

Érika Santana Mota Nicoletti

**Processos de Precipitação por Reações
de Ordem numa Superliga à Base de
Níquel (59-23Cr-16Mo)**

TESE DE DOUTORADO

Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia
Programa de Pós-graduação em Ciências dos
Materiais e Metalurgia

Rio de Janeiro
Dezembro de 2003



Érika Santana Mota Nicoletti

**Processos de Precipitação por Reações de Ordem
numa Superliga à Base de Níquel (59-23Cr-16Mo)**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Prof. Fathi Aref Darwish

Orientador
Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

Prof. Ivan Guillermo Solórzano Naranjo

Co-orientador
Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de Dezembro de 2003

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro



Érika Santana Mota Nicoletti

Processos de Precipitação por Reações de Ordem numa Superliga à Base de Níquel (59-23Cr-16Mo)

Tese de Doutorado apresentada ao programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Fathi Aref Ibrahim Darwish

Orientador

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

Prof. Ivan Guillermo Solórzano Naranjo

Co-orientador

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

Prof. Roberto Ribeiro de Avillez

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

Prof. Herman Jacobus Cornelis Voorwald

Departamento de Engenharia Mecânica – FEG/UNESP

Dr. Alexandre Meirelles Pope

Tecnologia de Equipamentos, Materiais e Corrosão - CENPES/ PETROBRÁS

Prof^a. Maria Angela Loyola de Oliveira

Departamento de Engenharia de Produção em Materiais e Metalurgia – UCL

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de Dezembro de 2003

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Érika Santana Mota Nicoletti

Engenheira mecânica formada pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pós-graduação em Engenharia da Qualidade (UFES) e Engenharia de Dutos e Terminais (PETROBRÁS – Universidade Corporativa), Mestrado em Engenharia Mecânica com ênfase em Materiais.

Ficha Catalográfica

Nicoletti, Érika Santana Mota

Processos de Precipitação por Reações de Ordem numa Superliga à Base de Níquel (59-23Cr-16Mo)/ Érika Santana Mota Nicoletti; orientador: Fathi Darwish; co-orientador: Guillermo Solórzano. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, 2003.

[15], 94 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia.

Inclui referências bibliográficas.

1. Ciência dos materiais e metalurgia – Teses. 2. Reações de Ordem. 3. Superligas. 4. Níquel. 5. Precipitação. I. Darwish, Fathi. II. Solórzano, Guillermo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. IV. Título.

CDD: 669

In memoriam de Paulo Fraga.

Agradecimentos

Ao professor Fathi Aref Darwish pela compreensão, paciência, constante estímulo, grande dedicação e, sobretudo, pelas valiosas contribuições.

Ao professor Guillermo Solórzano pelas inúmeras contribuições, principalmente no MET, realizadas no decorrer deste trabalho, bem como pelo inestimável suporte experimental.

Ao Dr. Pedro D.Portela do BAM, por fornecer tanto o material quanto a motivação para a realização deste trabalho.

À Dra. Paula Mendes Jardim pelo grande auxílio em relação à técnica de microscopia eletrônica de transmissão.

Ao Instituto Militar de Engenharia, especialmente ao Capitão Pinto, pela atenção e realização das análises de EBSD.

Ao Prof. Hortêncio Alves Borges, do Depto. De Física da PUC-Rio, bem como ao doutorando Eduardo Hering, pela realização das montagens experimentais que possibilitaram as medidas de resistividade elétrica.

Ao prof. Roberto Avillez pela realização de análises termodinâmicas.

Ao técnico Marcelo Malheiros por todo o auxílio prestado ao longo dos últimos anos; ao fotógrafo Paulo Fernando Costa pela revelação das micrografias aqui apresentadas; *in memoriam* a Maria de Fátima Silva Lopes pelo auxílio inicial no uso do MEV.

A todos os colegas do DCMM pelo apoio e suporte.

À CAPES pelo suporte financeiro.

E ainda, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente ao meu marido, pelo incentivo e suporte familiar e aos colegas da Petrobrás Transportes S.A., pelo constante estímulo.

