



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Ciência e Tecnologia

Faculdade de Engenharia

Débora Francielle Dias

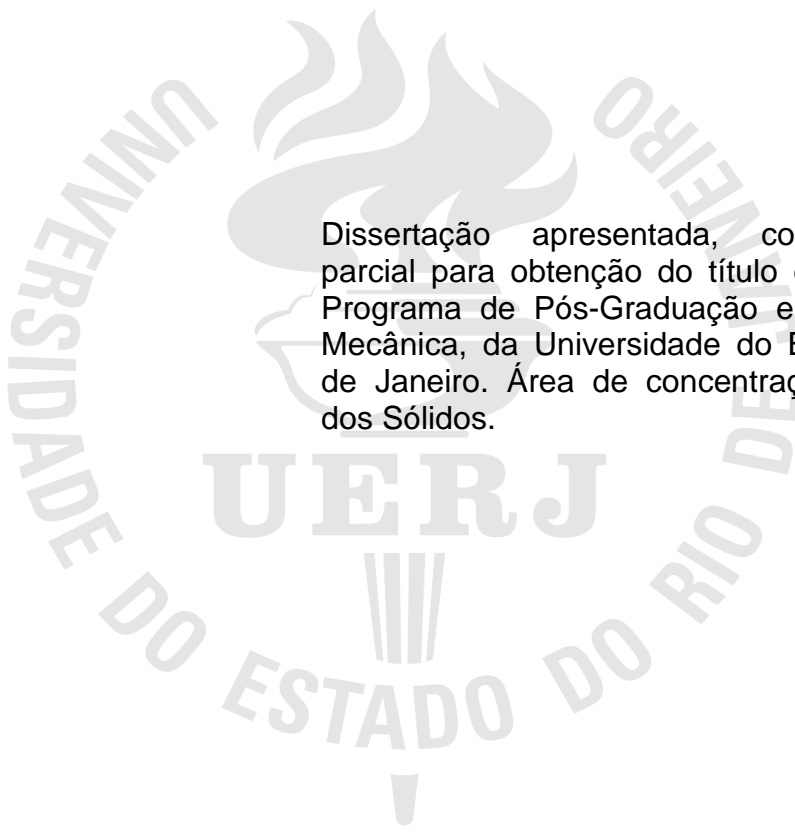
**Caracterização de juntas soldadas por TIG autógeno manual com
arco pulsado e arco não pulsado do aço inoxidável hiperduplex
SAF 2707 HD**

Rio de Janeiro

2012

Débora Francielle Dias

Caracterização de juntas soldadas por TIG autógeno manual com arco pulsado e arco não pulsado do aço inoxidável hiperduplex SAF 2707 HD



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Mecânica dos Sólidos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marília Garcia Diniz

Rio de Janeiro

2012

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

D541 Dias, Debora Francielle.
Caracterização de juntas soldadas por TIG autógeno manual com arco pulsado e arco não pulsado do aço inoxidável hiperduplex SAF 2707 HD / Debora Francielle Dias. - 2012.
182 f.

Orientador: Marília Garcia Diniz.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Mecânica. 2. Juntas soldadas - Dissertações. I. Diniz, Marília Garcia Diniz. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 621.791.05

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Débora Francielle Dias

Caracterização de juntas soldadas por TIG autógeno manual com arco pulsado e arco não pulsado do aço inoxidável hiperduplex SAF 2707 HD

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Mecânica dos Sólidos.

Aprovado em: 20 de julho de 2012.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Marília Garcia Diniz (Orientadora)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. José Brant de Campos
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Marcos Henrique de Pinho Maurício
Departamento de Engenharia de Materiais - PUC Rio

Prof. Dr. Valter Rocha dos Santos
Departamento de Engenharia de Materiais - PUC Rio

Rio de Janeiro

2012

DEDICATÓRIA

Ao meu Deus e a minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida concedida, pela oportunidade de adquirir conhecimento e força para superar as minhas limitações.

