no qual as variáveis de processo são mantidas dentro de um pequeno campo de variação, é possível levantar o perfil de tensão de um processo de eletrodeposição. O perfil de tensão é a relação entre a densidade de corrente da eletrodeposição e a tensão interna correspondente do processo de eletrodeposição. O perfil de tensão é obtido através de sucessivas medições da tensão residual em vários níveis de densidade de corrente do processo, mantendo fixas as demais variáveis. A figura 2.30 mostra o perfil da tensão residual de três eletrólitos de níquel a base de sulfamato (STEIN B., 1996).

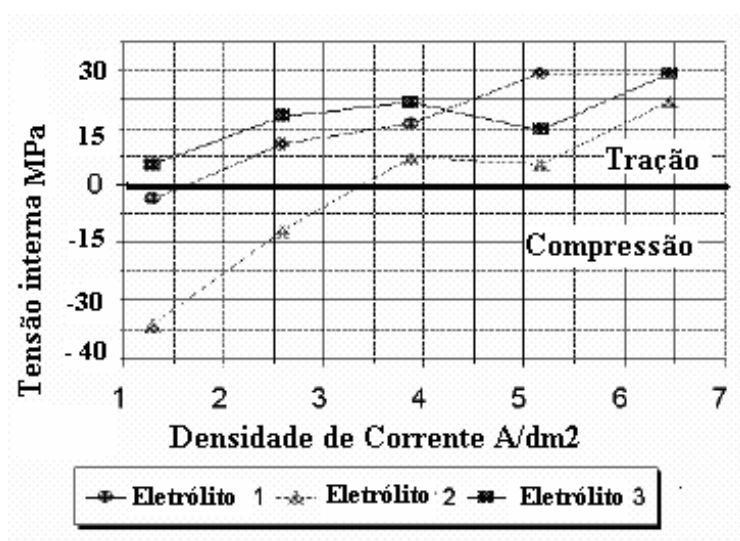


Figura 2.30 – Perfil da tensão interna em eletrólitos de níquel a base de sulfamato. Adaptado de (STEIN B., 1996).

Variando convenientemente os parâmetros de controle do eletrólito, outros perfis de tensão poderão ser obtidos. Se a temperatura for aumentada, por exemplo, em um eletrólito de níquel a base de sulfamato a curva do perfil de tensão tende para a região de tensões compressivas (Eletrólito 2 da figura 2.30). Desta forma os parâmetros de controle do processo poderão ser otimizados para a obtenção do perfil de tensões que melhor atenda as necessidades.

#### 2.7.3.5 – Determinação das tensões residuais

Durante as últimas décadas vários métodos qualitativos e quantitativos foram desenvolvidos para avaliar as tensões residuais. Em geral, estes métodos são categorizados em destrutivos e não destrutivos.

A primeira categoria de métodos se baseia na destruição do estado de equilíbrio da tensão residual por meio de processos mecânicos ou remoção de camadas do componente mecânico. A redistribuição das forças internas provoca deformações localizadas, as quais são medidas para avaliar o campo de tensões residuais. As tensões residuais são deduzidas a partir das medições das deformações por métodos baseados na teoria da elasticidade em combinação com modelos matemáticos. Esta categoria de métodos é sensível somente às tensões residuais macroscópicas ou tensões do tipo I. Os métodos mais comuns incluídos nesta categoria são: o método do furo cego e o método de remoção de camadas.

Os métodos não destrutivos são baseados na relação entre a variação dos parâmetros físicos e metalográficos do material e a variação da tensão residual. Esta categoria inclui os métodos: Difração de raio X, Difração de nêutrons, Ultrassônico e Magnético (PHYSIQUE & INDUSTRIE, 2003).

Além dos métodos citados acima, existem outros métodos utilizados para medir a tensão residual introduzidas durante o processo de eletrodeposição. Estes métodos são baseados na medição da deformação que a tensão residual do eletrodepósito produz em tira metálica, como mencionado anteriormente na seção 2.7.3.2 . Desde a primeira medição da tensão residual em eletrodepósitos feita por Stoney em 1909 muitos métodos foram desenvolvidos dos quais destacamos o *Spiral Contractometer*

desenvolvido por Brenner e Senderof em 1949. Este método, descrito na norma ASTM B 636 – 84 (2001), ainda é amplamente utilizado no controle das tensões residuais.

#### 2.7.3.5.1 – Método de determinação da tensão residual por difração de raio X.

Este método se baseia na medida das variações das distâncias entre os planos do reticulado dos materiais cristalinos, feita por meio da técnica de difração de raio X.

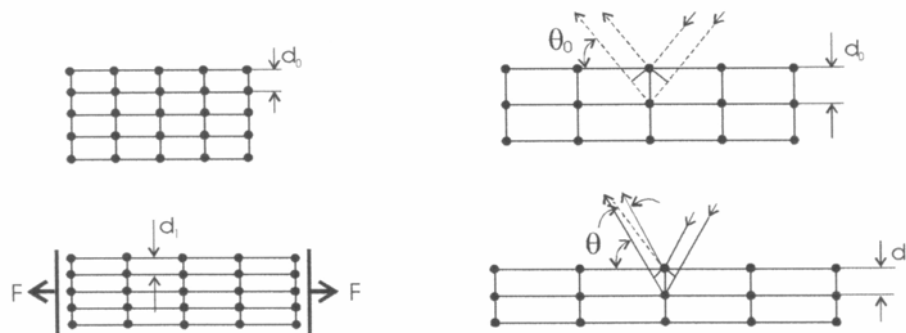


Figura 2.31 - Princípio da medida por difração de raio x (TORRES, 2002).

Através da relação de Bragg e da análise teórica da deformação da rede em relação às tensões aplicadas, utilizando a teoria clássica da elasticidade (TORRES, 2002), é demonstrado que:

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{1 + \nu} \cot \theta \cdot K_1 (L_2 - L_1) \frac{1}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1} \quad (2.5)$$

Onde:  $\sigma_{\phi}$  = Tensão residual.

$\nu$  = Coeficiente de Poisson.

$E$  = Módulo de elasticidade.

$\theta$  = Ângulo de difração.

$\psi_1$  e  $\psi_2$  = Ângulos de incidência.

$L_1$  e  $L_2$  = Distâncias medidas entre a sensibilização causada no filme devido ao raio difratado e a referência no mesmo filme.

Teodósio e colaboradores (1997) desenvolveram metodologia e equipamento denominado Síntese, para a determinação da tensão residual a partir das distâncias  $L_1$  e  $L_2$ . A figura 2.32 apresenta o esquema da medição de  $L_1$  e  $L_2$  através do equipamento desenvolvido por Teodósio e colaboradores.

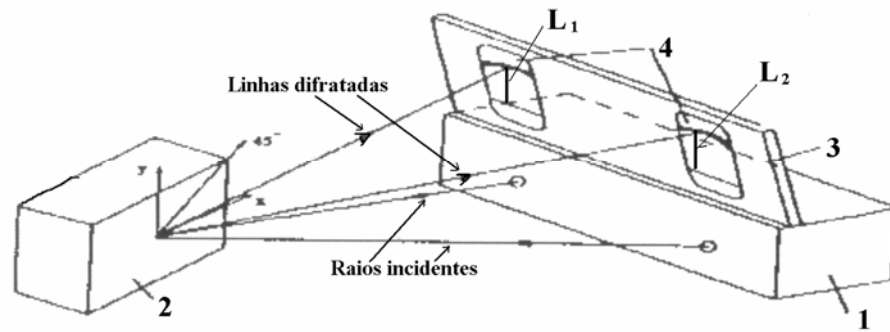


Figura 2.32 – Esquema de medição das tensões residuais no equipamento Síntese (TEODÓSIO,1997).

No colimador (1), são formados dois raios incidentes, no ponto de análise de tensões na amostra (2), sob os ângulos  $\psi_1=0^\circ$  e  $\psi_2=50^\circ$ . No cassete (3), em filmes expostos ao raio X, são registradas as linhas difratadas correspondentes aos ângulos  $\psi_1=0^\circ$  e  $\psi_2=50^\circ$  e as linhas de referência obtidas na calibração do equipamento. Ao longo do eixo das janelas (4), entre as intensidades máximas e as linhas de referência, são feitas as leituras das distâncias  $L_1$  e  $L_2$  utilizadas no cálculo da tensão no ponto irradiado.

A determinação da tensão residual é obtida através da equação 2.6.

$$\sigma_\phi = A_0(L_2 - L_1) \quad (2.6)$$

Onde:  $\sigma_\phi$  = Tensão residual

$A_0$  inclui o fator  $K_1$  e as constantes  $v$ ,  $\theta$  e  $E$  da equação 2.5.

$L_1$  e  $L_2$  = Distâncias medidas entre a sensibilização causada no filme devido ao raio difratado e a referência no mesmo filme.

A técnica da difração de raio X é não destrutiva para as medidas na superfície da amostra, mas é destrutiva para as medidas sub-superficiais, visto que esta técnica só é capaz de captar os feixes difratados pelas primeiras camadas do material da amostra, exigindo a remoção de todo o material acima da camada a ser estudada.

A obtenção de um perfil confiável de tensões residuais em função da profundidade será possível se a série de remoções não alterarem a tensão residual presente na camada exposta. Assim, os processos mecânicos de remoção que em geral desenvolvem tensões residuais, devem dar lugar a remoção por processos corrosivos. Um outro fator limitante de método é a não incidência dos feixes difratados sobre o filme para alguns materiais. Esta limitação se deve a fatores ligados ao espaçamento atômico, ao modo de empacotamento e às orientações da rede cristalina (TEODÓSIO,1997).

#### 2.7.3.5.2 - Método do contractômetro (*Espiral Contractômetro*) para determinação da tensão residual de camadas metálicas química ou eletroliticamente depositadas.

Este método se baseia na eletrodeposição de uma camada metálica na superfície externa de uma hélice. A hélice é preparada através do enrolamento de uma tira em torno de cilindro seguido de recozimento. Em operação, uma extremidade da hélice é fixa e a outra é livre para permitir o movimento conforme o desenvolvimento da tensão. A extremidade livre é ligada a uma agulha através de uma haste acoplada a uma engrenagem, que amplia o movimento da hélice. Conforme a deposição se desenvolve na hélice, a tensão no depósito ocasiona uma torção no sentido horário ou no sentido anti-horário, dependendo, se a tensão é compressiva (-) (expansão da camada) ou trativa (+) (contração da camada). A partir da deflexão da agulha e de outros dados a tensão interna pode ser calculada ASTM B 636-84 (2



seção 2.7.3.3. Por esta razão, uma correlação estreita entre tensão do ensaio e tensão na peça é obtida quando as condições do ensaio se equiparam àquelas utilizadas na eletrodeposição da peça.

Antes da primeira utilização, o aparelho deve ser calibrado. A frequência de calibração varia com o uso e a extensão do ataque da solução química de remoção de camadas na reutilização da hélice. A calibração consiste essencialmente na determinação da força requerida por grau de deflexão do mostrador, quando uma massa conhecida é suspensa através de um braço de alavanca na hélice montada. Os dados necessários para o cálculo da calibração expressos em unidades métricas, são os seguintes:

W = massa utilizada na calibração.

A = comprimento do braço de alavanca ( m ).

P = passo da hélice ( m ).

t = espessura da tira (m) utilizada para fazer a hélice (m).

grau<sub>def</sub> = grau de deflexão; diferença na leitura no mostrador causada pela massa.

g = aceleração da gravidade – 9,8 m/s<sup>2</sup>.

Z = constante de calibração da hélice  $\left( \frac{MPa}{m \cdot grau_{def}} \right)$ .

$$Z = \frac{2(w)(a)(g)}{p(t)grau_{def}} \times 10^{-6} \quad (2.7)$$

Cálculo da tensão interna:

$$\text{Tensão interna, } \sigma \text{ em MPa} = \frac{Z \cdot D}{\tau} \quad (2.8)$$

onde : Z = constante de calibração da hélice  $\left( \frac{MPa}{m \cdot grau_{def}} \right)$ .

D = diferença na leitura no mostrador durante o ensaio, graus.

$\tau$  = espessura da camada eletrodepositada sobre a hélice, m.

Reprodutibilidade – A reprodutibilidade dos resultados é em redor de +/-10%, exceto para a faixa próxima de zero ( +/-10MPa). Nesta faixa a reprodutibilidade é em redor de +/-5 MPa.

## 2.8 – ELETRODEPOSIÇÃO DE METAIS

### 2.8.1 - Considerações iniciais

As primeiras experiências para a eletrodeposição de metais remontam das primeiras décadas do século XIX. A deposição eletrolítica do cobre pode ser considerada o mais antigo processo galvânico. Jacobi conseguiu, no ano de 1838 em S. Petisburgo, depositar eletroliticamente camadas de cobre, a partir de soluções de sulfato. Em 1841, De Ruolz experimentou depositar níquel a partir de soluções salinas, mas não teve êxito, uma vez que os sais empregados não tinham a necessária pureza (GALVANOTÉCNICA PRÁTICA, 1973).

A eletrodeposição de metais ou galvanização é um processo de deposição, por meio de eletrólise e de forma controlada, de uma camada metálica sobre um substrato. O objetivo, em geral, é alterar as características da superfície do substrato para melhorar a aparência, resistência à corrosão, resistência à abrasão, condutividade e outras propriedades inclusive a combinação entre elas. Ocasionalmente é utilizada somente para alteração dimensional de uma peça (LOWENHEIN, 1974).

A tabela 2.6 mostra alguns revestimentos metálicos eletrodepositados e suas aplicações.

Tabela 2.6 - Revestimentos metálicos eletrodepositados e algumas de suas aplicações (GENTIL; GALVANOTÉCNICA PRÁTICA, 1982, 1973).

| <b>Tipo de eletrodepósito</b>          | <b>Aplicação</b>                  |
|----------------------------------------|-----------------------------------|
| Ouro, Prata, Níquel, Cobre, Cromo.     | Decorativa.                       |
| Ouro, Prata, Níquel, Ródio Cobre.      | Contato elétrico.                 |
| Cobre.                                 | Fabricação de circuito impresso.  |
| Cromo, Níquel, Zinco, Cádmio, Estanho. | Resistência à corrosão.           |
| Prata, Estanho.                        | Soldabilidade.                    |
| Cromo, Índio.                          | Resistência ao desgaste           |
| Cromo, Níquel, Ferro.                  | Recuperação dimensional de peças. |

Eletrodeposição ou galvanização é um processo pelo qual um metal, na forma iônica, migra do anodo (eletrodo positivo) para o catodo (eletrodo negativo) sob a ação de uma corrente elétrica. Através de uma reação de oxidação o metal que constitui o

anodo passa da forma metálica para a forma iônica dissolvendo-se na solução. No catodo, constituído pela peça que receberá a eletrodeposição, ocorre o inverso. Através de uma reação de redução o metal na forma iônica passa para a forma metálica depositando-se na superfície da peça, conforme esquema apresentado da figura 2.35. A quantidade de metal depositado ou dissolvido, segue as leis da eletrólise formulada por Faraday em 1833.

A dissolução do anodo repõe os íons metálicos da solução que foram consumidos na eletrodeposição. Existem casos, como o da eletrodeposição do cromo, que o anodo é constituído por material insolúvel na solução eletrolítica. Neste caso, a reposição dos íons consumidos se dará pela reposição do ácido crômico na solução de cromeação.

Durante a eletrodeposição parte da corrente aplicada é consumida na eletrolise da água. Assim, a massa real do metal depositado é menor que a massa teórica calculada pela lei de Faraday. A relação entre a massa real e a massa teórica é denominada eficiência catódica. Na eletrólise da água ocorre o desprendimento de hidrogênio no catodo, que se propaga para o interior do substrato concomitantemente à eletrodeposição do metal, ocasionando o fenômeno denominado fragilidade de hidrogênio (FLOTT;GENTIL;NOGUEIRA, 2000, 1982, 2003).

Reação no anodo:  
(Oxidação)



Reação no catodo:  
(Redução)

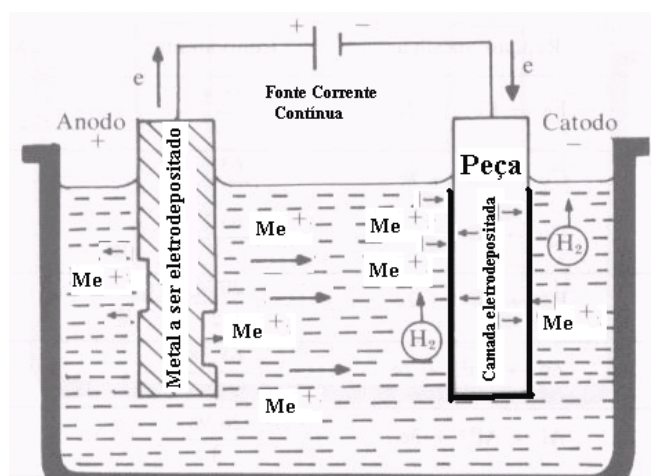
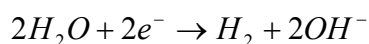
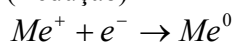


Figura 2.35 – Representação esquemática da eletrodeposição de metais.  
Adaptado de (GENTIL, 1982).