RESUMO

A superliga a base de níquel 59-23Cr-16Mo foi desenvolvida na década de 90 e tem sido aplicada em indústrias químicas e petroquímicas, bem como em equipamentos de controle ambiental. Esta liga tem apresentado, ocasionalmente, problemas de corrosão por pits em regiões específicas da zona termicamente afetada (ZTA) de juntas soldadas. Com o propósito de estudar os mecanismos atuantes nos processos de precipitação da liga, amostras da mesma foram submetidas a tratamentos de envelhecimento isotérmicos, às temperaturas de 700°C e 900°C, durante intervalos de tempo de 1 a 100 horas. Um estudo da evolução microestrutural do material, a partir da condição de como recebido, foi conduzido através de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por dispersão de energia de (EDS), difração de elétrons retroespalhados (EBSD), difração de raios-X, microscopia eletrônica de transmissão convencional e de alta resolução. O desempenho mecânico do material, em suas diferentes condições microestruturais, foi avaliado por meio de ensaios de tração uniaxial bem como de micro-dureza. Variações da resistividade elétrica da liga devido a evolução microestrutural foi investigada e o perfil de resistividade elétrica ao longo de uma junta soldada foi levantado. Os resultados obtidos indicaram a presença de reflexões $\{1, \frac{1}{2}, 0\}$ nos padrões de difração da maioria das microestruturas em questão. Tais reflexões são características de um estado de ordenação de curto alcance (SRO), e se constituem em evidência da ocorrência de reações de ordem através do mecanismo de empilhamento de planos cristalinos $\{4,2,0\}$. Uma vasta população de nanoprecipitados referentes à fase $\text{Ni}_2(\text{Mo,Cr})$, foi detectada em todas as condições analisadas no presente trabalho. Também foram observados, nas amostras envelhecidas, microprecipitados $\text{Ni}(\text{Mo,Cr})_2$, originados a partir de reações de ordem, ocorrendo preferencialmente na área de contornos de grão. O comportamento mecânico do material é associado à precipitação desta fase, a qual governa tanto a transição entre modos de ruptura intragranular para intergranular quanto a degradação da ductilidade da liga. Significativas variações da resistividade elétrica foram detectadas ao longo da ZTA, não associadas à quaisquer alterações microestruturais tendo sido, portanto, atribuídas à variações na quantidade de SRO.

Palavras-chave: Reações de Ordem; Liga 59; Superligas

ABSTRACT

The nickel base superalloy, 59-23Cr-16Mo, was developed in the nineties and has since been used in chemical and petrochemical industries as well as in equipment for environmental control. The alloy has, occasionally, been presenting problems of pit corrosion in the heat affected zones (HAZ) of welded joints. With the purpose of elucidating the mechanisms associated with precipitation processes, specimens were taken from the as-received alloy and submitted to isothermal aging at two different temperatures of 700 and 900°C, for time intervals varying from 1 to 100 hours. A study of the microstructural evolution accompanying the aging treatment was then conducted by means of X-ray diffraction, optical and scanning electron microscopies, making use of the energy dispersion spectroscopy (EDS) and electron back scattering diffraction (EBSD) techniques. Conventional and high resolution electron microscopies were also used as additional tools in order to follow the nanoscale precipitation processes. The mechanical behavior of the alloy in its different microstructural conditions was evaluated by means of uniaxial tensile tests as well as by microhardness measurements. Variations in electrical resistivity accompanying microstructure evolution were followed and electrical resistivity of a TIG welded joint was mapped. The results obtained have indicated the presence of $\{1, 1/2, 0\}$ reflections in the diffraction patterns of the majority of the microstructures in question. Such reflections, which are typical of short range ordered (SRO) state, indicate that the alloy is prone to precipitation mechanisms via ordering reactions, involving atomic stacking on $\{4,2,0\}$ planes. A large population of nanoprecipitates, referring to the $\text{Ni}_2(\text{Mo,Cr})$ phase, was detected in all of the microstructural conditions considered in this work. In addition, the aged specimens were also found to contain microscale $\text{Ni}_2(\text{Mo,Cr})_2$ particles formed at the grain boundaries via ordering reactions occurring preferentially in the grain boundary area. The mechanical behavior of the aged alloy is strongly related to the precipitation of this microscale phase, which governs the ductility level as well as the transition in the fracture mode from intragranular to intergranular. Finally, the electrical resistivity variation within the HAZ was not associated with microstructural alterations and therefore was attributed to variations in the quantity of the short range ordered structures.