Aos meus pais, Milton e Wilma, por terem me oferecido condições de estudar e pelo exemplo de que com esforço podemos transpor as dificuldades.

À minha orientadora, Professora Marília Garcia Diniz, pelos ensinamentos, pela dedicação e contribuição à minha formação.

Ao Professor André Rocha Pimenta do IFRJ – Instituto Federal do Rio de Janeiro, pelo apoio e suporte técnico.

A todos os meus familiares pelo estímulo, de forma especial, ao meu tio Wellington Barbosa Lima, em memória.

À FAPERJ pelo apoio.

RESUMO

DIAS, Débora Francielle. *Caracterização de juntas soldadas por TIG autógeno manual com arco pulsado e arco não pulsado do aço inoxidável hiperduplex SAF 2707 HD*. 2012. 192f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

O aço inoxidável hiperduplex, SAF 2707 HD, foi desenvolvido com o intuito de se obter novas ligas com maior resistência à corrosão do que a disponível nos aços inoxidáveis duplex / superduplex. Além da melhorada resistência à corrosão, este também oferece propriedades mecânicas superiores. Os aços hiperduplex são aços de última geração que possuem elevados teores de elementos de liga, principalmente cromo, molibdênio e nitrogênio. Este tipo de aço caracteriza-se por apresentar estrutura bifásica, constituída de proporções praticamente iguais de ferrita e austenita devido à distribuição controlada dos elementos alfa-gênicos e gama-gênicos. O interesse por esses aços cresce gradativamente com a necessidade de novos materiais para diversas aplicações na indústria petrolífera. Porém, quando expostos e mantidos a temperaturas elevadas, na faixa entre 600°C e 1000°C, algumas fases intermetálicas podem se formar, em que a fase sigma (σ) é a mais proeminente. Possui uma estrutura cristalina tetragonal complexa rica em Cr e Mo, tendo efeito deletério no material afetando tanto a resistência à corrosão, quanto as propriedades mecânicas. Para este fim, faz-se necessário estudos da junta soldada para delinear as limitações desses aços e aperfeiçoar a aplicação. Essa pesquisa teve como objetivo caracterizar a junta soldada por TIG autógeno manual com arco pulsado e não pulsado do aço inoxidável hiperduplex SAF 2707 HD. As técnicas empregadas foram a metalografia por ataque eletrolítico (reagente NaOH) e *color etching* (reagente Behara), medidas de microdureza e quantificação microestrutural por Processamento Digital de Imagem. Os aspectos microestruturais foram observados por microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), estes passaram por etapas de processamento digital de imagens (PDI) para quantificar a fração volumétrica da fase austenita. Realizou-se análise química semi-quantitativa por EDS. Os resultados foram analisados estatisticamente através do teste de hipóteses com distribuição t de Student. Pela técnica *color etching* observou-se que a fase austenita foi gerada com distribuição mais homogênea para o arco pulsado, que o não pulsado. O ataque eletrolítico não revelou uma terceira fase (fase σ) na junta soldada, a análise química por EDS não identificou uma variação significativa nos elementos presentes ao longo da zona de transição do metal de base para a zona de fusão. Através do PDI foram obtidos os valores médios da fração volumétrica de austenita de 36,38% (desvio padrão 6,40%) e 32,41% (desvio padrão 6,67%) para os dois métodos, pulsado e não pulsado, respectivamente. Foram obtidos os valores de microdureza para o metal de base 355,10 HV (desvio padrão 28,60) e para a zona de fusão 343,60 HV (desvio padrão 20,51) da amostra soldada pelo modo pulsado, para o modo não pulsado foram apresentaram os valores médios de 370,30 HV (desvio padrão 34,51) para o metal de base e de 345,20 HV (desvio padrão 41,33) para a zona de fusão. A análise estatística indicou que não houve variação significativa da fração volumétrica da fase

austenita no cordão de solda para as duas condições testadas e não houve variação da microdureza entre a zona de fusão e o metal de solda das amostras submetidas aos dois processos.