### 2.8.2 – Lei de Faraday e eficiência catódica

A lei de Faraday relaciona a massa do metal depositado com o tempo de eletrólise e a corrente aplicada através da equação:

$$m = K \cdot i \cdot t \quad (2.9)$$

$$K = \frac{M}{n \cdot F} \text{ (Equivalente Eletroquímico)} \quad (2.10)$$

$$m = \frac{M}{n \cdot F} \cdot i \cdot t \quad (2.11)$$

onde  $m$  = massa do metal depositado (em gramas).

$M$  = peso molecular do metal depositado.

$n$  = número de elétrons envolvidos na reação eletroquímica.

$F = 96.500$  Coulombs ( Constante de Faraday).

(Obs.1 Coulomb = 1 Amper x s)

$I$  = intensidade de corrente (em Amperes).

$t$  = tempo em segundos.

$$\frac{M}{n \cdot F} = \text{Equivalente Eletroquímico} \quad (\text{GENTIL, 1982}).$$

O equivalente eletroquímico é usualmente expresso em gramas/Amper hora.

Ex. para o caso do níquel:

$$M=58,7 \quad n=2 \quad t=3600 \text{ seg (1 hora)} \quad F= 96.500 \text{ A x seg}$$

$$\frac{58,7g}{2 \cdot 96.500 \cdot A \cdot \frac{1}{3600} h} = 1,095 \frac{g}{A \cdot h}$$

A densidade de corrente catódica é um parâmetro muito utilizado no controle dos processos de eletrodeposição e é definida pela corrente elétrica aplicada por unidade de superfície na qual o metal é eletrodepositado. Em geral é expressa por  $A/dm^2$ ,  $A/cm^2$ ,  $A/ft^2$ ,  $A/in^2$ . A densidade de corrente pode também ser calculada em relação à superfície do anodo. Neste caso é denominada de densidade de corrente anódica ( DIBARI G. A.1999).

$$Densidade de Corrente_{catódica} = \frac{i}{Área_{depósito}} \quad (2.12)$$

Na prática, o controle do metal depositado não é feito através da massa e sim pela espessura de camada e pela densidade de corrente. Neste caso, a equação de Faraday é rearranjada da seguinte forma:

$$d_{metal} = \frac{m_{metal}}{V_{depósito}} \therefore m_{metal} = d_{metal} \cdot V_{depósito} = d_{metal} \cdot Espessura_{depósito} \cdot Área_{depósito}$$

$$m_{metal} = d_{metal} \cdot Espessura_{depósito} \cdot Área_{depósito} \quad (2.13)$$

Substituindo a equação 2.13 na equação 2.9, tem-se:

$$d_{metal} \cdot Espessura_{depósito} \cdot Área_{depósito} = K \cdot i \cdot t$$

$$Espessura_{depósito} = \frac{K \cdot t}{d_{metal}} \cdot \frac{i}{Área_{depósito}} \quad (2.14)$$

Substituindo a equação 2.12 na equação 2.14, tem-se:

$$Espessura_{depósito} = \frac{K \cdot t}{d_{metal}} \cdot densidade \text{ de corrente}. \quad (2.15)$$

Mantendo o tempo constante, a curva teórica do gráfico Espessura do depósito X Densidade de Corrente, será uma reta cujo coeficiente angular será  $K t / d_{metal}$ .

Na prática, a espessura da camada não varia linearmente com a variação da densidade de corrente. Outros fenômenos que competem com o fenômeno da eletrodeposição dos metais, dentre os quais destacamos a eletrólise da água, faz com que a variação não seja linear (DIBARI G. A., 1999).

O gráfico espessura da camada x densidade de corrente para processos de cromeação, é apresentado na figura 2.36.

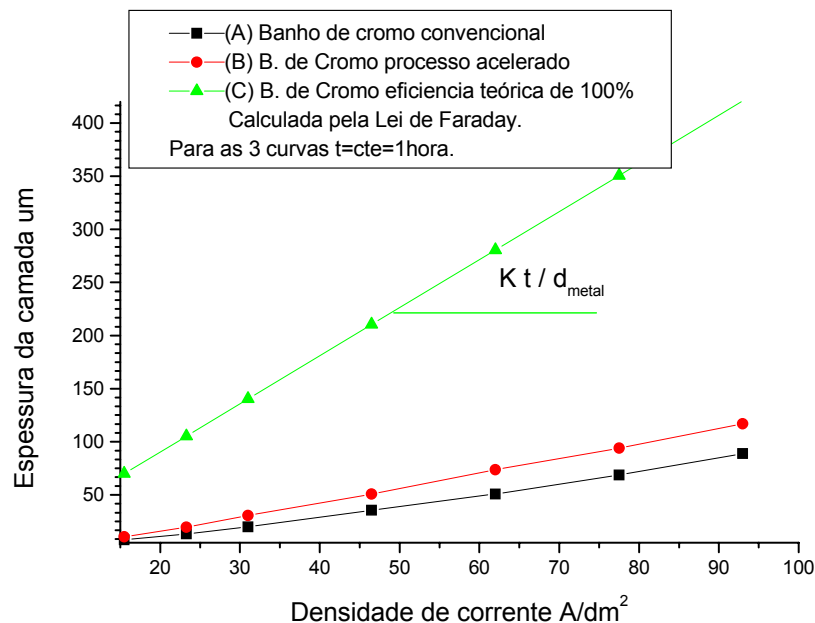


Figura 2.36 – Curva Espessura de camada versus densidade de corrente processos de cromação convencional, acelerado e teórico. Dados extraídos de (NEWBY,2000).

Na figura 2.36 observa-se que para um mesmo valor de densidade de corrente as curvas práticas (A) e (B) possuem valores de espessura de camada inferiores ao da curva teórica (C). Como já mencionado, a curva teórica leva em conta que, toda corrente elétrica aplicada foi consumida na eletrodeposição do metal, o que não é constatado na prática. O fator que relaciona a espessura de camada (ou a massa depositada) prática com a espessura de camada (ou a massa depositada) teórica é a eficiência catódica. Para a espessura (ou massa depositada) teórica é atribuída a eficiência de 100%.

A figura 2.37 apresenta as curvas de eficiência calculadas a partir dos dados teóricos e práticos das espessuras de camada de cromo.

A eficiência catódica, além da variação em função da densidade de corrente, varia com a temperatura e também com a concentração dos componentes do banho incluindo aditivos. No exemplo da figura 2.37 o processo de cromação convencional, com o aditivo catalisador à base de sulfato, possui eficiência catódica inferior à do processo acelerado, com aditivo catalisador misto isento de fluoreto. A figura 2.38 apresenta a variação de um processo de cromação com aditivo catalisador à base de

sulfato em função das variações da densidade de corrente e a temperatura (NEWBY,2000).

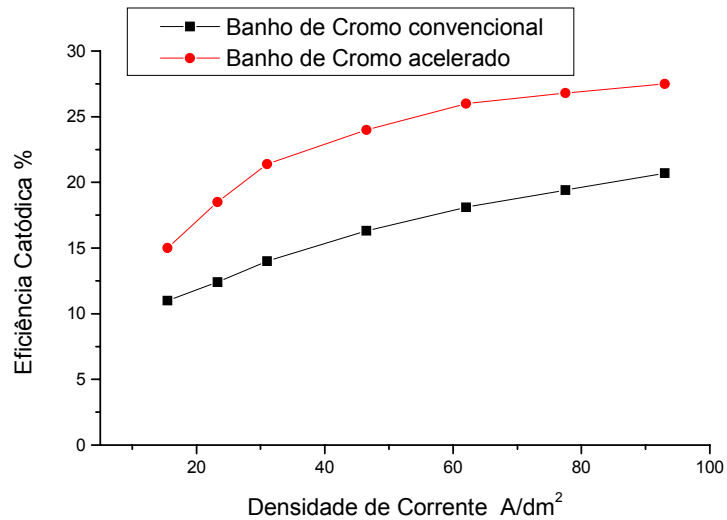


Figura 2.37 - Curvas de eficiência catódica processos de cromeação convencional e acelerado. Dados extraídos de (NEWBY,2000).

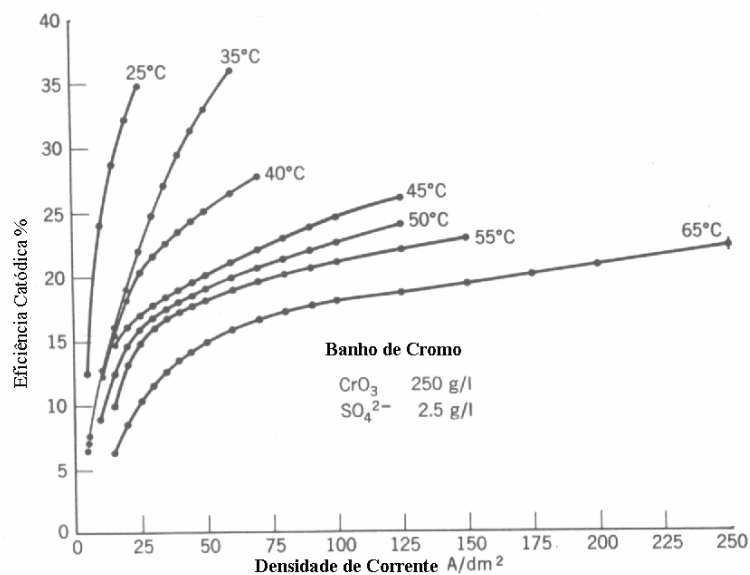


Figura 2.38 - Variação da eficiência catódica de um processo de cromeação em função da densidade de corrente e da temperatura (LOWENHEIN, 1974).

### 2.8.3 - Fragilização pelo hidrogênio

A fragilização por hidrogênio que ocorre nos metais e ligas não ferrosas é um fenômeno decorrente da incorporação e retenção do hidrogênio gerando altíssimas tensões internas. A fragilização independe da origem do hidrogênio. É

necessário apenas que ele esteja dissolvido no material e na sua forma atômica.

O hidrogênio atômico pode ser liberado durante a decapagem ácida, eletrodeposição de metais, banhos eletrolíticos de limpeza, pela corrosão do próprio metal, dentre outras. Os íons  $H^+$  podem ser adsorvidos física e quimicamente pela superfície da peça. A adsorção e difusão do hidrogênio dependem, principalmente, da estrutura do aço. Assim, a difusão corresponde à dissolução de hidrogênio intersticialmente e o preenchimento das discordâncias. (PERES, 1996 ).

A fragilização por hidrogênio pode causar danos em mais de 80% dos materiais dos materiais de alta resistência. Os aços de alta resistência, geralmente entre 1790 a 2068 MPa, são muito suscetíveis à fragilização pelo hidrogênio. Todavia, aços acima de 1103 MPa, incluindo aços inoxidáveis e outros metais como o titânio, berílio e cobre, também sofrem com este efeito.

Durante as reações de eletrodeposição os íons  $H^+$  são formados. Esse tipo de hidrogênio é o responsável pela fragilização uma vez que o hidrogênio molecular não consegue a difusão devido ao seu diâmetro. Uma vez difundido no metal o hidrogênio iônico  $H^+$ , se não eliminado a tempo, em poucas horas unir-se-ão formando hidrogênio molecular  $H_2$  entre os vazios ou defeitos do metal base, aumentando significativamente o seu volume, gerando altas pressões de forma a provocar rompimento da estrutura cristalina do material base. Cálculos baseados na pressão requerida para a propagação de microtrincas em uma liga de Fé-Si 3% indicam valores de 1013MPa (104 atm) para a formação de microtrincas de tamanho 10  $\mu m$ , que corresponde a valores do tamanho de grão de um aço. Isto representa uma quantidade de hidrogênio da ordem de 1 ppm. As quantidades de hidrogênio requeridas para a fragilização de aços, diminuem à medida que aumenta a resistência do material. (NOGUEIRA, 2003).

#### 2.8.3.1- Desidrogenação

A desidrogenação é um pós-tratamento que se aplica para evitar o fenômeno da fragilização pelo hidrogênio. Este tratamento faz com que ocorra o alívio das tensões provocadas pelo hidrogênio retido durante a fabricação das peças, devido a processos de fabricação como usinagem química, limpeza eletrolítica, decapagem

ácida e eletrodeposição de metais. (PERES, 1996 ).

A maneira mais econômica e eficiente empregada para a remoção total de hidrogênio dos materiais metálicos é por aquecimento. O aquecimento do material provoca um alívio de tensão, favorecendo também a remoção do hidrogênio. Este processo, quando bem controlado, é a garantia de que o material não será fragilizado pelo hidrogênio, porém, o intervalo de tempo entre o processo gerador de hidrogênio e o processo de desidrogenação é estritamente limitado entre 3 a 4 horas, em função da resistência mecânica do material. Quanto à temperatura de desidrogenação, existem processos que requerem temperaturas que variam de 100 a 190 °C. O tempo de permanência no forno de aquecimento para a desidrogenação depende exclusivamente da resistência mecânica do material em questão, podendo variar de 4 a 23 horas. (NOGUEIRA, 2003).

#### **2.8.4 – Processo de eletrodeposição dos metais.**

Processo de eletrodeposição é constituído por três fases principais:

Pré-tratamento,

Eletrodeposição do metal e

Pós-tratamento.

No pré-tratamento é feita a limpeza e a preparação da superfície para receber a eletrodeposição do metal.

Na eletrodeposição o substrato recebe o revestimento metálico de acordo com as características especificadas (tipo do metal, espessura do revestimento, etc). Existem vários processos de eletrodeposição de metais. Neste estudo serão abordados os tratamentos de niquelação pelo processo a base de sulfamato de níquel e o de cromeação.

No pós-tratamento é feita a remoção dos resíduos químicos, secagem e, quando necessário, o tratamento térmico do produto.

##### **2.8.4.1 – Pré –tratamento**

A preparação de uma superfície metálica para a eletrodeposição deve ser feita

obedecendo a certos padrões a fim de assegurar a completa cobertura e a aderência das camadas ao substrato. A superfície do substrato deverá estar livre de imperfeições mecânicas, livre de filmes de óxidos, gorduras, carepas. A presença de filmes de óxidos ou gorduras inibe a eletrodeposição nas áreas afetadas, conduzindo à falhas e má aderência no revestimento. A superfície deve ser controlada a um grau necessário para alcançar os requisitos de qualidade exigidos no produto acabado. (PERES,1996).

Os processos de preparação e limpeza das superfícies metálicas para a eletrodeposição podem ser mecânicos, químicos, eletroquímicos e físicos químicos. Na tabela 2.7 estão alguns exemplos de processos de limpeza e respectivas finalidades.

Tabela 2.7 – Pré-tratamentos utilizados na limpeza das superfícies dos metais. ( GALVANOTÉCNICA PRÁTICA, 1973).

| Classificação do processo              | Denominação/caracterização                                                                                     | Finalidade do processo                                                          |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Limpeza mecânica grosseira.            | Processo de jateamento.<br>Processo de ar comprimido.<br>Processo de centrifugação.<br>Jateamento com líquido. | Remoção de carepas, areia de fundição, escórias e outras.                       |
| Limpeza mecânica leve.                 | Esmerilhamento, polimento, tamboreamento.                                                                      | Remover as imperfeições mecânicas.                                              |
| Limpeza manual                         | Limpeza com abrasivos, decapantes e desengraxantes.                                                            | Limpeza de peças sensíveis e de baixa produção.                                 |
| Processos físico químicos              | Limpeza com ultra-som na faixa de frequência de 20KHz ou mais.                                                 | Aumento da ação de limpeza de solventes, soluções alcalinas decapantes ácidos.  |
|                                        | Desengraxamento com solventes clorados por imersão e por condensação.                                          | Remoção de óleo, graxa, pó e substâncias de polimento.                          |
| Processos eletroquímicos               | Limpeza catódica, anódica ou com reversão de pólos, em soluções alcalinas ou ácidas.                           | Desengraxamento, decapagem e remoção de pó.                                     |
| Processos químicos em soluções aquosas | Limpeza em soluções alcalinas.                                                                                 | Remoção de óleo, graxa, pó e substâncias de polimento.                          |
|                                        | Limpeza em soluções ácidas com adição de inibidores                                                            | Decapagem , remoção de carepas.                                                 |
| Lavagem                                | Lavagem em água corrente                                                                                       | Remoção de resíduos químicos das superfícies entre as etapas do pré-tratamento. |

Para cada tipo de material, sejam, ferrosos, não ferrosos, aços de alta resistência, alto carbono, baixo carbono, existe uma seqüência operacional com

desengraxantes e decapantes apropriados para cada caso.

Para aços de alta resistência (dureza de 38 HRc ou maior), por exemplo, os processos devem ser cuidadosamente selecionados, para prevenir a fragilização pelo hidrogênio. Os processos nestes casos, raramente prevêm limpezas ácidas ou eletroquímicas catódicas. A limpeza por processos mecânicos e eletroquímicos anódicos são mais indicados para os materiais suscetíveis à fragilização.

#### 2.8.4.2 - Eletrodeposição de Níquel pelo processo a base de sulfamato.

##### 2.8.4.2.1 - Histórico

As primeiras investigações sobre eletrólitos a base de sulfamato, incluindo o de níquel, foram anunciadas em 1930 por R. Piontelli e L. Cambri.