Keywords: Ordering Reactions; Alloy 59; Superalloys

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	21
1.1 - Uma Perspectiva Histórica.....	23
2 – ABORDAGEM METODOLÓGICA, MATERIAL E PROCEDIMENTOS XPERIMENTAIS.....	27
2.1 – O Material.....	28
2.2 – Tratamentos Térmicos.....	31
2.3 – Técnicas Relativas à Resistência à Corrosão	32
2.3.1 – Medidas de Resistividade Elétrica	32
2.4 – Técnicas Relativas à Resistência Mecânica	34
2.4.1 – Medidas de Microdureza Vickers	36
2.4.2 – Ensaios de Tração Uniaxial	37
2.5 – Técnicas Relativas à Caracterização Microestrutural	38
2.5.1 – Microscopia Ótica	39
2.5.2 – Microscopia Eletrônica de Transmissão	42
2.5.3 – Microscopia Eletrônica de Varredura	45
2.5.4 – EBSD.....	46
2.5.5 – Raios-X	48
3 – A FENOMENOLOGIA ENVOLVIDA.....	50
3.1 – Uma Breve Exposição Teórica	50
3.1.1 – Efeitos da Precipitação sobre as Propriedades Mecânicas.....	56
3.2 – Reações de Ordem em Ligas Binárias.....	57
3.2.1 – Sobre a Natureza do Estado SRO.....	59
3.3 – Reações de Ordem em Ligas de Níquel	60
3.3.1 - Formação de β (Ni_4Mo).....	62
3.3.2 – Formação de γ (Ni_3Mo).....	65
3.3.3 – Adição de Outros Elementos.....	66
3.3.4 – Efeitos das Reações de Ordem nas Propriedades Mecânicas.....	67
4 – CARACTERIZAÇÃO MICRO E NANOESTRUTURAL	72
4.1 – Estado de Como Recebido	72
4.2 – Envelhecimento à 700°C	83
4.3 – Envelhecimento à 900°C	90
5 – CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS ...	108
5.1 – Ensaios de Tração.....	108
5.1.1 – Modelagem do Escoamento da Liga.....	117
5.2 – Ensaios de Microdureza	120
5.3 – Estudo Fractográfico	121

6 – JUNTA SOLDADA.....	126
6.1 – Resistividade Elétrica	126
6.2 Caracterização Microestrutural	130
7 – CONCLUSÕES.....	139
8 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	144

LISTA DE VARIÁVEIS

- β semi-ângulo de coleção das lentes.
- $\Delta G'$ energia de Gibbs por unidade de volume.
- ΔG_a energia de Gibbs por átomo constituinte num núcleo de fase β precipitada.
- ΔG_s variação da energia de Gibbs, associada à formação de um núcleo de área superficial s , da nova fase.
- ΔG_v variação da energia de Gibbs, associada à formação de um núcleo de volume v , da nova fase.
- δ menor distância a ser resolvida.
- ε deformação plástica real.
- $(\varepsilon_p)_{eng}$ parcela de deformação plástica de engenharia.
- ε_{eng} deformação total de engenharia.
- ε_f ductilidade.
- ε_u deformação real na carga máxima.
- γ energia superficial associada à interface núcleo/matriz.
- λ comprimento de onda.
- μ índice de refração.
- θ ângulo de incidência do feixe de raios-x.
- ρ resistividade elétrica de um material.
- σ tensão real.
- σ_{eng} tensão de engenharia.
- σ_o limite de escoamento do material.
- σ_u limite de resistência.
- σ_Y limite de escoamento.
- A' área da superfície do núcleo.
- A área da seção do condutor.
- A_f área final da seção do corpo de prova de tração.
- AL alongamento na fratura.
- A_o área inicial da seção do corpo de prova de tração.
- d distâncias entre os planos cristalinos.
- d^1 média das diagonais calculadas para as impressões.
- E módulo de elasticidade.
- G_o energia de Gibbs inicial de um sistema.
- G_{sist} energia de Gibbs de um sistema.