Palavras-chaves: Hiperduplex; Fase Sigma; Caracterização microestrutural; Junta soldada.

ABSTRACT

DIAS, Débora Francielle. *Characterization of autogenous TIG welded joint by manual arc pulsed and non-pulsed hiperduplex stainless steel SAF 2707 HD*. 2012. 192f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Hiperduplex stainless steel, SAF 2707 HD, was developed due to the need of new alloys with greater corrosion resistance than that available in duplex / superduplex stainless steels. In addition to improved corrosion resistance, SAF 2707 HD also offers superior mechanical properties. Hiperduplex is a state-of-the-art steel that contains high levels of alloying elements, especially chromium, molybdenum and nitrogen. This type of steel is characterized by having a biphasic structure, comprising substantially equal proportions of ferrite and austenite due to the controlled distribution of the ferrigenic and gamma-genic elements. The interest in this type of steel increases gradually with the need of new materials for a variety of applications in the oil industry. However, when exposed to elevated temperatures and maintained between 600 °C and 1000 °C, some intermetallic phases can appear, principally consisting of the sigma phase (σ). The Sigma phase has a complex tetragonal structure rich of Cr and Mo, having a deleterious effect on the material affecting both the corrosion resistance and mechanical properties. Due to this, it is necessary to study welded joint of these materials to delineate the limits of these steels and improving their application. This study aimed to characterize the autogenous TIG welded joint by manual arc pulsed and non-pulsed hiperduplex stainless steel SAF 2707 HD. The techniques employed were metallography by electrolytic attack (NaOH reagent) and color etching (Behara reagent), micro-hardness measurements and microstructural quantification by Digital Image Processing. The microstructural aspects were observed by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM), and they have gone through stages of digital image processing (DIP) to quantify the percent of austenite phase. The chemical composition was verified by EDS. The results were analyzed statistically by testing hypotheses with Student's t distribution. The color etching technique made it evident that the austenite phase had a more homogeneous distribution for pulsed arc, than it did for non-pulsed. The electrolyte attack did not show a sigma phase (σ) in the welded joint and the chemical composition verified by the EDS did not identified a significant change in these elements along the transition zone of the base metal to the fusion zone. Through the DIP the average percentages obtained for austenite were 36.38% (standard deviation 6.40%) for the pulsed method and 32.41% (standard deviation 6.67%) for the non-pulsed method. The Pulse method produced mean hardness values of HV 355.10 (SD = 28.60) for the base metal and HV 343.60 (standard deviation 20.51) for the fusion zone whereas, the non-pulsed method these values were HV 370.30 (standard deviation 34.51) for the base metal and HV 345.20 (standard deviation 41.33) for the fusion zone. Statistical analysis showed no significant variation in the percent of austenite phase in the welded joint for two tested conditions and no variation in hardness between the fusion zone and weld metal for samples tested by the two processes.