Em 1950 Richard C. Barrett descreve uma formulação de eletrólito de sulfamato de níquel que havia utilizado em uma indústria desde 1949. Após curto tempo, surgem mais referências de aplicações comerciais do sulfamato de níquel. Em 1960 Richard C. Barrett mencionou mais de 26 referências a respeito da história dos eletrólitos de sulfamato no *47th Annual Proceedings of the American Electroplaters's Society Inc.* (BAUDRAND, 1996).

##### 2.8.4.2.2 – O Sulfamato de níquel

O sulfamato de níquel é um sal de níquel derivado do ácido sulfâmico, diferente do sulfato de níquel, que é um sal derivado do ácido sulfúrico. A diferença entre ácido sulfâmico e o ácido sulfúrico é demonstrada através das fórmulas estruturais mostradas na figura 2.39.

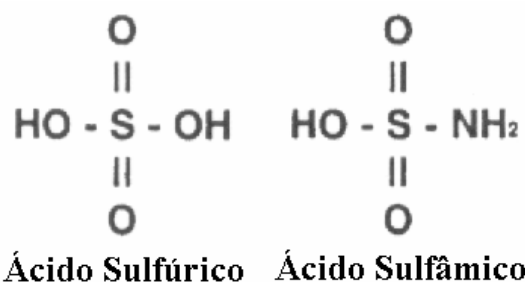


Figura 2.39 – Comparação das fórmulas estruturais do ácido sulfúrico e ácido sulfâmico.

Comparando as duas fórmulas estruturais, um grupo hidroxila (OH) do ácido sulfúrico, é substituído por um grupo amida (NH<sub>2</sub>) para formar o ácido sulfâmico.

O sulfamato de níquel Ni(NH<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> é obtido pela reação do níquel com o ácido sulfâmico HNH<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>. O sulfamato de níquel tem boa solubilidade em água, permitindo a montagem do eletrólito com elevada concentração de metal. Em temperaturas acima de 70°C ocorre a decomposição do sulfamato de níquel, formando nesta decomposição o sulfato de amônio o qual é prejudicial ao processo. (BAUDRAND, 1996; MACDERMID INCORPORATED, 2001).

#### 2.8.4.2.3 – Usos dos eletrodepósitos de níquel, processo sulfamato

O processo de niquelação tipo sulfamato, é com maior frequência, utilizado em aplicações funcionais ou de engenharia devido as excelentes propriedades mecânicas dos depósitos, por exemplo, alta ductibilidade, baixa tensões residuais. A alta concentração de níquel neste processo permite o uso de densidades de corrente elevadas possibilitando altas taxas de deposição. As altas taxas de deposição aliadas a ductibilidade e as baixas tensões residuais fazem deste processo ideal nas aplicações nas quais se exigem camadas espessas (*electroforming*).

Algumas das suas utilizações incluem:

- Circuitos impressos

- Transistores e diodos

- Conectores e terminais

- Componentes aeroespaciais (aeronaves, mísseis e foguetes)

- Recuperação dimensional de peças

- Componentes mecânicos ( Ex. peças para máquinas de escritório, cafeteiras, etc)

- Rolos de laminação para indústrias de papel, couro e têxteis.

(MACDERMID INCORPORATED, 2001; GALVANOTÉCNICA PRÁTICA, 1973).

#### 2.8.4.2.4 – Propriedades físicas do eletrodepósitos de níquel sulfamato

As propriedades físicas dos eletrodepósitos de níquel processo sulfamato variam em grande amplitude. Os valores almejados podem ser consistentemente reproduzidos pelo controle das condições operacionais tais como, pH, temperatura, densidade de corrente (MACDERMID INCORPORATED, 2001).

A tabela 2.8 mostra as faixas de variação das propriedades físicas dos eletrodepósitos de níquel processo sulfamato convencional e de dureza elevada.

Tabela 2.8 - Propriedades físicas dos eletrodepósitos de níquel, processos sulfamato eletrodeposição convencional e eletrodeposição dura (MACDERMID INCORPORATED, 2001).

| Propriedade física          | Eletrodeposição convencional | Eletrodeposição dura          |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Dureza HV <sub>200</sub>    | 175 a 200                    | 375 a 550                     |
| Alongamento (50 mm)         | 15 a 25%                     | 6% (a 550HV <sub>200</sub> )  |
| Limite de resistência (MPa) | 620                          | 896                           |
| Aparência do depósito       | Semi-fosco                   | Semi brilhante para brilhante |
| Tensão interna (MPa)        | (-)35 a (+)70                | 0 a (-)138                    |

#### 2.8.4.2.5 – Controle operacional do processo sulfamato de niquelação

Aplicações específicas requerem a seleção dos parâmetros operacionais e o seus controles dentro dos limites especificados. Na seção 2.7.3.3 foi discutido, para o caso da tensão residual, uma forma de controlar esta propriedade na camada de níquel. Assim como a tensão residual, outras propriedades da camada de níquel, tais como dureza, ductibilidade, limite de resistência podem também serem controladas pelo ajuste dos parâmetros operacionais do processo (DI BARI, 1999).

A tabela 2.9 mostra os limites máximos e mínimos dos parâmetros operacionais dos processos sulfamato convencional e de eletrodeposição dura.

O ajuste fino destes parâmetros permitirão a obtenção de camadas de níquel com as características físicas necessárias para cada aplicação.

Tabela 2.9 - Parâmetros operacionais dos processos sulfamato convencional e de eletrodeposição dura (MACDERMID INCORPORATED, 2001).

| Parâmetros operacionais                                                          | Processo convencional | Eletrodeposição dura |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Níquel metal (g/l)                                                               | 70 - 90               | 70 - 90              |
| Aditivo auxiliar para corrosão de anodo $\text{NiCl}_2$ ou $\text{NiBr}_2$ (g/l) | 3,0 - 9,0             | 3,0 - 9,0            |
| Ácido bórico (g/l)                                                               | 40 - 50               | 40 - 50              |
| pH                                                                               | 3,8 - 4,2             | 3,8 - 4,2            |
| Molhador (tensioativo) %v/v                                                      | 0,1 - 0,4 %           | 0,1 - 0,4 %          |
| Temperatura °C                                                                   | 48 - 60               | 27 - 49              |
| Densidade de corrente ( $\text{A/dm}^2$ )                                        | 1 - 16                | 1 - 16               |
| Aditivo para dureza (ml/l)                                                       | -                     | 2 - 4                |

Para uma visão geral do funcionamento do processo, na tabela 2.9 estão citados os principais constituintes do eletrólito e suas respectivas funções.

Tabela 2.10 – Principais constituintes o eletrólito de sulfamato de níquel e suas respectivas funções.

| Constituinte                                      | Função                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sulfamato de níquel.                              | O sulfamato de níquel é a fonte dos íons níquel, sendo utilizado na montagem do banho e para repor as perdas dos íons níquel por arraste.                                                                                                                                           |
| Ácido bórico.                                     | O ácido bórico é utilizado como agente tamponador do pH da solução de sulfamato de níquel.                                                                                                                                                                                          |
| Agente molhador.                                  | O agente molhador é adicionado para reduzir a tensão superficial da solução tendo como resultado a eliminação de <i>pitting</i> causado pela interferência de bolhas de hidrogênio na superfície do revestimento.                                                                   |
| Aditivo para auxiliar na corrosão do anodo.       | Estes aditivos são colocados na solução para auxiliar na corrosão do anodo acelerado a sua dissolução evitando o empobrecimento dos íons de níquel na solução. Dois tipos de aditivos são utilizados, o cloreto de níquel (menos agressivo) e o brometo de níquel (mais agressivo). |
| Aditivo para aumentar a dureza do eletrodepósito. | Este aditivo é utilizado para a obtenção de eletrodepósito de níquel duro, com tensões compressivas e alto limite de resistência. Em geral a composição químicas destes tipos de aditivos é restrita aos detentores da patente do processo.                                         |
| Aditivos para correção do pH.                     | Estes aditivos são utilizados quando ocorrem variações do pH gerando necessidades de correção. Para baixar o valor do pH é utilizado o ácido sulfâmico e para a elevação do pH é utilizado o carbonato de níquel.                                                                   |

### 2.8.4.3 – Eletrodeposição de Cromo

#### 2.8.4.3.1- Histórico

Algumas poucas experiências para a deposição eletrolítica do cromo remontam ao século XIX. No início do século XX, porém, as pesquisas foram intensificadas, sem, contudo levar a um resultado prático. A pesquisa de diversos autores, e finalmente, os estudos de C. J. Sargent e E. Liebreich foram de fundamental importância para o desenvolvimento da eletrodeposição do cromo na Europa. Algum tempo depois, independentemente das pesquisas européias, através de C. G. Fink e outros pesquisadores a prática da cromeação foi introduzida nos Estados Unidos. A cromeação decorativa, na qual camadas muito finas (na ordem de décimos de  $\mu\text{m}$ ) são depositadas sobre bases de níquel, conquistou rapidamente o mercado. No que se refere às camadas mais espessas, que possuem excelentes propriedades mecânicas e obtidas na prática por processos conhecidos por cromeação dura, o desenvolvimento se deu muito lentamente. A cromeação dura somente se deu em maior escala após a segunda guerra mundial (GALVANOTÉCNICA PRÁTICA, 1973).

#### 2.8.4.3.2.- Cromeação dura ou funcional

A cromeação dura ou funcional é feita a partir de soluções de ácido crômico na presença de um ou mais ânions catalisadores. O cromo eletrodepositado é extremamente duro, resistente à corrosão, com baixo coeficiente de fricção e resistente ao desgaste. Estas propriedades conferem excepcionais características protetivas às peças nas quais é aplicado. Neste processo as espessuras de camadas variam de 2,5 até 500  $\mu\text{m}$ , ou mais. Este processo é largamente utilizado nas aplicações que requerem camadas com alta resistência ao desgaste, à abrasão e à corrosão. A cromeação dura é também utilizada no reparo ou recuperação de peças, tais como cilindros de laminação, moldes para termoplásticos e outras ferramentas, além de revestimentos em cilindros de motores, eixos de manivela e na recuperação dimensional de peças devido à falhas na usinagem (NEWBY, 2000).

Uma característica significativa do cromo eletrodepositado é a alta tensão

residual de tração originada pela decomposição de hidretos de cromo durante o processo de eletrodeposição. Estas elevadas tensões de tração das camadas eletrodepositadas de cromo são aliviadas por meio de microtrincas localizadas que se formam durante a eletrodeposição.

Sob condições de fadiga, estas microtrincas se propagam e penetram através do substrato, conduzindo a um decréscimo da resistência à fadiga de um componente (NASCIMENTO, et al, 2001).

Voorwald, et al (2004) realizou estudo utilizando o tratamento *shot peening* para a recuperação da resistência à fadiga do aço ABNT 4340 revestido com cromo. O resultado obtido foi uma recuperação total da resistência à fadiga tanto na utilização de esferas de aço quanto na utilização de esferas cerâmicas.

#### 2.8.4.3.3 - Processos para a cromeação funcional

O processo de cromeação é constituído basicamente pelo trióxido de cromo( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), que dissolvido em água forma o ácido crômico ( $\text{H}_2\text{CrO}_4$ ), mais o íon sulfato( $\text{SO}_4^-$ ) que funciona como catalizador. Dependendo do catalizador utilizado, os processos podem ser do tipo convencional (somente a base de sulfato), duplo (a base de sulfato e fluoreto) e o terceiro tipo (a base de sulfato mais um catalizador isento de fluoretos). Os dois últimos permitem a utilização de densidades de correntes mais elevadas, possuindo consequentemente, taxas de deposição de cromo maiores que o do tipo convencional (NEWBY,2000).

NASCIMENTO, et al (2001) ensaiou corpos de prova confeccionado com aço AISI 4340 39 HRc, revestidos com cromo processo convencional e processo acelerado isento de fluoretos. O processo acelerado resultou em um menor número de ciclos para todas as condições estudadas. NASCIMENTO, et al (2001) atribuiu o pior desempenho das propriedades de fadiga do substrato, induzidas pelo processo acelerado, à maior densidade de microtrincas observadas na camada de cromo eletrodepositada por este processo.

#### 2.8.4.4 – Pós-tratamento

Para finalizar o processo de eletrodeposição é essencial empregar uma lavagem completa e minuciosa, para remover todos os resíduos das soluções de processamento que em geral são corrosivas. Se estas soluções não forem removidas da superfície, logo após o recobrimento superficial, poderá ocorrer ataque da superfície causando *pittings* ou manchas na camada eletrodepositada.

Para materiais suscetíveis à fragilização pelo hidrogênio o pós-tratamento deve incluir a desidrogenação, cuja abordagem foi feita na seção 2.8.3.1.

## CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para atingir os objetivos propostos no capítulo 1, foram preparados 60 corpos de prova utilizando o aço ABNT 4340. Os corpos de prova foram agrupados em cinco blocos, com 12 unidades cada, denominados GRUPO 1, GRUPO 2, GRUPO 3, GRUPO 4, GRUPO 5. As características de cada grupo estão sumarizadas na tabela 3.1. A tabela 3.2 relaciona os ensaios realizados em cada grupo de corpo de prova.

Tabela 3.1 – Características dos grupos de corpos de prova (cdp).

| Grupos de CDP | Característica                                                                                                                                                          |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GRUPO 1       | Metal Base(MB) - Aço ABNT 4340 tratado termicamente na dureza 50,5 a 53 HRc.                                                                                            |
| GRUPO 2       | Metal Base(MB) +Tratamento <i>Shot Peening</i> +Revestimento de Níquel processo Sulfamato +Revestimento de cromo duro + desidrogenação após a niquelação e a cromeação. |
| GRUPO 3       | Metal Base(MB) +Revestimento de Níquel processo Sulfamato +Revestimento de cromo duro + desidrogenação após a niquelação e a cromeação.                                 |
| GRUPO 4       | MetalBase (MB)+Tratamento <i>Shot Peening</i> + Revestimento de Níquel processo Sulfamato + desidrogenação após a niquelação.                                           |
| GRUPO 5       | Metal Base(MB) +Revestimento de Níquel processo Sulfamato + desidrogenação após a niquelação.                                                                           |

Tabela 3.2 – Ensaios realizados nos grupos de corpos de prova (x).

| Ensaios realizados                                                                 | GP 1<br>MB | GP 2<br>MB+S.Pee.+<br>Ni+Cr | GP 3<br>MB.+Ni<br>+Cr | GP 4<br>MB+S.<br>Pee.+Ni | GP 5<br>MB.+<br>Ni |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------|
| Ensaio de fadiga por flexão rotativa                                               | x          | x                           | x                     | x                        | x                  |
| Análise de tensão residual por difração de raio X.                                 | x          | x                           |                       | x                        | x                  |
| Determinação de tensão residual pelo método do contractômetro (somente camada Ni). |            | x                           | x                     | x                        | x                  |
| Análise das superfícies de fratura.                                                |            | x                           | x                     | x                        | x                  |
| Determ. da espessura de camada.                                                    |            | x                           | x                     | x                        | x                  |
| Ensaios de microdureza Vickers.                                                    |            | x                           | x                     |                          |                    |

### 3.2 - MATERIAL

O material utilizado para a confecção dos corpos de prova deste trabalho foi o aço ABNT 4340, de uso aeronáutico, que possui alta resistência mecânica e boa resistência à fadiga.

Todo o material utilizado para a confecção dos corpos de prova foi fornecido e analisado quimicamente pela ELEB – Embraer Liebherr Equipamentos do Brasil S/A, para garantir a conformidade da composição química do material com os valores especificados na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Composição química do aço ABNT 4340.

| Composição % | <b>C</b>  | <b>S</b>  | <b>Mn</b> | <b>Cr</b> | <b>Ni</b> | <b>Mo</b> | <b>Si</b> | <b>P</b>  |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Especificado | 0,38-0,43 | 0,025 máx | 0,65-0,85 | 0,70-0,90 | 1,65-2,00 | 0,20-0,30 | 0,20-0,35 | 0,025 máx |
| Encontrado   | 0,42      | 0,012     | 0,75      | 0,80      | 1,80      | 0,24      | 0,28      | 0,012     |

Como valores de referência do limite de escoamento e limite de resistência à tração para este trabalho, foram adotados os valores obtidos por TORRES (2002) para o aço ABNT 4340 53 HRc.

$\sigma_e = 1511 \text{ MPa}$  (DP=28MPa) e  $\sigma_u = 1864 \text{ MPa}$  (DP=32 MPa)

### 3.3 – MÉTODOS

#### 3.3.1 – Tratamento térmico

Todos os corpos de prova foram submetidos a tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, os quais foram realizados pela ELEB. Para a obtenção do valor de dureza de 53 HRc foi realizado, após a têmpera, um duplo revenimento a 230 °C durante 2 horas. O ciclo completo de tratamento está representado na figura 3.1.