- K constante.
- L comprimento do condutor.
- n expoente de encruamento.
- P carga aplicada durante ensaio de micro-dureza.
- R resistência de um condutor.
- r raio de um núcleo esférico de uma fase β .
- r_{crit}^* raio crítico de um núcleo esférico de uma fase β .
- R.A redução de área.
- V diferença de potencial.
- v volume do núcleo.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Limite de Escoamento versus Temperatura da Liga 59 [13].	29
Figura 2.2: Limite de Resistência versus Temperatura da Liga 59 [13]...	29
Figura 2.3: Comparação da resistência à corrosão da liga 59, em relação às ligas 625 e C-276, em termos de taxa de penetração anual [13].....	30
Figura 2.4: Desvio do percurso de elétrons devido ao choque com os átomos constituintes da rede.....	32
Figura 2.5: Ilustração esquemática do susceptômetro magnético 7000-Lakeshore.....	33
Figura 2.6: Ilustração esquemática da montagem experimental para as medidas de resistividade nas ZTA's.....	34
Figura 2.7: Ilustração esquemática da geometria adotada nos corpos de prova para o ensaio de tração.....	38
Figura 2.8: Ilustração esquemática do MET.....	44
Figura 3.1: Custos energéticos envolvidos no processo de nucleação homogênea de uma esfera de raio r	50
Figura 3.2: Exemplo de interfaces entre matriz e uma segunda fase nucleada em contorno de grão.....	53
Figura 3.3: Diagrama binário do sistema Ni-Mo.....	61
Figura 3.4: Superestruturas diretamente originadas da rede CFC por empilhamento (4,2,0): a) Ni_2Mo , b) Ni_3Mo , c) Ni_4Mo e d) $NiMo$ [71]....	62
Figura 3.5: Arranjo atômico correspondente a Ni_4Mo completamente ordenado (α/β)[40].....	63
Figura 3.6: Seções [001] e [112] da rede recíproca apresentando as posições das reflexões extras obtidas à partir de fases ordenadas no sistema Ni-Mo [76].....	64
Figura 3.7: Comportamento das propriedades mecânicas da liga Haynes 242 (Ni-25Mo-8Cr) no decorrer de tratamentos de envelhecimento: (a) tensão de escoamento, 9b) tensão de ruptura, (c) ductilidade e (d) coeficiente de encruamento [71].....	69

Figura 4.1: Microscopia ótica em amostras atacadas com ácido oxálico, no estado de como recebida (a) seção longitudinal, (b) seção transversal.....	73
Figura 4.2: Microscopia eletrônica de varredura, com elétrons secundários, em amostras atacadas em ácido oxálico, no estado de como recebida: (a) seção longitudinal e (b) seção transversal.....	73
Figura 4.3: Amostras no estado de como recebida detalhes da estrutura de maclas em duas regiões (a) e (b).....	73
Figura 4.4: Microscopia eletrônica de transmissão, campo claro, de região maclada em amostra no estado de como recebida.....	74
Figura 4.5: Região de amostra no estado de como recebida: (a) mapeamento de diferenças de orientações cristalográficas e (b) identificação dos contornos de grão e de macla.....	75
Figura 4.6: Microscopia eletrônica de transmissão, campo claro, em amostra de material no estado de como recebido, evidenciando a existência de nanoprecipitados.....	76
Figura 4.7: Microscopia eletrônica de transmissão, campo claro, apresentando nanoprecipitados detectados em amostra de material no estado de como recebido.....	77
Figura 4.8: Diagrama do sistema binário Ni-Cr, segundo Massaski <i>et al</i> [53].....	77
Figura 4.9: Microscopia eletrônica de transmissão, campo claro, apresentando convergência de <i>bend contours</i> na condição de envelhecido a 700°C por 1 hora.....	78
Figura 4.10: Microscopia eletrônica de transmissão, campo claro, convergência de <i>bend contour</i> na condição de envelhecido a 700°C por 10 horas.....	79
Figura 4.11: Exemplo de obtenção de padrão difração em eixo de zona a partir de uma convergência de <i>bend contours</i> , em amostra no estado de como recebida: (a) campo claro e padrão de difração correspondente. (b), (c) e (d) apresentam dos <i>bend contours</i> individuais à partir dos principais spots.....	80
Figura 4.12: Microscopia eletrônica de transmissão, campo claro/campo escuro, evidenciando população de discordâncias em um dos cristais.....	81
Figura 4.13: Microscopia eletrônica de transmissão, campo claro/campo escuro, mostrando um empilhamento de discordâncias em ponto tríplice.....	81
Figura 4.14: Microscopia eletrônica de transmissão em campo claro, mostrando empilhamento de discordâncias.....	82