Keywords: Hiperduplex; Sigma phase; Microstructure characterization; Welded joint.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Plataforma Offshore fixa	35
Figura 02 - Foto da plataforma de petróleo	35
Figura 03 - Estrutura lamelar do aço inoxidável duplex tipo UNS 31803 na direção da laminação. Fase escura ferrita e fase clara austenita.....	45
Figura 04 - Gráfico do limite de escoamento $R_{p0,2}$ do SAF 2707 HD	48
Figura 05 - Gráfico do limite de resistência à tração R_m do SAF 2707 HD.....	48
Figura 06 - Curva de energia de impacto para o SAF 2707 HD usando amostras padrão para ensaio charpy V (10 x 10 mm)	49
Figura 07 - Representação esquemática de extração de petróleo, no detalhe os tubos umbilicais que utilizam aço do tipo hiperduplex.....	50
Figura 08 - Representação esquemática da seção transversal do “ <i>subsea umbilical</i> ”	51
Figura 09 - Microestrutura do Sandvik SAF 3207 HD. Fase branca: austenita e fase cinza: ferrita. (a) Direção longitudinal e (b) direção transversal.....	52
Figura 10 - Microestrutura do SAF 3207 HD. Amostra obtida do tubo umbilical. Grãos coloridos (3,6 μ m): austenita e grãos cinza (5,1 μ m): ferrita.....	53
Figura 11 - Diagrama esquemático Tempo – Temperatura – Transformação (TTT) tipo C, mostrando as possíveis transformações de fases em aços inoxidáveis duplex	54
Figura 12 - Diagrama binário ferro – cromo de equilíbrio de fases.....	54
Figura 13 - Representação da estrutura cristalina tetragonal complexa da fase σ que possui 30 átomos por célula unitária	58
Figura 14 - Diagrama TTT após tratamento de solubilização (curva \blacklozenge) e após 20% de redução de espessura (todas as outras curvas). r_s = início da recristalização; t_s = início da transformação eutetóide ($\alpha \rightarrow \sigma + \gamma_2$) da ferrita em sigma mais austenita.....	60
Figura 15 - Microestrutura da liga AV2205 solubilizada e recozida a 1050°C por 30 minutos. Aumento de 811X	61
Figura 16 - Microestrutura da liga AV2205 após tratamento térmico a 850°C por 1h. Fase sigma: branca, austenita: fase contínua cinza, ferrita: fase dispersa cinza. Aumento 811X.....	62

Figura 17 - Corrosão localizada na liga 3RE60 no estado recozido e solubilizado após “ <i>cyclic potentiodynamic polarization test</i> ”. MEV - SE - secondary electrons image. 3000X	63
Figura 18 - Corrosão localizada (pontos mais escuros) na fase austenítica (região clara) da liga 3RE605 no estado solubilizado e recozido após “ <i>cyclic potentiodynamic polarization test</i> ”. MEV - SE - secondary electrons image. 3000X	63
Figura 19 - Resistência ao impacto obtido por teste de Charpy-V pelos procedimentos de soldagem TIG e SAW. Gás de proteção TIG: Ar + 2%N ₂ . Fluxo SAW: 15W (básico)	68
Figura 20 - Microestrutura da junta soldada pelo método TIG obtida de uma amostra tubo com 25,4mm de diâmetro e 1,65mm de espessura. 150x	70
Figura 21 - Microestrutura da interface da ZTA e zona de fusão obtida pelo método TIG de uma amostra tubo com 25,4mm de diâmetro e 1,65mm de espessura. 150x	70
Figura 22 - Microestrutura da junta soldada obtida pelo método TIG de uma amostra tubo com 168mm de diâmetro e 7,1mm de espessura. 150x..	71
Figura 23 - . Microestrutura da ZTA e da zona de fusão obtida pelo método TIG de uma amostra tubo com 168 mm de diâmetro e 7,1mm de espessura. 150x.....	72
Figura 24 - Aspectos micrográficos do aço inoxidável duplex UNS S31803 no estado como-recebido. a) DL b) transversal à DL e c) normal à DL. Ataque Behara modificado. 200x	77
Figura 25 - Difratograma do aço inoxidável duplex UNS S31803 no estado como-recebido	78
Figura 26 - Gráfico da fração volumétrica de ferrita em função da energia de soldagem para o aço duplex UNS S31803	79
Figura 27 - Micrografias mostrando a extensão da ZACTE para a) 1,2kJ/mm e b) 1,8kJ/mm. Ataque Behara modificado, aumento 100X	82
Figura 28 - Diagrama de Schaeffler do metal de solda dos aços inoxidáveis	83
Figura 29 - Aspecto microestrutural do SAF 2205 como recebido	85
Figura 30 - Aspectos macrográficos da seção transversal do cordão de solda de quatro amostras: (a) corrente direta e temperatura de 25°C da	