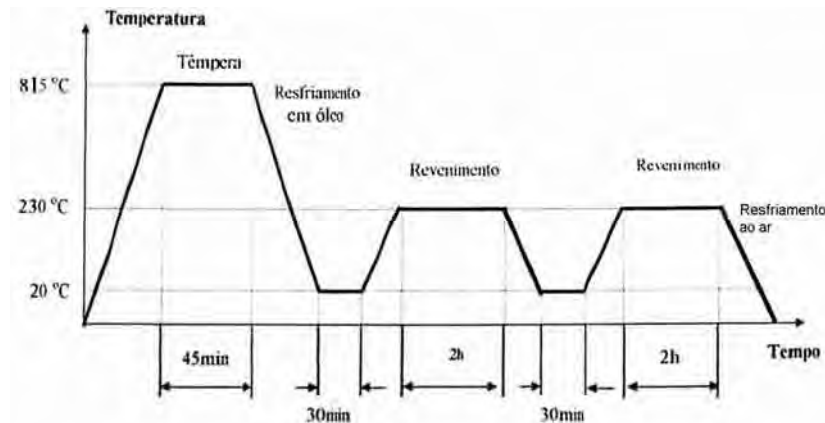


Figura 3.1 – Representação esquemática do tratamento térmico de têmpera e revenimento para a dureza de 53 HRc.

### 3.3.2 – Preparação dos corpos de prova.

Os corpos de prova para os ensaios de fadiga foram usinados pela ELEB, a partir de barras cilíndricas do material. A forma e dimensões finais dos corpos de prova estão conforme os critérios estabelecidos pelo fabricante do equipamento, no qual os ensaios de fadiga foram realizados. Na figura 3.2 estão os detalhes dimensionais dos corpos de prova.

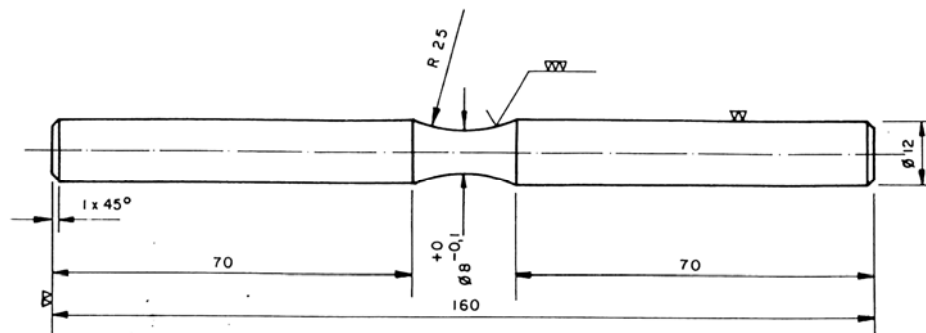


Figura 3.2 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de flexão rotativa.

Após o corte e desbastes iniciais e antes da usinagem final, os corpos de prova foram tratados termicamente na dureza de 53HRc, conforme o descrito no item 3.3.1. O tratamento térmico foi feito antes da usinagem final, para evitar possíveis empenamentos dos corpos de prova causados pelas variações de temperatura durante o tratamento. Após a usinagem final, os corpos de prova foram aquecidos a 190°C por 4 horas e resfriado em ar calmo para aliviar as tensões introduzidas durante o processo de usinagem. O acabamento final da seção reduzida do corpo de prova foi feito com

papel abrasivo de granulometria 600. Como consequência do processo de polimento no acabamento final, que induzem tensões compressivas, é esperada tensões residuais compressivas nesta superfície do corpo de prova.

Quando o aço de alta dureza é cortado, as camadas superficiais afetadas pela deformação são pouco profundas, então um mecanismo tipo “polimento” é predominante e conseqüentemente são produzidas tensões compressivas (TORRES, 2002). É esperada a indução de tensões compressivas devido ao processo de usinagem, porém, estas foram removidas pelo tratamento de alívio de tensões.

### **3.3.3– Tratamento *Shot Peening***

O tratamento *shot peening* foi realizado pela ELEB, com intensidade 0,008 A, esferas de aço S230 ( $\varnothing$  1 mm), cobertura de 200%, conforme norma MIL-S-13162C. O tratamento foi realizado nos corpos de prova antes das aplicações dos revestimentos de cromo e de níquel e apenas na região central (R=25 na figura 3.2).

### **3.3.4 – Revestimentos superficiais**

#### **3.3.4.1 - Revestimento de cromo duro**

A eletrodeposição de cromo duro convencional, com catalisador a base de sulfato, foi realizada pela ELEB, em solução contendo 250 g/l de ácido crômico e 2.5 g/l de ácido sulfúrico, densidade de corrente na faixa de 31 a 46 A/dm<sup>2</sup> e temperatura entre 50°C e 60°C. O revestimento de cromo foi feito apenas na região central de corpo de prova (R=25 na figura 3.2).

Após a eletrodeposição de cromo foi feita a desidrogenação, pela qual os corpos de prova foram aquecidos a 190°C por 23 horas.

#### **3.3.4.2 – Revestimento de níquel**

A eletrodeposição de níquel, processo a base de sulfamato de níquel, foi feita no laboratório da Varig, em uma solução de sulfamato de níquel contendo cerca de 84 g/l de Ni, 45 g/l de ácido bórico, 0,3% em volume de agente anti-pitting, PH entre 3,8 a 4,2, densidade de corrente entre 5 a 7 A/dm<sup>2</sup>, temperatura na faixa de 49 a 54°C,

conforme especificações do boletim Técnico Mac Dermid.(MACDERMID INCORPORATED,2001). O revestimento de níquel foi feito apenas na região central de corpo de prova (R=25 na figura 3.2).

Após a eletrodeposição de níquel foi feita a desidrogenação, na qual os corpos de prova foram aquecido a 190 °C por 23 horas.

#### 3.3.4.3 – Espessura dos revestimentos

A determinação das espessuras das camadas dos revestimentos de níquel e de cromo foram feitas por microscopia eletrônica de varredura, em conjunto com a análise de fratura da superfície.

### 3.3.5 – Determinação da tensão residual.

#### 3.3.5.1 - Método de difração de raio X

As determinações das tensões residuais, feitas por difração de raios-X, foram realizadas no laboratório da COPPE – UFRJ, conforme o descrito na seção 2.7.3.4.1 do capítulo 2 Revisão Bibliográfica.

As determinações foram feitas diretamente nos corpo de prova em uma amostra de cada grupo conforme mencionado na tabela 3.3. Para medir as tensões abaixo da superfície, foi feita a remoção de finas camadas através de polimento eletrolítico. O polimento mecânico pode desenvolver tensões residuais compressivas nas camadas analisadas. A medida da espessura da camada removida em cada medição é feita com relógio indicador, tomando-se três medidas e considerando a média entre as mesmas. Após cada retirada de camada, é medida a tensão residual.

As determinações das tensões residuais foram feitas no metal base e revestimentos de cromo. No revestimento de níquel não foi determinada a tensão residual devido, a COPPE não possuir dispositivo para realizar esta medida.

Em trabalhos futuros é recomendável que esta determinação seja realizada.

### 3.3.5.2 - Método do contractômetro (*Spiral Contractômeter*) ASTM B 636.

A determinação da tensão residual pelo método do contractômetro foi feita somente para o revestimento de níquel, no laboratório da Varig, durante o processo de eletrodeposição. A determinação é feita de forma indireta, com o auxílio de um catodo helicoidal, conforme o descrito na seção 2.7.3.4.2 do capítulo 2 Revisão Bibliográfica.

### 3.3.6 – Ensaios de Microdureza Vickers.

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados na Laboratório Metalográfico da AMT/CTA, no equipamento marca Future Tech, modelo FM. As cargas utilizadas na determinação da microdureza foram, para o níquel 200, para o cromo 500 e para o metal base 300 gramas força.

### 3.3.7 - Ensaios de fadiga por flexão rotativa

Os ensaios foram realizados no laboratório da FEG – UNESP, no equipamento, modelo UBM 520/86/9 - *Veb Werkstoffprufmaschinen Leipzig*, a 3.000 rpm, razão de carga  $R = -1$ , temperatura ambiente e considerando o número de ciclos correspondente à fratura total como a de resistência à fadiga, ou  $10^7$  ciclos como limite de resistência à fadiga do corpo de prova.

A relação entre a carga  $P$  e a tensão máxima  $\sigma_{f\text{máx}}$  gerada na região central do corpo de prova é dada por:

$$P = 0,005 \cdot \sigma_{f\text{máx}} + 14,60 \text{ [N]} \quad (3.1)$$

onde 14,60 = Limite de erro da máquina (TORRES 2002).

A figura 3.3 representa de forma esquemática o momento fletor e a tensão máxima gerada pela carga  $P$ .

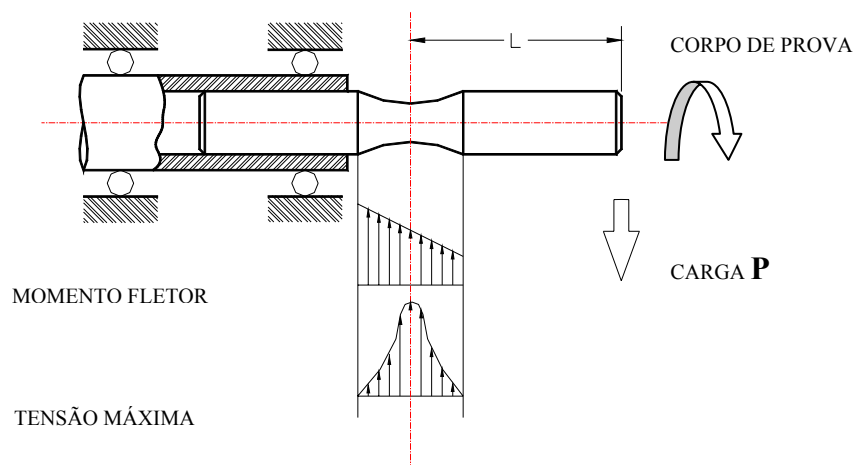


Figura 3.3- Modo de carregamento do ensaio de fadiga por flexão rotativa (NASCIMENTO, 1999).

### 3.3.8 - Análise das superfícies de fratura.

As superfícies de fratura dos corpos de prova foram analisadas através de imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura marca Leica modelo S 430i do Centro Técnico Aeroespacial AMR/CTA.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 – ESPESSURA DAS CAMADAS

A tabela 4.1 apresenta os valores das espessuras de camadas medidas em duas amostras de corpos de prova de cada grupo. Em cada CDP foram realizadas 4 medições de espessura de camada.

TABELA 4.1 – Espessuras de camadas dos revestimentos de níquel e de cromo.

| Grupo de CDP                                   | Faixa de Ni encontrada (μm) | Média (μm) | DP (μm) | Faixa de Cr encontrada (μm) | Média (μm) | DP (μm) |
|------------------------------------------------|-----------------------------|------------|---------|-----------------------------|------------|---------|
| GP 1 - Metal Base(MB)<br>Aço ABNT 4340 53 HRc. | -                           | -          | -       | -                           | -          | -       |
| GP 2- Metal Base+ Shot Peening+Níquel + cromo  | 101↔47                      | 68,3       | 19,4    | 156↔110                     | 133,4      | 15,5    |
| GP 3 - Metal Base+ Níquel + cromo              | 80↔62                       | 69,1       | 7,8     | 176↔139                     | 151,7      | 16,9    |
| GP 4 - Metal Base+ Shot Peening+ Níquel        | 77↔30                       | 49,3       | 17,4    | -                           | -          | -       |
| GP 5 - Metal Base+ Níquel                      | 58↔27                       | 36,5       | 9,9     | -                           | -          | -       |

Analisando os dados da tabela 4.1 observa-se uma dispersão dos valores das espessuras das camadas. A variação das espessuras das camadas é inerente ao processo de eletrodeposição sendo afetada principalmente pela distância ânodo / catôdo e pela variação da densidade de corrente na superfície onde ocorre a deposição. A variação das espessuras das camadas pode se minimizada pela correta colocação da peça na solução e pelo uso de dispositivos para reduzir as diferenças da densidade de corrente. A figura 4.1(b) mostra de forma esquemática a distribuição não uniforme da corrente elétrica em uma peça durante o processo de eletrodeposição. As áreas mais distantes do anodo recebem menos corrente que as áreas mais próximas do anodo. Consequentemente as espessuras de camadas nesta região da peça serão menores que nas regiões com maior densidade de corrente. No processo de deposição química, que não utiliza corrente elétrica, a espessura de camada possui maior homogeneidade ao longo da superfície na qual foi aplicada, conforme ilustrado na figura 4.1(a).

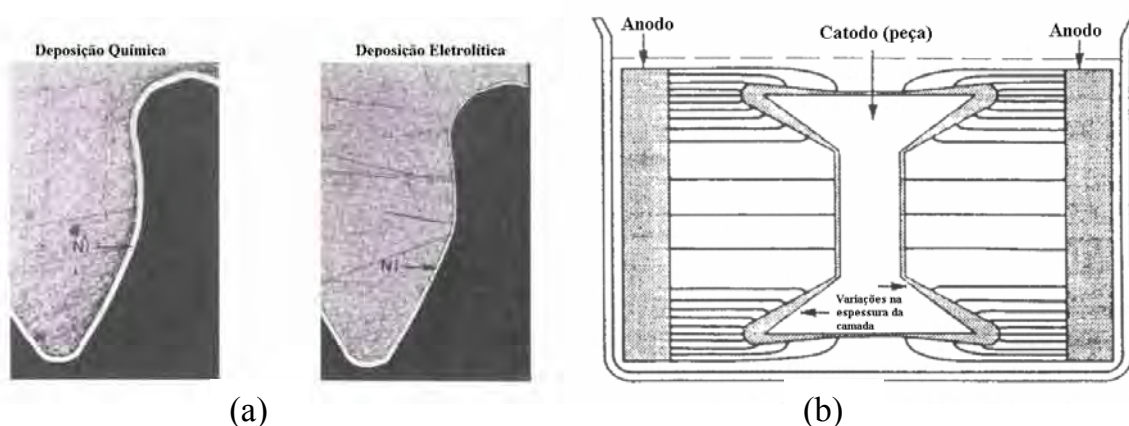


Figura 4.1 –(a)Espessura do revestimento de níquel, processos de deposição química e eletrolítica (LOWENHEIM, 1974); (b)Distribuição da corrente elétrica em uma peça durante o processo de eletrodeposição.(DIBARI, 1999).

Padilha,(2004) realizou medições de espessuras de revestimento de cromo duro com intercamada de níquel químico, depositados sobre corpos de prova confeccionados em aço ABNT 4340. A metodologia de eletrodeposição do cromo duro utilizada por Padilha,(2004) foi a mesma utilizada nos cdps deste trabalho. Os resultados destas medições são mostrados na tabela 4.2 As variações nas espessuras dos revestimentos de cromo mostradas na tabela 4.2, são da mesma ordem de grandeza das variações das espessuras do revestimento de cromo apresentadas na tabela 4.1. As variações nas espessuras do revestimento de níquel químico medidas por Padilha,(2004) são muito menores, o que é esperado neste processo de recobrimento que não utiliza corrente elétrica, porém não servindo de base para comparação com revestimento de níquel processo sulfamato da tabela 4.1 por serem de tipos totalmente diferentes.

Tabela 4.2 – Espessuras de camadas encontradas nos cdps do aço 4340 (PADILHA, 2004).

| Faixa de Ni encontrada( $\mu\text{m}$ ) | Faixa de Cr encontrada( $\mu\text{m}$ ) |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 12 $\leftrightarrow$ 16                 | 100 $\leftrightarrow$ 140               |
| 6 $\leftrightarrow$ 9                   | 181 $\leftrightarrow$ 230               |
| 18 $\leftrightarrow$ 24                 | 231 $\leftrightarrow$ 280               |
| 18 $\leftrightarrow$ 24                 | 281 $\leftrightarrow$ 370               |
| 45 $\leftrightarrow$ 53                 | 141 $\leftrightarrow$ 180               |
| 33 $\leftrightarrow$ 41                 | 231 $\leftrightarrow$ 280               |

## 4.2 – MEDIDAS DE MICRODUREZA

A tabela 4.3 apresenta os valores de microdureza Vickers nos revestimentos de níquel, cromo e no metal base dos grupos GP 2 ( Metal Base+ Shot Peening+Níquel + cromo) e GP3 (Metal Base+ Níquel + cromo).

Tabela 4.3 – Valores de microdureza Vickers (HV)- Grupos de cdps GP2 e GP3.

| Grupo | Camada de níquel   | Média | Camada de cromo    | Média | Metal base         | Média |
|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
| GP2   | 245, 239, 248, 246 | 244,5 | 816, 826, 827, 825 | 823,5 | 550, 552, 556, 550 | 552,0 |
| GP2   | 226, 227, 223, 222 | 224,5 | 803, 806, 811, 810 | 807,5 | 586, 574, 582, 583 | 587,5 |
| GP3   | 294, 303, 302, 299 | 299,5 | 829, 833, 835, 834 | 832,7 | 583, 587, 592, 588 | 587,5 |
| GP3   | 256, 263, 262, 258 | 259,7 | 826, 820, 811, 824 | 820,3 | 596, 597, 596, 588 | 594,2 |

Uma das características do processo sulfamato convencional é a baixa dureza dos revestimentos, que varia entre 170 a 250 HV, em relação aos obtidos por outros processos de niquelação eletrolítica, nos quais a dureza gira em torno de 500 a 550 HV. Nos processos de cromeação a dureza é bem superior nos quais a dureza da camada varia entre 750 a 1050 HV (GALVANOTÉCNICA PRÁTICA, 2003).