Figura 4.15: Microscopia eletrônica de transmissão em campo claro, mostrando empilhamento de discordâncias.....	82
Figura 4.16: Microscopia eletrônica de transmissão em campo claro, empilhamento de 5 discordâncias, campo claro.....	82
Figura 4.17: Microscopia ótica (DIC) de amostra envelhecida a 700°C por 1 hora, com ataque em NITAL 25%.....	84
Figura 4.18: Microscopia ótica (DIC) de amostra envelhecida a 700°C por 1 hora, com ataque em NITAL 25%.....	84
Figura 4.19: Amostra envelhecida a 700°C por 10 horas, imagem obtida através de elétrons retroespalhados, evidenciando a precipitação intergranular.....	84
Figura 4.20: Microscopia eletrônica de varredura Amostra envelhecida a 700°C por 10 horas (a) elétrons secundários e (b) elétrons retroespalhados.....	85
Figura 4.21: Amostra envelhecida a 700°C por 10 horas: (a) elétrons secundários, (b) elétrons retroespalhados.....	85
Figura 4.22: Microscopia ótica, DIC, de amostra envelhecida a 700°C por 1 hora, ataque em solução aquosa de ácido sulfúrico.....	86
Figura 4.23: Microscopia ótica, DIC, de amostra envelhecida a 700°C por 10 horas, ataque em solução aquosa de ácido sulfúrico.....	86
Figura 4.24: Microscopia eletrônica de varredura em amostra envelhecida a 700°C por 100 horas: (a) elétrons secundários, (b) elétrons retroespalhados.....	86
Figura 4.25: Microscopia eletrônica de varredura em amostra envelhecida a 700°C por 100 horas, elétrons secundários.....	87
Figura 4.26: Espectros de EDS obtidos a partir de região: (a) no interior do grão e (b) em contorno de grão rico em segunda fase.....	87
Figura 4.27: Análise de contornos de macla (vermelho) e grão (cinza escuro) em amostras da liga 59 nos estados de: envelhecido à 700°C por (a) 1h, (b) 10h e (c) 100h.....	88
Figura 4.28: Microscopia eletrônica de transmissão em amostra envelhecida a 700°C por 1 hora em região de <i>bend contour</i> : (a) campo claro e (b) campo escuro.....	89
Figura 4.29: (a) ilustração esquemática de campos de deformação ao redor de precipitados coerentes (b) ilustração experimentalmente obtida, a partir de microscopia eletrônica de transmissão, do efeito de campos de deformação em amostra envelhecida a 700°C por 10 horas.....	90
Figura 4.30: Microscopia ótica, campo claro, em amostra envelhecida a 900°C por 1 hora e atacada em solução de ácido oxálico.....	90
Figura 4.31: Microscopia ótica, campo claro, em amostra envelhecida a 900°C por 10 horas e atacada em solução de ácido oxálico.....	90