chapa, razão lagura/profundidade = 1/0,238; (b) corrente direta pulsada e temperatura de 25°C da chapa, razão lagura/profundidade = 1/0,252; (c) corrente direta e temperatura de 7°C da chapa, razão lagura/profundidade = 1/0,275; (d) corrente direta pulsada e temperatura de 7°C da chapa, razão lagura/profundidade = 1/0,244.....	86
Figura 31 - Microestrutura da zona de fusão com alta ampliação para condição de soldagem (a) corrente direta, chapa a 25°C e (b) corrente direta pulsada, chapa a 25°C.....	88
Figura 32 - Histórico das curvas térmicas das quatro diferentes condições de soldagem testadas	89
Figura 33 - Perfil de microdureza da seção transversal ao cordão de solda das amostras soldadas nas condições (a) 1 e 2 (b) 2 e 3 (c) 3 e 4 (d) todas. (BM = metal de base; HAZ = zona afetada termicamente; FZ = zona de fusão).....	90
Figura 34 - Microestrutura da zona de fusão com alta ampliação para condição de soldagem (a) corrente direta, chapa a 7°C e (b) corrente direta pulsada, chapa a 7°C.....	92
Figura 35 - Convenção de eixos usada para representação da imagem digital.....	95
Figura 36 - Representação de uma imagem. a) imagem em duas dimensões; b) imagem representada na forma de matriz; c) imagem em 3 dimensões.....	95
Figura 37 - Unidade (pixels) compondo uma imagem na forma digital	96
Figura 38 - Esquema de aplicação de filtros	97
Figura 39 - Uma imagem e seu histograma. (a) Micrografia óptica. (b) Histograma de intensidade. Tradução nossa: <i>Number of Pixels</i> = Número de Pixels; <i>Pixel Intensity</i> = Intensidade do Pixel. Note a distribuição do gráfico, indicando baixo contraste da imagem.	99
Figura 40 - Aquisição com contraste realçado. (a) A mesma amostra da Figura. 3.4 capturada com maior contraste . (b) A distribuição de intensidades foi mais “espalhada” no histograma, ocupando uma faixa maior de intensidades. Tradução nossa: <i>Number of Pixels</i> = Número de Pixels; <i>Pixel Intensity</i> = Intensidade do Pixel.....	100
Figura 41 - (a) Imagem com 20% de ruído; (b) A mesma imagem após a aplicação do <i>filtro mediana</i>	101

Figura 42 - uso da adição para melhorar a razão sinal/ruído. (a) Imagem de material compósito obtida no MEV (b) O efeito da adição de 16 imagens diferentes na mesma posição.....	101
Figura 43 - Subtração (a) Imagem com iluminação irregular (b) Fundo estimado (c) Imagem com fundo subtraído.....	103
Figura 44 - Imagem composta por objetos brilhantes num fundo preto. As intensidades dos <i>pixels</i> da região quadrada indicada com a seta são mostradas na planilha da Figura 45	104
Figura 45 - As intensidades dos <i>pixels</i> da área selecionada na região quadrada da imagem da Figura 44 estão apresentadas como uma matriz.....	105
Figura 46 - Seleção e aplicação do <i>threshold</i> (a) O histograma da imagem da Figura 3.9 com o nível de <i>threshold</i> (T) selecionado. Tradução nossa: “ <i>Number of pixels</i> ” = número de pixels; “ <i>Pixel intensity</i> ” = intensidade do pixel. (b) A segmentação obtida com o nível de <i>threshold</i> selecionado na Figura (a).....	106
Figura 47 - Diferença entre conectividade (ou vizinhança) 4 e 8.....	108
Figura 48 - a) Microestrutura do aço UNS S32760, ataque Behara, 100x b) Imagem da Figura 48 (a) após conversão para tons de cinza c) Histograma da Figura 48 (b).....	109
Figura 49 - a) Imagem da Figura 48 (b) após aplicação de <i>Pseudo Colors</i> . b) Imagem da Figura 48 (b) após correção de iluminação. c) Imagem da Figura 49 (b) após segmentação.....	110
Figura 50 - - a) Aspecto microestrutural da liga à base de níquel-cromo utilizada para fabricação de dispositivos odontológicos, com aumento de 100x, Microscópio eletrônico de varredura (MEV), modo electrons retroespalhados (Backscattered secondary electrons – BSE), Grupo F. b) Grupo TT.....	111
Figura 51 - Imagem exemplo para uso do ImLab no processamento digital	112
Figura 52 - Imagem da Figura 51 após o comando <i>Crop</i> do ImLab	113
Figura 53 - Imagem da Figura 3.17 após o <i>Pseudo Colors Hues</i>	113
Figura 54 - Histograma da imagem da Figura 52.....	114
Figura 55 - - a) Imagem 3.19 após o filtro Circular Mean ser usada três vezes. b) Histograma da imagem da Figura 3.20 (a).....	114
Figura 56 - Imagem da Figura 55 (a), após segmentação no tom 70.....	115