No processo de deposição química de níquel a dureza do revestimento é superior àquelas obtidas na niquelação eletrolítica podendo, após tratamento térmico, atingir dureza até 1000 HV (LOWENHEIN, 1974).

Os valores de microdureza da camada de cromo e de níquel da tabela 4.3, referentes aos grupos de cdps GP2 e GP3, estão aproximadamente dentro faixas encontras na bibliografia consultada.

Os valores de microdureza do metal base, após conversão da escala Vickers para a escala HRc com auxilio da norma ASTM E 140-02, apresentaram um valor aproximado de 52 -53 HRc , confirmando a faixa de dureza proposta para os ensaios.

Padilha, (2004) realizou medições de microdureza Vickers em revestimento de níquel químico e cromo duro, cujos resultados encontram-se na tabela 4.4. Os valores

de microdureza das camadas de cromo obtidos por Padilha,(2004) estão na mesma ordem de grandeza dos valores da tabela 4.3 obtidos neste trabalho. Fato já esperado, pois a metodologia empregada na cromeação foi a mesma.

Referente à microdureza da camada de níquel encontrada por Padilha (2004), os valores foram bem superiores aos encontrados neste trabalho. A microdureza dos depósitos obtidos na niquelação química, utilizada por Padilha (2004), é superior à obtida na niquelação convencional a base de sulfamato, utilizada neste trabalho. Estes resultados estão de acordo com a bibliografia consultada.

Tabela 4.4 – Valores de microdureza Vickers (HV)- Aço ABNT 4340:52HRc revestidos com níquel químico e cromo duro (PADILHA, 2004).

| Camada de níquel        | média | Camada de cromo         | média |
|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
| 609, 608, 613, 628, 614 | 614,4 | 927, 865, 829, 845, 909 | 875,0 |
| 865, 824, 858, 973, 913 | 886,6 | 909, 965, 865, 955, 932 | 925,2 |
| 536, 533, 553, 527, 560 | 541,8 | 802, 895, 904, 909, 874 | 876,8 |
| 918, 918, 927, 920      | 920,7 | 739, 780, 833, 810      | 790,5 |
| 702, 681, 657, 698      | 684,5 | 865, 865, 874, 927      | 882,7 |

### 4.3 – MEDIDAS DE TENSÕES RESIDUAIS

A tabela 4.5 apresenta os valores das tensões residuais obtidos de amostras dos grupos de corpo de prova GP1, GP2, GP4 e GP5 .As medidas foram feitas pelo método de difração de raio X no laboratório da UFRJ, exceto o revestimento de níquel.

O valor da tensão residual do revestimento de níquel encontrado foi de +30 MPa, representando o valor médio de tensão da camada de níquel vista isoladamente, ou seja, sem interagir com o substrato ou a camada de cromo. O valor da tensão residual resultante ponto a ponto da camada de níquel seria determinado se o método utilizado fosse o de difração de raio X.

Tabela 4.5 – Medidas de tensões residuais nos grupos de corpos de prova.

| Características                                | Profundidade mm | Perfil do c. de prova | Tensão MPa        | Método de medição                       |
|------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------------------|
| GP 1 - M. Base Aço ABNT 4340 53 HRc.           | 0,0             | Superfície MB.        | -1100             | Difração RX                             |
|                                                | 0,10            | Metal Base            | -700              | Difração RX                             |
| GP 2- Metal Base+ Shot Peening+Níquel + Cromo. | 0,0             | Superfície Cr.        | +610              | Difração RX                             |
|                                                | 0,075           | Cromo                 | -30               | Difração RX                             |
|                                                | 0,1             | Cromo                 | +370              | Difração RX                             |
|                                                | ~ 0,15 a 0,225  | Níquel                | +30 (valor médio) | Contractômetro                          |
|                                                | 0,35            | Metal Base            | -800              | Difração RX                             |
|                                                | 0,45            | Metal Base            | -640              | Difração RX                             |
| GP 3 - Metal Base+ Níquel + Cromo              | -               | -                     | -                 | Não foi feita medição                   |
| GP 4 - Metal Base+ Shot Peening+ Níquel        | ~ 0,0 a 0,05    | Níquel                | +30 (valor médio) | Contractômetro (ASTM B 636-84 (2001))   |
|                                                | 0,06            | Metal Base            | -900              | Difração RX                             |
|                                                | 0,16            | Metal Base            | -520              | Difração RX                             |
| GP 5 - Metal Base+ Níquel                      | ~ 0,0 a 0,045   | Níquel                | +30 (valor médio) | Contractômetro (ASTM B 636 - 84 (2001)) |
|                                                | 0,07            | Metal Base            | +180              | Difração RX                             |
|                                                | 0,17            | Metal Base            | -100              | Difração RX                             |

#### 4.3.1 – Análise do perfil da tensão residual do grupo de cdp GP1 (Metal BASE).

O perfil da tensão residual do material utilizado neste trabalho, mostrado na figura 4.2, difere significativamente daquele utilizado por Torres, 2002 em seu trabalho. O material utilizado por Torres também foi o 4340 53HRc, no entanto a tensão residual na superfície foi de -600MPa enquanto que a do material deste trabalho foi de -1100MPa.

. Como consequência do processo de polimento no acabamento final, que induzem tensões compressivas, é esperada tensões residuais compressivas na superfície do corpo de prova.

Diferenças no processo de polimento durante o acabamento final geraram as diferentes tensões compressivas na superfície dos corpos de prova.

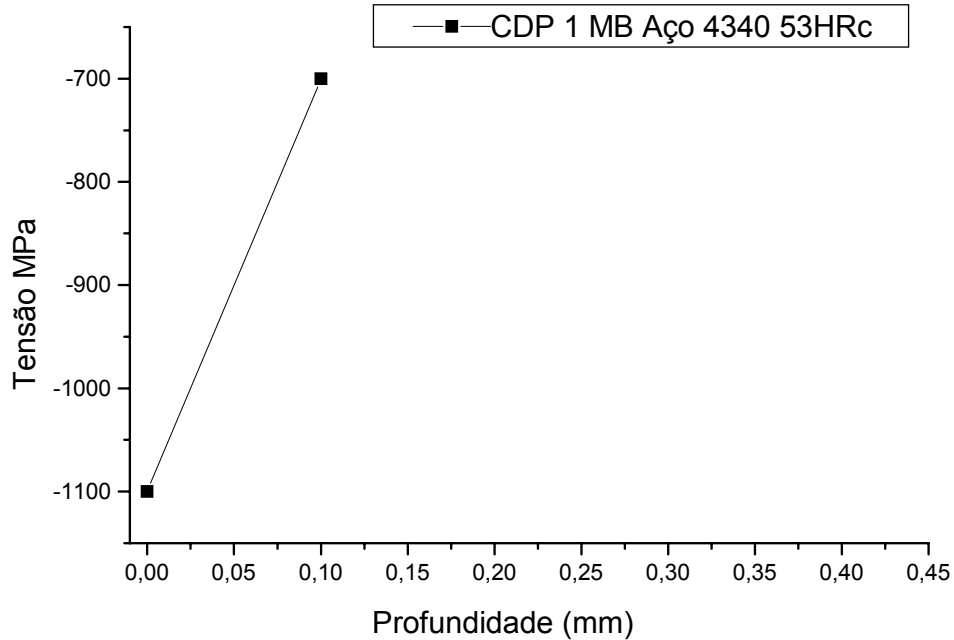


Figura 4.2 - Perfil das tensões residuais do aço ABNT 4340 53 HRC utilizado neste trabalho.

#### 4.3.2 – Análise do perfil da tensão residual do grupo de cdp GP2. (Metal Base+ Shot Peening+Níquel + Cromo)

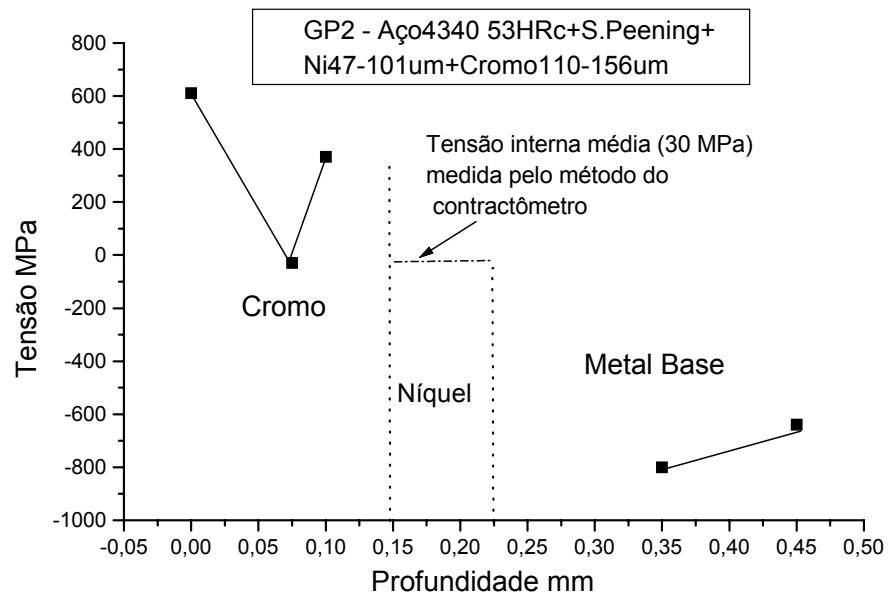


Figura 4.3 – Perfil da tensão residual do aço ABNT 4340 com shot peening e revestido com níquel e cromo.

Na figura 4.3 encontra-se o perfil das tensões residuais do aço 4340 com tratamento *shot peening* mais revestimento de níquel e de cromo. Nas camadas do substrato próximas à região da interface com o níquel, os valores de tensão compressiva são relativamente altos (-800MPa), resultante do tratamento *shot peening*. Este elevado valor da tensão compressiva na superfície do substrato dificulta a propagação da trinca originada nas camadas de níquel e de cromo contribuindo na recuperação da vida em fadiga.

#### 4.3.3 – Análise do perfil da tensão residual do grupo de cdp GP4. (Metal Base+ Shot Peening+ Níquel )

Na figura 4.4 encontra-se o perfil das tensões residuais do aço 4340 com tratamento *shot peening* mais revestimento de níquel. Observa-se na interface níquel – substrato o efeito do tratamento *shot peening* que induziu um valor de tensão compressiva relativamente alta (-900MPa) que vai aumentando com o aumento da profundidade do substrato. Este elevado valor da tensão compressiva na superfície dificulta a propagação da trinca originada na camada de níquel, durante o ensaio de fadiga, contribuindo na recuperação da vida em fadiga.

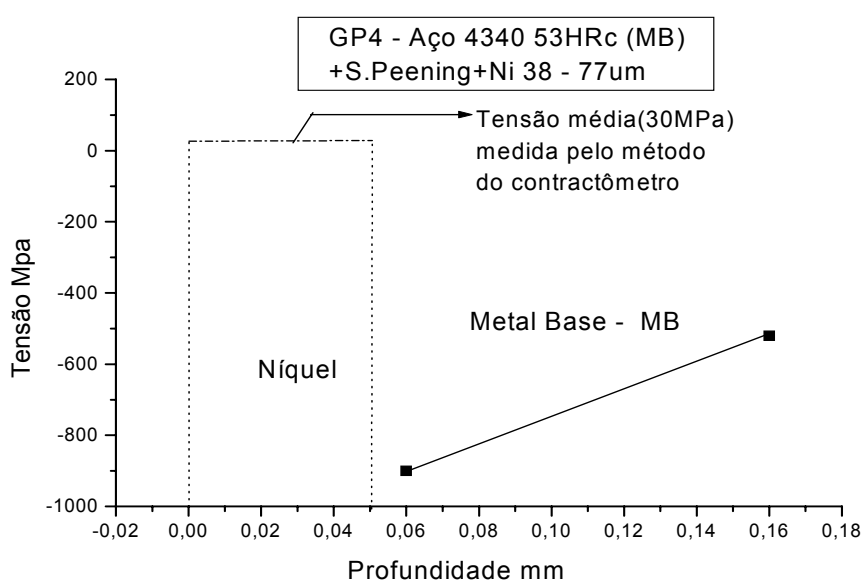


Figura 4.4 – Perfil da tensão residual do aço ABNT 4340 com *shot peening* e revestido com níquel.

#### 4.3.4 – Análise do perfil da tensão residual do grupo de cdp GP5. (Metal Base+ Níquel)

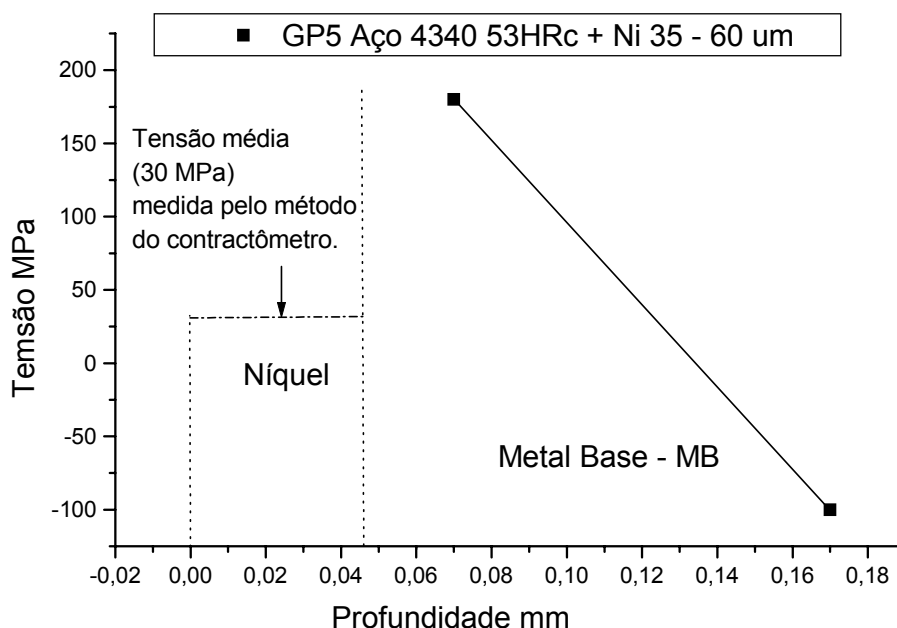


Figura 4.5 – Perfil da tensão residual do aço ABNT 4340 revestido com níquel.

A tensão residual na superfície do cdp sem tratamentos de *shot peening*, níquel ou cromo foi de -1100 MPa na superfície e -700 MPa na profundidade 0,1 mm, conforme ilustrado na figura 4.2. Observando a figura 4.5 verifica-se o valor de tensão residual de + 180 MPa nas camadas superficiais do metal base. Comparando estes resultados verifica-se uma grande diferença nos valores da tensão residual entre as regiões superficiais e subsuperficiais do substrato com e sem tratamento de níquel. Isto sugere que o revestimento de níquel exerceu forte influência na tensão residual na superfície do metal base.

O levantamento do perfil da tensão residual pelo método de raios-X, para permitir esta análise da influência do revestimento de níquel, é uma sugestão para trabalhos futuros.

Por outro lado, a tensão residual na camada de níquel e nas camadas superficiais do substrato, +30 MPa e +180 MPa, respectivamente, estão coerentes com a queda da resistência à fadiga observadas nos ensaios com este grupo.

## 4.4 – ENSAIOS DE FADIGA

### 4.4.1 – Considerações gerais

Os resultados dos ensaios de fadiga por flexão rotativa dos grupos de corpos de prova em suas diversas combinações de tratamento são apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Ensaio de fadiga dos grupos de corpos de prova.

| Grupos de copos de prova | GP 1 –<br>M. Base Aço<br>ABNT 4340<br>53 HRc. | GP 2-<br>M. Base+ Shot<br>Peening+<br>Níquel + cromo | GP 3-<br>Metal Base+<br>Níquel + cromo . | GP 4 –<br>Metal Base+ Shot<br>Peening+ Níquel | GP 5 - Metal<br>Base+ Níquel |
|--------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|
| Tensão Mpa               | Número de ciclos para fraturar $N_f$          |                                                      |                                          |                                               |                              |
| 1200                     | 41.400                                        | 8.100*                                               | 9.600*                                   | 9.600*                                        | 5.600*                       |
| 1200                     | 13.200                                        |                                                      |                                          |                                               | 13.400                       |
| 1100                     | 96.500                                        |                                                      |                                          | 24.000                                        | 13.000                       |
| 1100                     | 120.300                                       |                                                      |                                          | 16.600                                        |                              |
| 1050                     | 74.000                                        |                                                      |                                          |                                               |                              |
| 1000                     | 99.300                                        | 33.100                                               | 10.600                                   | 53.900                                        | 22.300                       |
| 1000                     | 3.009.500                                     | 24.900                                               |                                          | 58.600                                        |                              |
| 1000                     | 3.522.200                                     |                                                      |                                          | 49.200                                        |                              |
| 1000                     | 4.000.000                                     |                                                      |                                          |                                               |                              |
| 950                      |                                               |                                                      |                                          | 98.300                                        | 67.200*                      |
| 950                      |                                               |                                                      |                                          | 171.300*                                      |                              |
| 950                      |                                               |                                                      |                                          | 60.900                                        |                              |
| 930                      |                                               |                                                      |                                          | 3.765.500                                     |                              |
| 900                      |                                               | 47.300                                               | 15.400*                                  | 4.072.700                                     | 22.300                       |
| 900                      |                                               | 59.000*                                              |                                          |                                               | 15.000                       |
| 900                      |                                               |                                                      |                                          |                                               | 22.500                       |
| 880                      |                                               |                                                      |                                          |                                               | 23.800                       |
| 850                      |                                               | 134.800                                              |                                          |                                               |                              |
| 850                      |                                               | 135.300                                              |                                          |                                               |                              |
| 840                      |                                               |                                                      |                                          |                                               | 4.000.000                    |
| 820                      |                                               | 128.600*                                             |                                          |                                               |                              |
| 800                      |                                               |                                                      | 22.900                                   |                                               |                              |
| 780                      |                                               |                                                      | 25.500                                   |                                               |                              |
| 750                      |                                               |                                                      | 171.000                                  |                                               |                              |
| 730                      |                                               |                                                      | 272.000                                  |                                               |                              |
| 730                      |                                               |                                                      | 103.600                                  |                                               |                              |
| 710                      |                                               |                                                      | 34.100                                   |                                               |                              |
| 710                      |                                               |                                                      | 33.300                                   |                                               |                              |
| 690                      |                                               |                                                      | 30.800                                   |                                               |                              |
| 610                      |                                               |                                                      | 43.900                                   |                                               |                              |

\* Corpos de prova nos quais foram realizadas análises de fratura.