Figura 4.32: Microscopia ótica, DIC, em amostra envelhecida a 900°C por 100 horas e atacada em solução aquosa de ácido oxálico.....	91
Figura 4.33: Microscopia eletrônica de varredura, elétrons secundários, em amostra envelhecida à temperatura de 900°C por 1 hora.....	92
Figura 4.34: Microscopia eletrônica de varredura, elétrons secundários, em amostra envelhecida à temperatura de 900°C por 5 horas.....	93
Figura 4.35: Microscopia eletrônica de varredura, elétrons secundários, em amostra envelhecida à temperatura de 900°C por 10 horas.....	94
Figura 4.36: Microscopia eletrônica de varredura, elétrons secundários, em amostra envelhecida à temperatura de 900°C por 25 horas.....	95
Figura 4.37: Microscopia eletrônica de varredura, elétrons secundários, em amostra envelhecida à temperatura de 900°C por 25 horas.....	95
Figura 4.38: Microscopia eletrônica de varredura, elétrons secundários, em amostra envelhecida à temperatura de 900°C por 100 horas.....	95
Figura 4.39: Microscopia eletrônica de varredura, elétrons secundários, em amostra envelhecida a 900°C por 25 horas.....	96
Figura 4.40: Microscopia eletrônica de varredura, elétrons secundários, em amostra envelhecida à temperatura de 900°C por 100 horas.....	97
Figura 4.41: Microscopia eletrônica de varredura, elétrons secundários, em amostra envelhecida à temperatura de 900°C por 1 hora.....	98
Figura 4.42: Microscopia eletrônica de varredura, elétrons secundários, em amostra envelhecida à temperatura de 900°C por 100 horas.....	99
Figura 4.43: Microscopia eletrônica de transmissão, em região de contorno de grão de uma amostra envelhecida à temperatura de 900°C por 100 horas: (a) campo claro, (b) campo escuro, (c) figura de difração do grão superior, (c) figura de difração do grão inferior e (d) figura de difração da área.....	99
Figura 4.44: Microscopia eletrônica de varredura, elétrons secundários, em amostra envelhecida à temperatura de 900°C por 100 horas + EDS....	100
Figura 4.45: Análise de contornos de macla (vermelho) e grão (cinza escuro) em amostras da liga 59 nos estados de: (a) como recebido e envelhecido à 900°C por 1h, (b) 10h e (c) 100h.....	102
Figura 4.46: Microscopia eletrônica de transmissão, campo claro, matriz de amostra envelhecida a 900°C por 100 horas, em região próxima a um microprecipitado em contorno de grão.....	103
Figura 4.47: Microscopia eletrônica de transmissão em campo claro de precipitado intergranular, em amostra envelhecida a 900°C por 100 horas.....	105
Figura 4.48: Microscopia eletrônica de transmissão em campo claro de precipitado intergranular em amostra envelhecida a 900°C por 100 horas.....	105

Figura 4.49: Microscopia eletrônica de transmissão, imagem de alta resolução obtida a partir de precipitado intergranular em de amostra envelhecida a 900°C por 100 horas.....	109
Figura 4.50: Difractograma de raios -x obtido a partir de amostra da liga 59 envelhecida a 900°C por 100 horas (Difratômetro Siemms D 5000, anodo de cobre (1,5406 Å), 0,02° 2θ/s).....	106
Figura 4.51: Figuras de difração: (a) amostra no estado de como recebida [112], (b) envelhecida a 700°C (c) envelhecida a 900°C [011]...	107
Figura 5.1: Variação do limite de escoamento em relação ao tempo de envelhecimento.....	109
Figura 5.2: Variação do limite de resistência em relação ao tempo de envelhecimento.....	110
Figura 5.3: Variação do alongamento percentual em relação tempo de envelhecimento.....	110
Figura 5.4: Variação da restrição de área percentual em relação ao tempo de envelhecimento.....	111
Figura 5.5: Variação da deformação máxima percentual em relação tempo de envelhecimento.....	111
Figura 5.6: Variação da ductilidade em relação ao tempo de envelhecimento.....	112
Figura 5.7: Microscopia eletrônica de transmissão, campo claro, evidenciando a existência de micromaclas no interior de um precipitado micrométrico localizado na região de contorno de grão.	114
Figura 5.8: Comparação das características microestruturais da liga 59, por microscopia eletrônica de varredura com elétrons secundários, nas condições de (a) como recebida e (b) envelhecida a 700°C por 1 hora.....	115
Figura 5.9: Comparação das características microestruturais da liga 59, por microscopia eletrônica de varredura com elétrons secundários, nas condições de (a) envelhecida a 700°C por 10 horas e (b) envelhecida a 900°C por 1 hora.....	115
Figura 5.10: Comparação das características microestruturais da liga 59, por microscopia eletrônica de varredura com elétrons secundários, nas condições de (a) envelhecida a 700°C por 100 horas e (b) envelhecida a 900°C por 10 horas.....	116
Figura 5.11: Características microestruturais da liga 59 na condição de envelhecida a 900°C por 100 horas, por microscopia eletrônica de varredura com elétrons secundários.....	116
Figura 5.12: Comportamento da taxa de encruamento calculada em relação aos tempos de envelhecimento para as temperaturas de 700 e 900°C, de acordo com modelagem por Ludwig.....	118
Figura 5.13: Comportamento da taxa de encruamento calculada em relação aos tempos de envelhecimento para as temperaturas de 700 e 900°C, de acordo com a modelagem de Hollomon.....	119

Figura 5.14: Comportamento observado da propriedade de micro-dureza no decorrer dos processos de envelhecimento às temperaturas de 700 e 900°C a partir da condição inicial de como-recebido.....	120
Figura 5.15: Nova modelagem do comportamento da micro-dureza à temperatura de 900°C com pontos extras de 5 e 25 horas.....	121
Figura 5.16: Fractografias obtidas a partir de corpos de prova nas condição de envelhecido a 700°C pelos intervalos de tempo de (a) 1 hora e (b) 10 horas.....	121
Figura 5.17: Fractografias obtidas a partir de corpos de prova nas condição de como recebido, em diferentes magnificações.....	123
Figura 5.18: Fractografias obtidas a partir de corpos de prova nas condições: (a) envelhecida a 700°C por 100 horas e (b) envelhecida a 900°C por 1 hora.....	124
Figura 5.19: Fractografias obtidas a a partir de corpos de prova nas condição de envelhecido a 900°C pelos intervalos de tempo de (a) 10 horas e (b) 100 horas.....	125
Figura 6.1: Registro gráfico de ensaio de resistividade efetuado em três linhas transversais ao cordão de solda.....	127
Figura 6.2: Gráfico do comportamento da resistividade elétrica em relação à distância do cordão de solda.....	128
Figura 6.3: Gráfico do comportamento da resistividade elétrica em relação aos tratamentos de envelhecimento executados.....	128
Figura 6.4: Gráfico que evidencia a subdivisão da junta soldada em três regiões distintas de resistividade elétrica.....	129
Figura 6.5: Microscopia eletrônica de varredura efetuada na região central do cordão: (a) elétrons secundários, (b) elétrons retroespalhados.	131
Figura 6.6: Microscopia eletrônica de varredura efetuada na região central do cordão: (a) elétrons secundários, (b) elétrons retroespalhados.).....	132
Figura 6.7: Microscopia ótica da região central do cordão de solda. Ataque em solução aquosa de ácido oxálico.....	133
Figura 6.8: Microscopia ótica na região de transição da zona fundida para a zona termicamente afetada. Ataque em solução aquosa de ácido oxálico.....	133
Figura 6.9: Microscopia ótica nas estruturas dendríticas radiais formadas no limiar da zona fundida com a zona termicamente afetada. Ataque em solução aquosa de ácido oxálico.....	134
Figura 6.10: Microscopia ótica nas estruturas dendríticas radiais formadas no limiar da zona fundida com a zona termicamente afetada. Ataque em solução aquosa de ácido oxálico.....	134
Figura 6.11: Microscopia ótica na zona de transição entre o cordão de solda e o metal base. Ataque em solução aquosa de ácido oxálico.....	135

Figura 6.12: Figura em campo claro por microscopia eletrônica de transmissão numa região da zona fundida, demonstrando a ausência de nanoprecipitados.....	136
Figura 6.13: Microscopia eletrônica de varredura, por elétrons secundários, na ZTA próxima ao cordão.....	136
Figura 6.14: Microscopia eletrônica de varredura, por elétrons secundários, no interior da ZTA.....	137
Figura 6.15: Microscopia Ótica, DIC, na ZTA nas proximidades do cordão. Ataque em solução aquosa de ácido oxálico.....	137
Figura 6.16: Imagem de microscopia eletrônica de transmissão em campo claro, na região da ZTA à 1,2 cm do cordão de solda.....	137
Figura 6.17: Campo claro em seção transversal à ZTA, a 1,6 cm do cordão.....	138
Figura 6.18: Campo claro em seção transversal à ZTA, a 0,6 cm do cordão.....	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Dados Referentes aos Elementos presentes na Liga 59 [7].	24
Tabela 1.2: Evolução Cronológica das Ligas da Família C [10,11].	26
Tabela 2.1: Composição Química da Liga 59.	29
Tabela 2.2: Parâmetros utilizados no processo de soldagem da junta analisada [14].	30
Tabela 3.1: Possíveis segundas fases no sistema Ni-Mo [40, 71-72].	61
Tabela 3.2: Segundas Fases Possíveis no Sistema Ni-Cr-Mo-Fe.	67
Tabela 4.1: Distâncias de Difusão do Mo no Ni.	91
Tabela 5.1: Dados resultantes dos Ensaios de Tração.	109
Tabela 5.2 : Resultados Obtidos pela Modelagem do Escoamento.	118