Analisando os resultados dos ensaios de fadiga da tabela 4.6 observa-se uma dispersão significativa do comportamento da vida em fadiga dos cdps ensaiados, representado pelo número de ciclos para fraturar  $N_f$ .

O espalhamento nos resultados é uma consequência da sensibilidade da fadiga à uma variedade de parâmetros do ensaio e do material que são impossíveis de serem controlados de maneira precisa. Estes parâmetros incluem a fabricação do corpo de prova, além da preparação da superfície, de variáveis metalúrgicas, o alinhamento do corpo de prova no equipamento, a tensão média e a frequência dos testes. Isto pode levar à incertezas quanto a vida em fadiga e/ou limite de resistência a fadiga (CALLISTER, 2002).

Um outro ponto a ressaltar, foi que, devido a este grande espalhamento os números de cdps preparados foram insuficientes para determinar o valor de  $N_f = 10^7$  que caracteriza a vida infinita e o limite de resistência a fadiga.

Devida às estas dificuldades, as curvas  $\sigma$ -N levantadas foram utilizadas para análises de tendências, uma vez que não foi possível a comparação entre os limites de resistência a fadiga .

#### 4.4.1.1 - Critérios para análises dos resultados dos ensaios de fadiga

Para a análise dos resultados, foram preparadas dois tipos de curva  $\sigma$ -N. Um tipo utilizando pontos selecionados a partir de um critério conservativo, ou seja, para um mesmo nível de tensão havendo espalhamento o  $N_f$  escolhido foi o de menor valor. Para o outro tipo de curva  $\sigma$ -N utilizando um critério não conservativo, no qual havendo espalhamento o  $N_f$  escolhido foi o de maior valor.

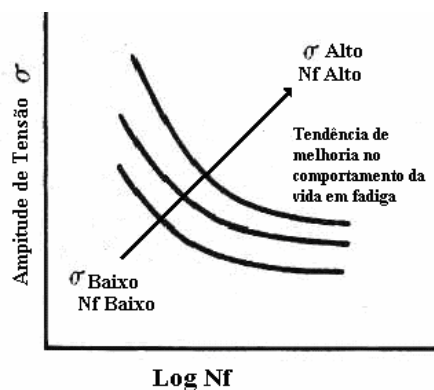


Figura 4.6 – Gráfico indicativo de tendência do comportamento da vida em fadiga. Adaptado de (CALLISTER, 2000).

As curvas  $\sigma$ -N das figuras 4.7 e 4.8 representam curvas de melhor ajuste traçadas através dos pontos seleccionados. A análise de tendência das curvas foi feita conforme o indicado na figura 4.6. Tensão ( $\sigma$ ) e número de ciclos para fraturar ( $N_F$ ) baixos, pior desempenho. Tensão ( $\sigma$ ) e ( $N_F$ ) altos, melhor desempenho.

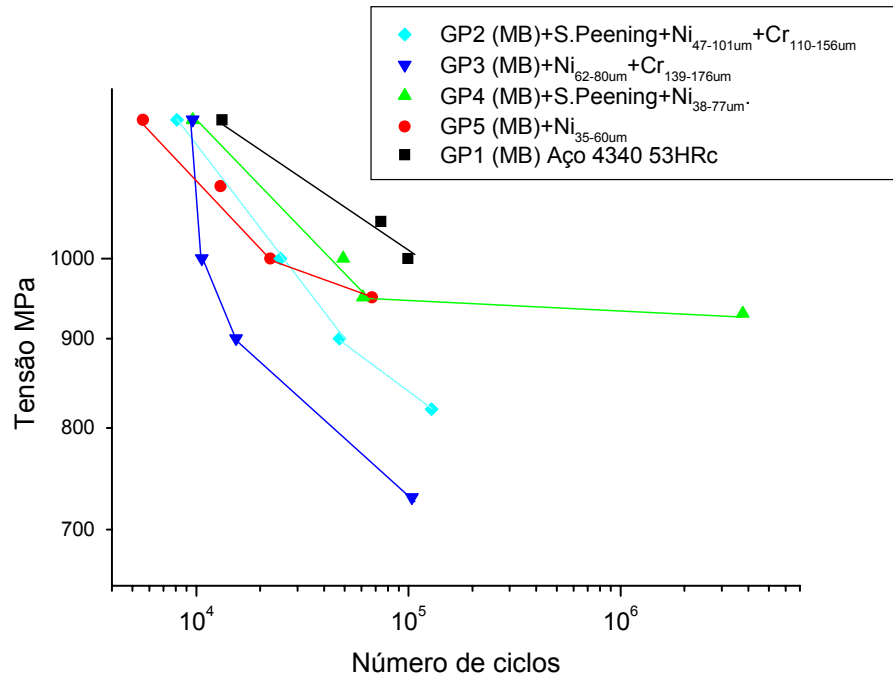


Figura 4.7 - Curva  $\sigma$ -N traçada a partir de valores de  $N_f$  conservativos.

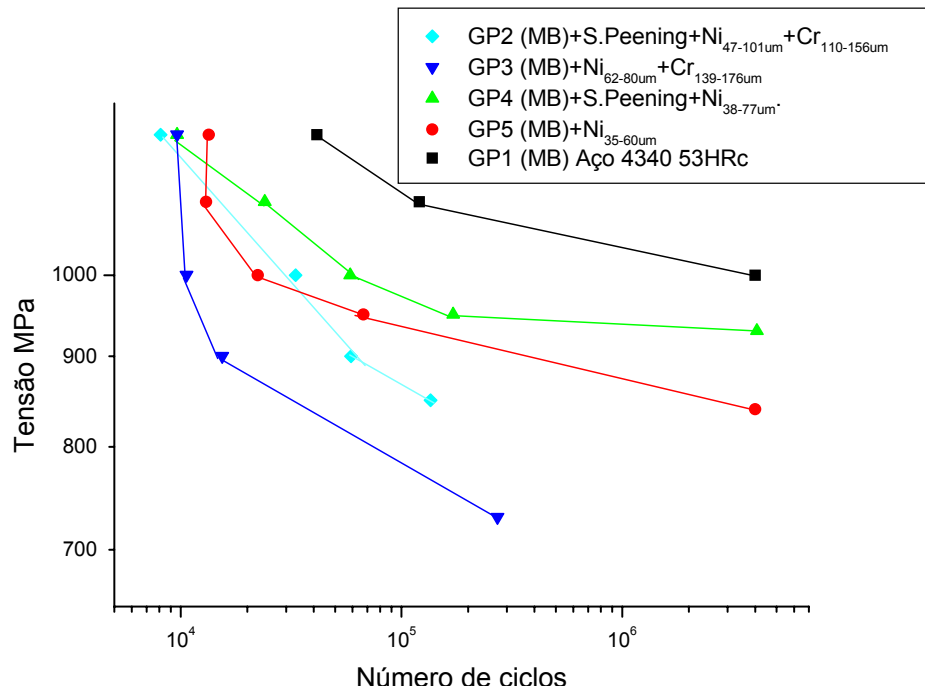


Figura 4.8 - Curva  $\sigma$ -N traçada a partir de valores de  $N_f$  não conservativos.

#### 4.4.2 – Análise dos resultados

Analizando as curvas das figuras  $\sigma$ -N das figuras 4.7 e 4.8 conforme o critério estabelecido, tanto para o  $N_f$  conservativo quanto para o não conservativo, as curvas mostram a seguinte tendência.

$$GP3 < GP2 < GP5 < GP4 < GP1$$

O grupo GP3, que possui revestimento de cromo com intercamada de níquel sem tratamento *shot peening*, foi o que apresentou pior desempenho na vida em fadiga. O grupo GP1 constituído apenas pelo metal base, que é a referência para as comparações, apresentou o melhor desempenho.

##### 4.4.2.1 - Efeito do revestimento de níquel processo sulfamato associado ao revestimento de cromo (Grupo GP3).

Os efeitos negativos da influência das tensões residuais trativas do revestimento de cromo e de níquel no desempenho da vida em fadiga se somaram.

Na análise de fratura do Grupo GP3, nas figuras 4.11 e 4.12, observa-se trincas iniciando tanto na camada de cromo quanto na camada de níquel. As trincas iniciadas na camada de cromo atravessaram a camada de níquel sem sofrer interferências em sua trajetória. Não foram observados efeitos na resistência a propagação das trincas pela intercamada de níquel processo sulfamato no grupo GP3.

Nascimento et al (2002) constatou efeito benéfico na utilização de intercamada de níquel químico na recuperação da vida em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com cromo duro. Este comportamento foi atribuído por Nascimento et al (2002) à tenacidade/ductibilidade e às tensões residuais compressivas contidas no revestimento de níquel químico, que possivelmente promoveram o retardamento na propagação das trincas existentes na camada externa de cromo duro.

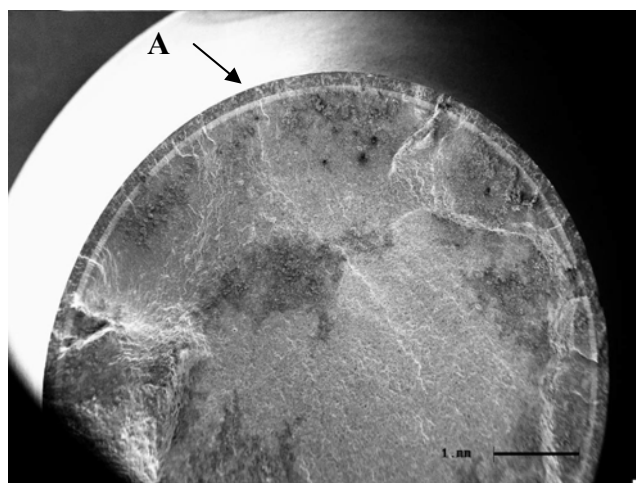
O comportamento observado neste trabalho na intercamada de níquel processo sulfamato foi oposto ao comportamento da intercamada de níquel químico no retardamento da propagação da trinca.

O alongamento do depósito de níquel processo sulfamato, obtido em laboratório em carregamento monotônico, é de 15% a 25% sendo superior ao alongamento de níquel químico que é na faixa de 3 a 6% (LOWENHEIN, 1974).

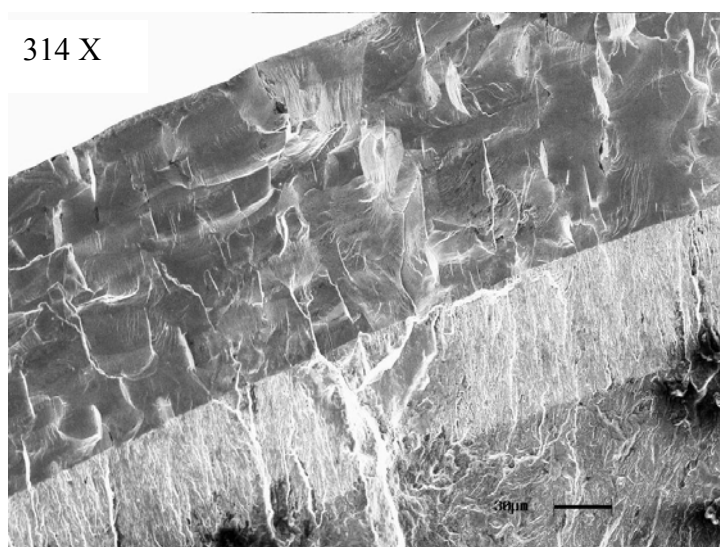
Como a ductibilidade do níquel processo sulfamato é superior ao do níquel químico, é esperado um efeito benéfico em maior intensidade na vida em fadiga do aço, devido à intercamada de níquel sulfamato. Por outro lado, as tensões residuais são opostas. Na camada de níquel químico é compressiva, enquanto que camada de níquel processo sulfamato a tensão residual é de tração. Esta diferença entre as tensões residuais é a causa mais provável da diferença do comportamento entre os revestimentos de níquel químico e de níquel sulfamato no retardo da propagação das trincas.

#### 4.4.2.1.1 - Análise das superfícies de fratura do aço ABNT 4340 53 HRC com revestimentos de níquel mais cromo – GP3.

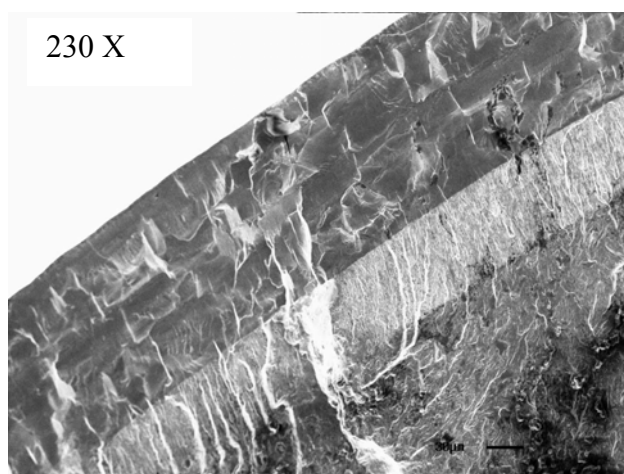
A figura 4.9 (a) mostra uma vista geral do corpo de prova ensaiado em baixo ciclo (1200 MPa – 9600 ciclos), na qual se observam vários locais de início de trinca na superfície. A propagação da trinca, iniciando no revestimento de cromo e cruzando o revestimento de níquel, pode ser observado na figura 4.9(a). As figuras 4.9 (b) e 4.9 (c) mostram detalhes das regiões A e B, respectivamente. Nos detalhes, é possível visualizar as trincas se iniciando tanto na camada de cromo quanto na camada de níquel e propagando sem deflexões para o interior do substrato.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.9 - Superfície de fratura corpo de prova grupo GP3 (1200 MPa – 9600 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região A.

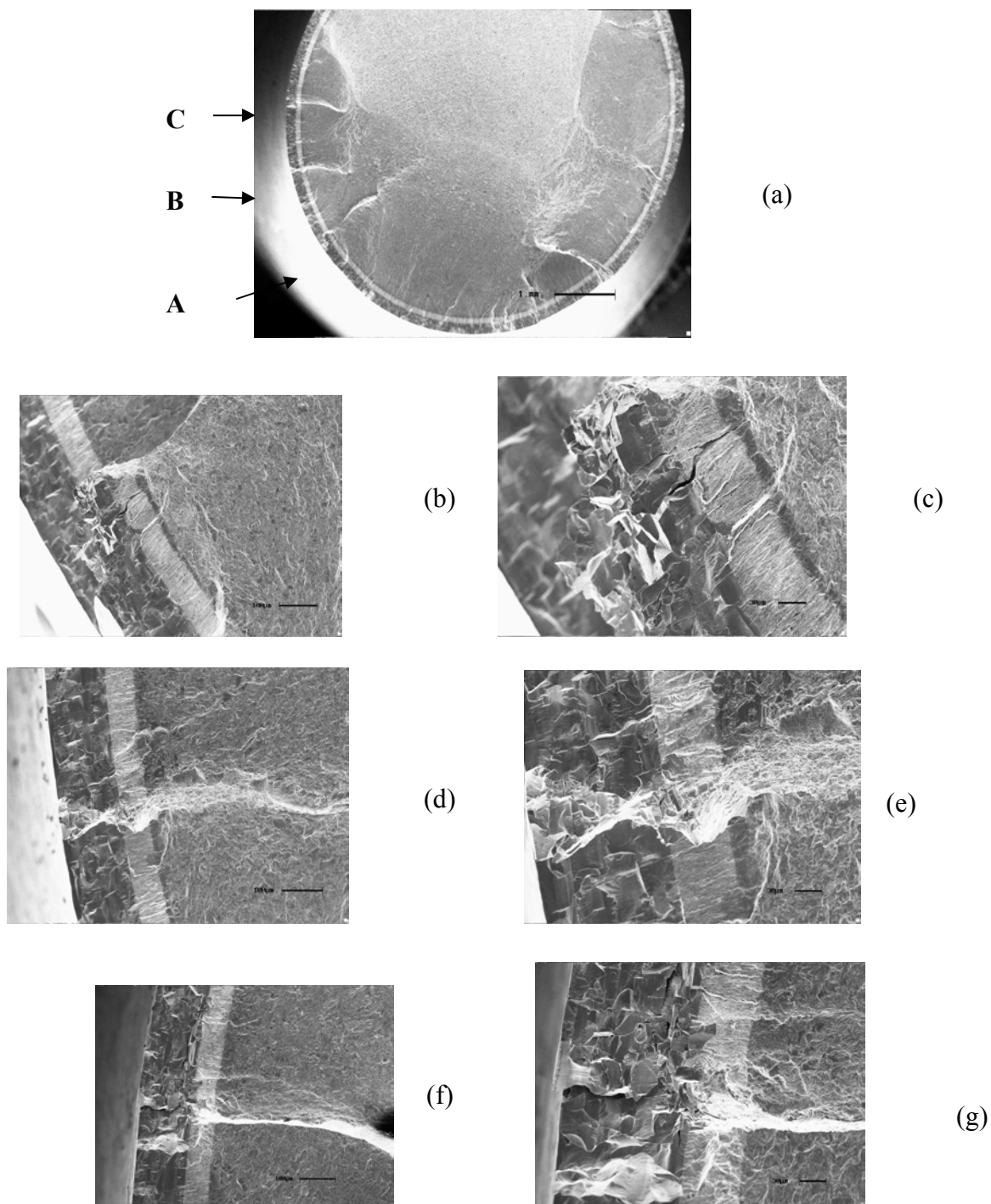


Figura 4.10 - Superfície de fratura corpo de prova grupo GP3 (900 MPa – 15400 ciclos): (a) Visão geral; (b) e (c) detalhes da região A; (d) e (e) detalhes da região B; (f) e (g) detalhes da região C.

A figura 4.10 (a) mostra uma vista geral do corpo de prova ensaiado em médio ciclo (900 MPa – 15400 ciclos), na qual se observam vários locais de início de trinca na superfície. Para esta figura valem as mesmas observações feitas para a figura 4.9.

#### 4.4.2.2 - Efeito do revestimento de níquel processo sulfamato na resistência à fadiga. (Grupo GP5).

Na análise da tendência o grupo GP5 apresentou desempenho na vida em fadiga superior ao grupo GP3 mas ainda inferior ao grupo GP1, constituído apenas pelo metal base. A principal causa da diferença no desempenho em relação ao grupo GP1 é a tensão trativa do revestimento de níquel cujo valor medido foi de 30 MPa. No GP5, além do revestimento de níquel, aparecem tensões trativas na superfície do corpo de prova.

Na seção 2.6.5, da revisão bibliográfica, foram discutidos os efeitos das tensões residuais trativas na resistência à fadiga.

Uma das características do processo de niquelação tipo sulfamato é a possibilidade de obtenção de camadas com tensões trativas ou compressivas. Uma sugestão para trabalhos futuros é a verificação do comportamento em fadiga de corpos de prova revestidos com níquel com tensões compressivas.

##### 4.4.2.2.1 – Análise da superfície de fratura do aço ABNT 4340 revestido com níquel – GP5

A figura 4.12(a) mostra uma vista geral do corpo de prova ensaiado em médio ciclo (950 MPa – 67200 ciclos), na qual também observa-se os locais de início de trinca na superfície mas em menor intensidade que na figura 4.11(a). As figuras 4.12(b) e 4.12(c) mostram detalhes das regiões A e B, respectivamente. Nos detalhes, é possível, também neste caso, visualizar as trincas se iniciando na camada de níquel e propagando sem deflexões para o interior do substrato.

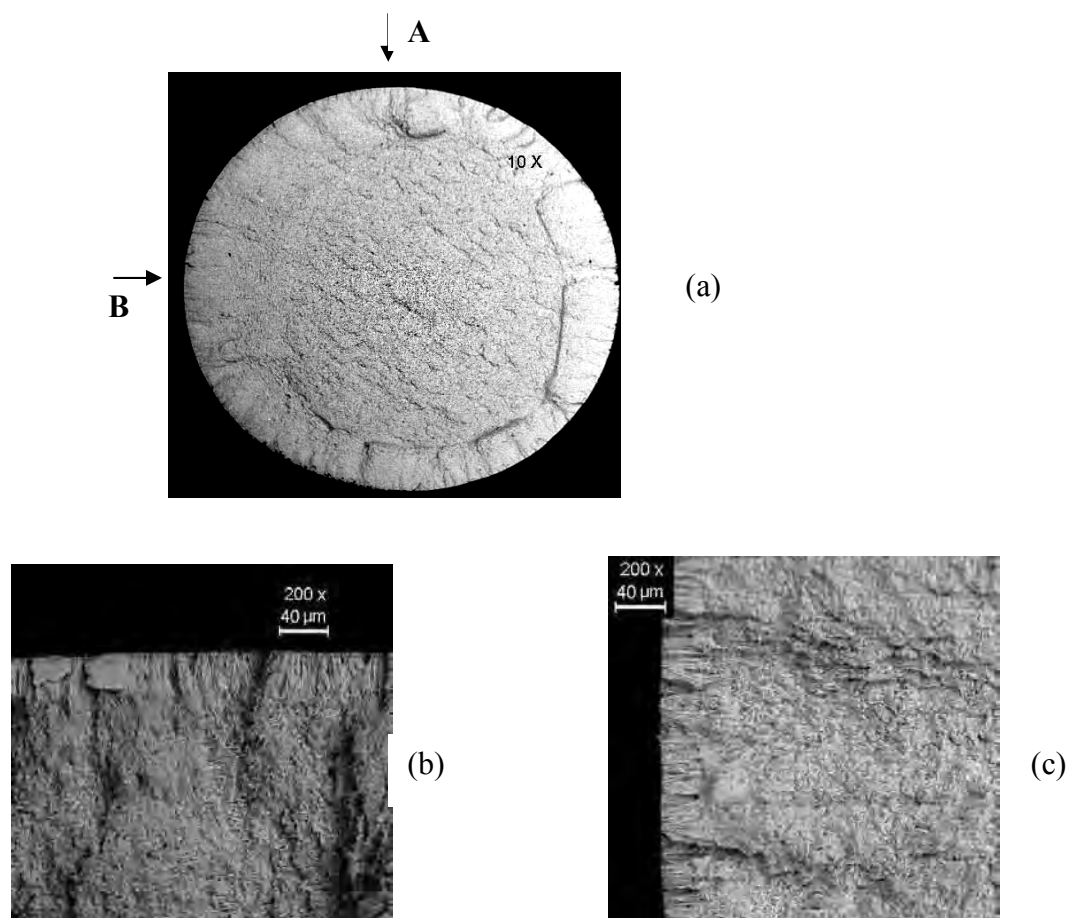


Figura 4.11– Superfície de fratura corpo de prova grupo GP5 (1200 MPa – 5600 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região B.

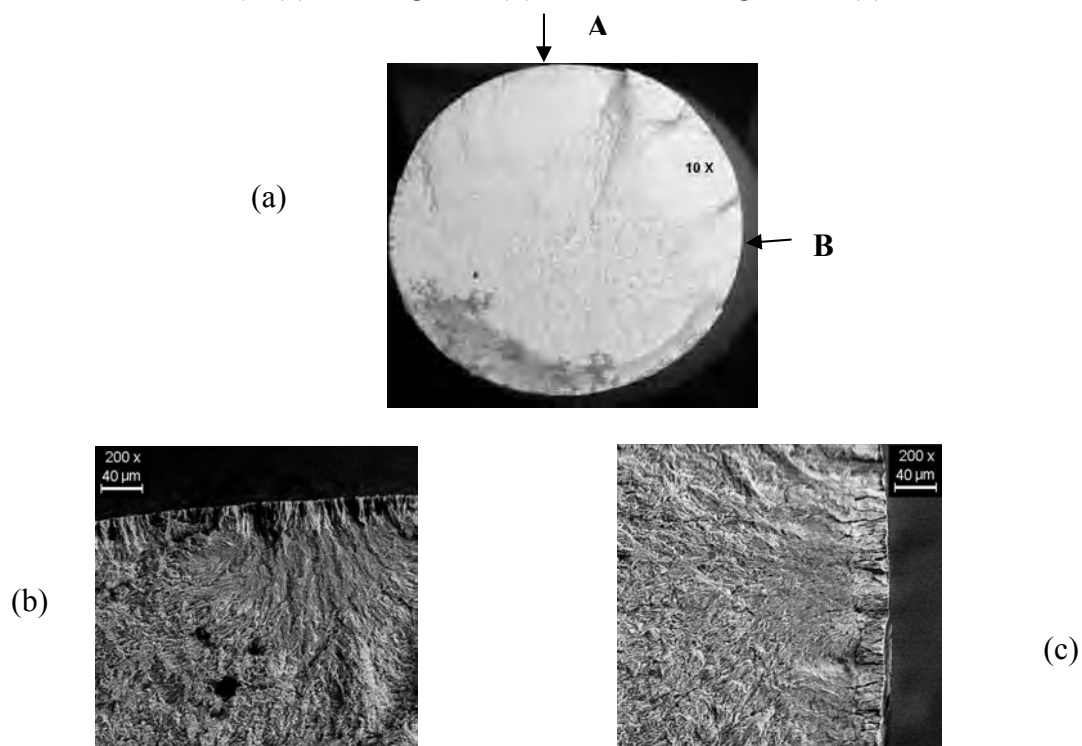


Figura 4.12 – Superfície de fratura corpo de prova grupo GP5 (950 MPa – 67200 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região B.

#### 4.4.2.3 - Efeitos do revestimento de níquel processo sulfamato associado ao recobrimento de cromo e ao tratamento *shot peening*, na resistência à fadiga do aço 4340 53HRC.(Grupo GP2)

Comparando a curva do Grupo GP2 com a curva do grupo GP3 (Camadas de Ni + Cr sem *shot peening*) tanto na figura 4.7 como na figura 4.8, observa-se o melhor desempenho do grupo GP2. Esta melhora de desempenho é atribuída ao pré tratamento de *shot peening* que grupo GP2 foi submetido.

É bem conhecido que o processo de *shot peening* induz tensões residuais compressivas na superfície e sub superfície, a uma profundidade que depende da intensidade, tamanho, material e dureza do shot e porcentagem de recobrimento. Sabe-se que as tensões residuais compressivas impedem ou retardam a criação e a propagação destas trincas.(NASCIMENTO, 1999).

Além disso, o *shot peening* provoca o amassamento de grão, o que significa maior dificuldade na propagação da trinca.

A análise da superfície de fratura mostra o efeito do pré tratamento de *shot peening* no grupo GP2.

##### 4.4.2.3.1 - Análise das superfícies de fratura do aço ABNT 4340 53 HRC com *shot peening* e revestimentos de níquel mais cromo- GP2.

A figura 4.13 (a) mostra uma vista geral do corpo de prova ensaiado em baixo ciclo (1200 MPa – 8100 ciclos), onde observa-se várias frentes de propagação de trinca.. As figuras 4.13 (b) e 4.13(c) mostram detalhes das regiões A e B, respectivamente, na qual se observa as trincas sendo formadas nas camadas de cromo e de níquel e sofrendo uma deflexão ao entrar no substrato. O campo de tensões compressivas induzido pelo *shot peening* dificulta a propagação da trinca desviando a sua trajetória. A figura 4.14 (a) mostra uma vista geral do corpo de prova ensaiado em médio ciclo (810 MPa – 128000 ciclos), na qual observa-se as frentes de propagação de trinca, mas em menor quantidade que na figura 4.13(a). As figuras 4.14(b) e 4.14(c) mostram detalhes das regiões A e B, respectivamente, nas quais se observa as trincas sendo formadas nas camadas de cromo e de níquel e sofrendo uma deflexão ao entrar no substrato. O campo de tensões compressivas induzido pelo *shot peening* dificulta a propagação da trinca desviando a sua trajetória.

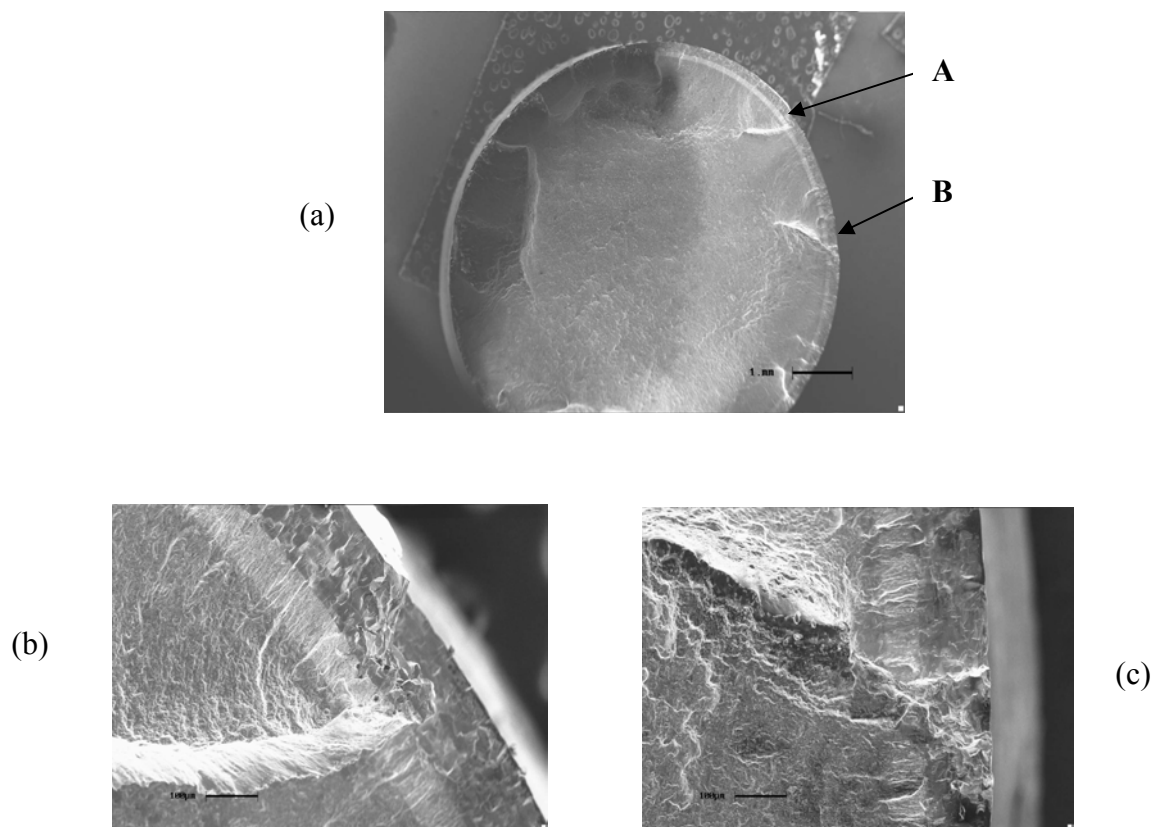


Figura 4.13- Superfície de fratura corpo de prova grupo GP2 (1200 MPa – 8100 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região B.

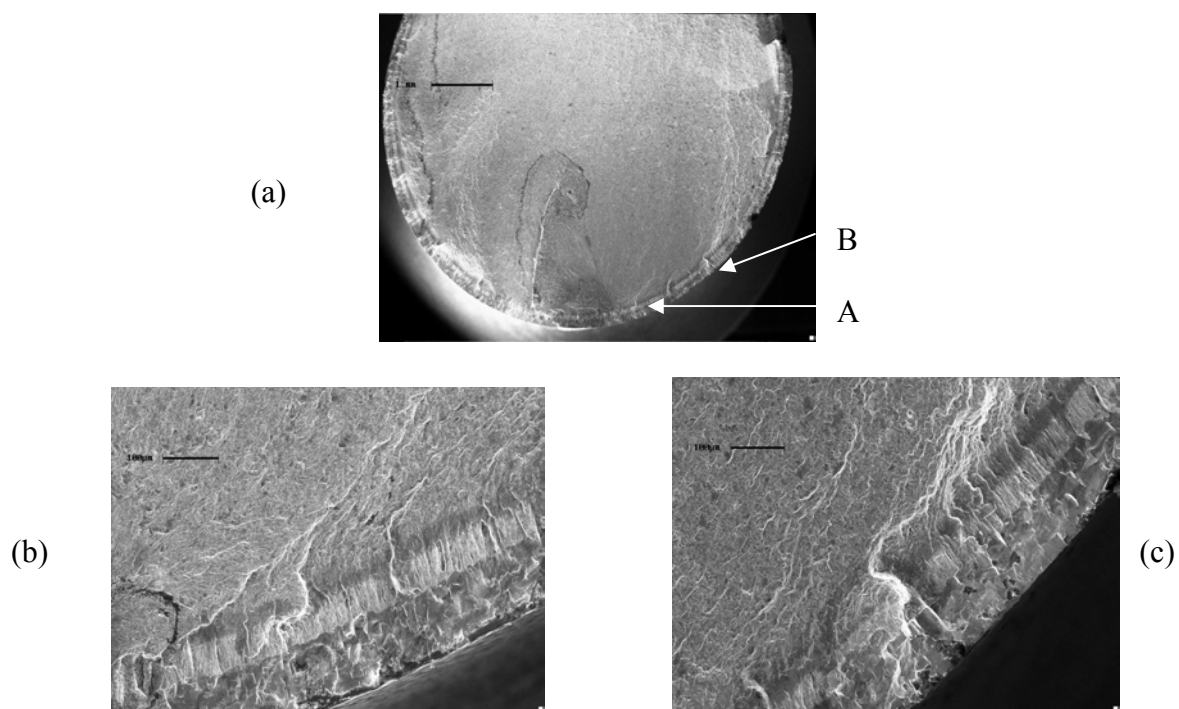


Figura 4.14 - Superfície de fratura corpo de prova grupo GP2 (810 MPa – 128000 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região B.

4.4.2.4- Efeito do revestimento de níquel processo sulfamato associado ao tratamento *shot peening* na resistência à fadiga.(Grupo GP4).

Comparando a curva do Grupo GP4 com a curva do grupo GP5 (Camadas de Ni sem *shot peening*) tanto na figura 4.7 como na figura 4.8, observa-se o melhor desempenho do grupo GP4. Esta melhora de desempenho é atribuída ao pré tratamento de *shot peening* que grupo GP4 foi submetido.

O efeito do pré tratamento *shot peening* no grupo GP4 é discutido na seção a seguir.

4.4.2.4.1- Análise das superfícies de fratura do aço ABNT 4340 53 HRc com *shot peening* e revestimentos de níquel - GP4.

A figura 4.15(a) mostra uma vista geral do corpo de prova ensaiado em baixo ciclo (1200 MPa – 9600 ciclos), na qual se observam várias frentes de propagação de trinca na superfície. As Figuras 4.15(b) e 4.15(c) mostram detalhes das regiões A e B, respectivamente.

A figura 4.16(a) mostra uma vista geral do corpo de prova ensaiado em médio ciclo (950 MPa – 171300 ciclos), onde também observa-se os locais de início de trinca na superfície mas em menor intensidade que na figura 4.15(a). As figuras 4.16(b) e 4.16(c) mostram detalhes das regiões A e B, respectivamente. Na figura 4.16(c) a trinca inicia na camada de níquel, sofre uma deflexão e caminha entre níquel e o substrato. O campo de tensões compressivas induzido pelo *shot peening* dificulta a propagação da trinca desviando a sua trajetória.

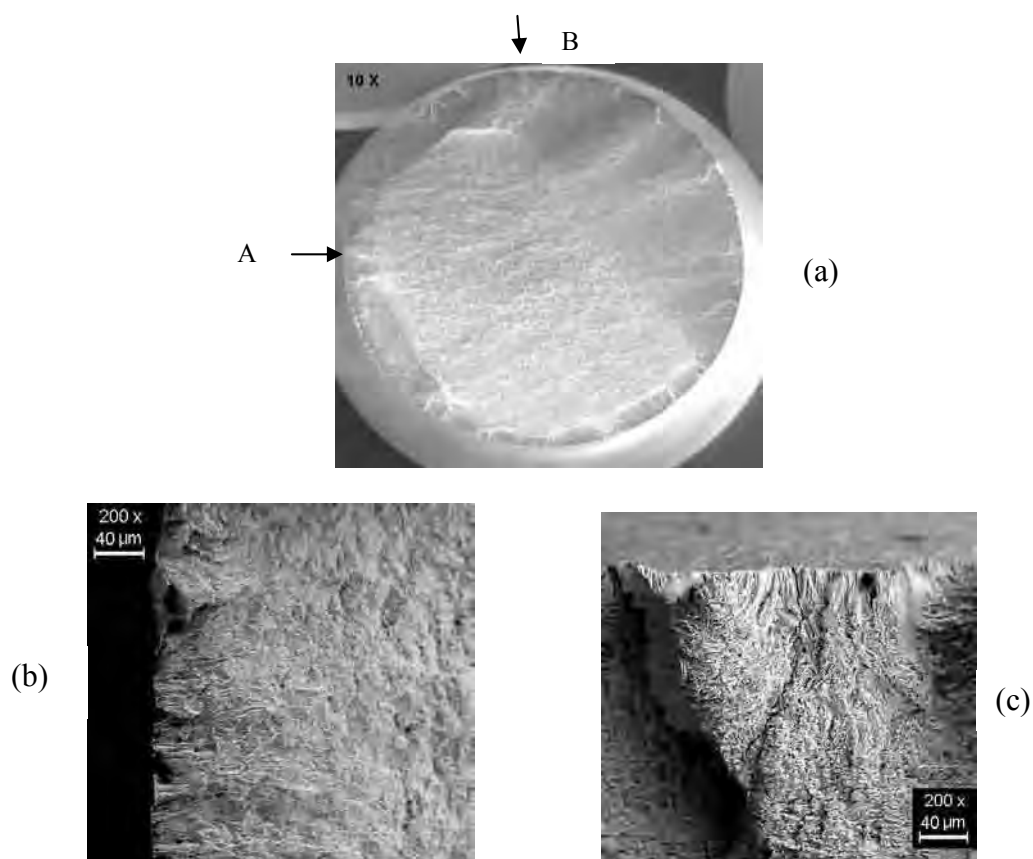


Figura 4.15 – Superfície de fratura corpo de prova grupo GP4 (1200 MPa – 9600 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região B.

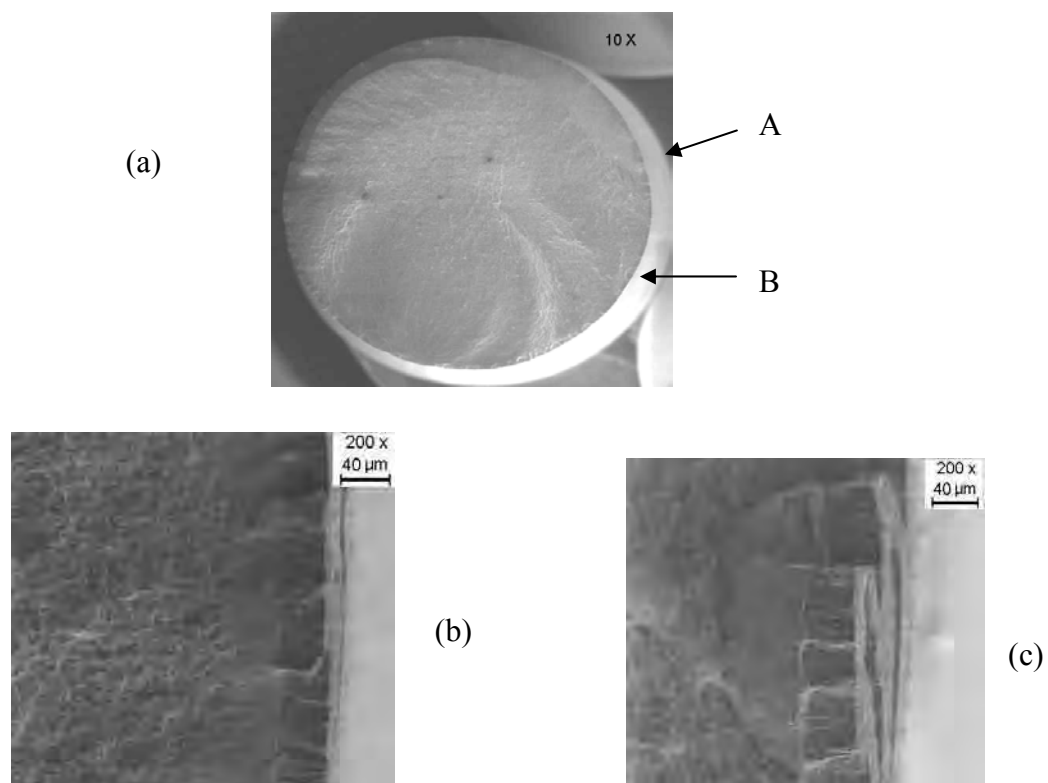


Figura 4.16 – Superfície de fratura corpo de prova grupo GP4 (950 MPa – 171300 ciclos): (a) Visão geral; (b) detalhes da região A; (c) detalhes da região B.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

1. O revestimento de níquel, eletrodepositado a partir do processo a base de sulfamato de níquel com tensão de tração, reduziu o desempenho no comportamento da vida em fadiga do aço ABNT 4340.

2. O pré tratamento de *shot peening* foi eficiente na recuperação do desempenho da vida em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com níquel eletrodepositado a partir do processo a base de sulfamato de níquel com tensão de tração, comparando GP4 com GP5.

3. O revestimento de níquel, eletrodepositado a partir do processo a base de sulfamato de níquel com tensão de tração, aplicado como intercamada entre o substrato e o revestimento de cromo, reduziu o desempenho do comportamento da vida em fadiga do aço ABNT 4340.

4. O pré tratamento de *shot peening* foi eficiente na recuperação do desempenho da vida em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com cromo e com intercamada de níquel processo sulfamato com tensão trativa.

5. O revestimento de níquel aplicado como intercamada entre o substrato e o revestimento de cromo, reduziu o desempenho do comportamento da vida em fadiga do aço ABNT 4340 em maior intensidade que quando aplicado isoladamente.

6. A tensão residual de tração no revestimento de níquel processo sulfamato foi a principal causa da redução do desempenho da vida da vida em fadiga do aço ABNT 4340, além de tensões residuais trativas que foram induzidas na superfície e subsuperfície do corpo de prova, possivelmente pelo revestimento.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

1. Realizar ensaios de fadiga com o aço ABNT 4340 HRc 53 com revestimento de níquel, com tensões residuais compressivas e com tensões residuais trativas, eletrodepositado a partir do processo sulfamato de níquel.
2. Avaliar o comportamento da vida em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com níquel processo sulfamato em função da variação das espessuras de revestimento.
3. Fazer levantamento do perfil das tensões residuais do revestimento de níquel processo sulfamato sobre o aço ABNT 4340 utilizando o método de difração de raios-X. Determinar a tensão residual durante a eletrodeposição pelo método do contractômetro conforme ASTM B 636-84(2001) e comparar os resultados.
4. Fazer levantamento do perfil das tensões residuais pelo método de difração de raios-X, do revestimento de cromo com intercamada de níquel processo sulfamato em tensões compressivas e em tensões trativas, aplicados sobre o aço ABNT 4340.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, C. E. S. **Análise dos Recobrimentos Anti-corrosivos sobre Aço Aeronáutico de Alta Resistência no Comportamento em Fadiga**, 2003 Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

ALMEN, J. O. **Loss and Gain by Electroplating**. Product Engineering, June 1951,pp.109-116.

ASME HANDBOOK. **Metals Engineering Design**. Second Edition - American Society of Mechanical Engineers. McGraw-Hill Book Company, New York 1965.

ASTM B 636 – 84 (2001), **Standard Test Method for Measurement of Internal Stress of Plated Coating with the Spiral Contractometer**. American Society for Testing and Materials, 2001.

ASTM E 140 - 02, **Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness**. American Society for Testing and Materials, 2002.

BAUDRAND,D. **Nickel Sulfamate Plating, Its Mystique and Practicality**, Metal Finishing, V. 94 ( 7 ) p. 15 July 1996.  
Disponível em <http://www.sciencedirect.com>.

BRENNER A. and SENDEROFF S. **A Spiral Contractometer for Measuring Stress in Electrodeposits**. Journal of Research of National Bureau of Standards, V. 42 p. 89 February 1949.

CALLISTER, WILLIAM D. **Materials science and engineering : an introduction** 5th ed. John Wiley & Sons, Inc. 1999.

CALLISTER, WILLIAM D. **Ciência e Engenharia de Materiais : Uma Introdução**. Quinta edição LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2002.

COSTA, S. **Palestra sobre resistência à fadiga**, Centro Técnico Aeroespacial CTA, 2003.

DIBARI G. A. **Nickel Plating**, Metal Finishing, V. 97 ( 1 ) Supplement 1 p. 276 1999.

Disponível em <http://www.sciencedirect.com>.

DIETER, GEORGE E. **Metalurgia Mecânica** segunda edição. Editora Guanabara Dois. Rio de Janeiro. 1981

DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials**. Engineering Methods for Deformations, Fracture, and Fatigue. Prentice-Hall International, Inc. New Jersey, USA 1993.

FLOTT, L.W. **Metal Finishing : An Overview**. Metal finishing, Vol. 98, issue 1, January, 2000. Disponível em <http://www.sciencedirect.com>.

GALVANOTÉCNICA PRÁTICA, organizado pela equipe da revista Galvanotechik, Traduzido pelo Eng. Peter Albert Folders. Polígono, Ed. da Universidade de São Paulo, 1973.

GENTIL V., **Corrosão** segunda edição. Editora Guanabara Dois. Rio de Janeiro. 1982.

LOWENHEIN, F.A.; **Modern Electroplating**. John Wiley & Sons. New York. Third Edition. 1974

MACDERMID INCORPORATED, **Sulfamate Nickel Plating, Operating Guide** June 2001.

METALS HANDBOOK 8<sup>th</sup> Edition Vol. 10 **Failure Analysis and Prevention** 1975.

MILLER, K. J.; **Materials science perspective of metal fatigue resistance**. Materials Science and Technology. V. 9. p.452-462. june, 1993.

MILITARY SPECIFICATION. MIL-S-13165C. **Shot peening of metals Parts**. December, 1966.

NASCIMENTO, M. P. **Determinação as Vida em Fadiga do Aço ABNT 4340 Revestido com Cromo Duro sobre Níquel Químico**, 1999 Dissertação ( Mestrado em Engenharia Mecânica, área de Projeto e Materiais), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

NASCIMENTO, M. P. et al, *Surface and Coating Technology*, Vol. 138,113-124,2001.

NASCIMENTO, M. P. et al, **Evaluation of Electroless Nickel Interlayer On the Fatigue & Corrosion Strength Of Chromium-plated AISI 4340 Steel**, *Plating & Surface Finishing* Vol. 88, 84-90, 2001.

NASCIMENTO, M.P.; TORRES, M. A.. S.; SOUZA,R.C.; VOORWALD, H.J.C.; **Effects of a shot peening pre treatment on the fatigue behaviour of hard chromium on electroless nickel interlayer coated AISI 4340 aeronautical steel**. *Materials Research*. v.5. nº 2. p.95-100. 2002.

NEWBY K.R., **Functional Chromium Plating**, *Metal finishing*, Vol. 98, issue 1 page 223-233, 2000. Disponível em <http://www.sciencedirect.com>.

NOGUEIRA J. C. **Resistência do aço MAS-6414 (ABNT-4340), após desidrogenação em forno convencional, quando protegido com cromo duro e cádmio LHE (Low Hydrogen Embrittlement)**.2003 Tese (Mestrado em Ciência) Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, na área de Física e Química dos Materiais Aeroespaciais. .

PADILHA, R. Q., **Influência na vida em fadiga da espessura das camadas de níquel e cromo duro em aço ABNT 4340**. 2004 Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

PERES, M. P., **Estudo do efeito do tempo e da temperatura de desidrogenação na resistência à fadiga do aço ABNT 4340 que sofreu eletrodeposição de cádmio**, 1996 Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais – Faculdade de Engenharia Química de Lorena.

PHYSIQUE & INDUSTRIE, **Residual stress theory**.

2003. Disponível em <http://physiqueindustrie.com/index.htm>.

[http://physiqueindustrie.com/residual\\_stress.htm](http://physiqueindustrie.com/residual_stress.htm) . Acesso em 22 set 2004.

RICE; C.R.; (Ed.) **SAE Fatigue Design Handbook**. 3<sup>rd</sup> ed. AE-22. Society of Automotive Engineers. Warrendale. 1997.

ROYLANCE, DAVID. **Fatigue**. Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA 02139. May 1, 2001  
Disponível em <http://ocw.mit.edu>  
<http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/93EAB4DF-4E69-47EE-8FED-7015DDEC2D99/0/fatigue.pdf>

SCHIJVE, J.; **Fatigue of structures and materials**: Residual Stresses. Chapter 4. Kluwer Academic Publishers. Holand. p.71-83. 2001.

SOUZA, R. C.; **Estudo do comportamento em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com carbeto de tungstênio pelo sistema HVOF/HP**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projeto e Materiais) – FEG/UNESP – Guaratinguetá – SP.

STEIN B., **A Practical Guide to Understanding, Measuring and Controlling Stress in Electroformed Metals**. 1996. Disponível em  
<http://www.finishing.com/Library/stein/strspapr.html>

TEODÓSIO, J. R., MONIN, V. I., GUROVA, T., **Novo método de tensometria por raio-X**, In: Seminário de inspeção de equipamentos, 23, 1997, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro, 1997, pp. 255-258.

TORRES, M. A. S., **Uma Avaliação do Efeito de Shot Peening na Vida em Fadiga do aço ABNT 4340 com e sem Revestimento de Cromo Duro**, 2002 Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

VOORWALD, H. J. C. et al, **Influence of Shot Peening on Chromium Electroplated AISI 4340 Steel Fatigue Strength**, European Congress of Fracture, Sweden, 2004