Figura 57 - Pequenas regiões pretas que não são eram de interesse e que foram inseridas por equívoco durante a segmentação.....	116
Figura 58 - Imagem exemplo onde se fez necessário a utilização do comando <i>Fill Holes</i>	116
Figura 59 - Imagem da Figura 55 (a) após segmentação no “ponto de mínimo” do histograma.....	117
Figura 60 - Ilustração da importância do comando <i>Close</i> e o resultado obtido.....	118
Figura 61 - Imagem quase original somada à imagem após todo o processamento.....	118
Figura 62 - Corpo de prova pronto para ser submetido ao processo de soldagem TIG autógeno manual.....	122
Figura 63 - Amostra fixada no torno de bancada pronta para soldagem.....	123
Figura 64 - Amostras após as etapas de embutimento, lixamento e polimento	124
Figura 65 - A imagem ilustra o sistema utilizado no ataque químico eletrolítico das amostras soldadas	126
Figura 66 - Microscópio Stereo Olympus SZ 61.....	127
Figura 67 - Equipamento (microscopia óptica) recentemente instalado no Laboratório de Microscopia da Engenharia Mecânica da UERJ através do fomento recebido pelo Edital 05/2007 PROGRAMA “APOIO ÀS UNIVERSIDADES ESTADUAIS DO RIO DE JANEIRO – UERJ, UENF E UEZO” no ano de 2008.....	128
Figura 68 - Microscópio Eletrônico de Varredura HITACHI TM 3000 utilizado neste trabalho.....	129
Figura 69 - Esquema utilizado para região de obtenção de perfil de microdureza para as juntas soldadas arco pulsado e arco não pulsado.....	131
Figura 70 - Macrografia da junta soldada arco pulsado. Ampliação 30X; Ataque: Behara.....	132
Figura 71 - Macrografia da junta soldada arco não pulsado. Ampliação 30X; Ataque:Behara	133
Figura 72 - Zona de transição do Metal de Base para a Zona de Fusão. Arco não pulsado. Aumento 100X, Ataque Behara	135
Figura 73 - Zona de transição do Metal de Base para a Zona de Fusão. Arco pulsado. Aumento 100X, Ataque Behara	135
Figura 74 - Zona de Fusão. Arco não pulsado. Aumento 100X, Ataque Behara.....	136

Figura 75 - Zona de Fusão. Arco não pulsado. Aumento 500X, Ataque Behara.....	137
Figura 76 - Zona de Fusão. Arco não pulsado. Aumento 1000X, Ataque Behara...	137
Figura 77 - Zona de Fusão. Arco pulsado. Aumento 100X, Ataque Behara.....	138
Figura 78 - Zona de Fusão. Arco pulsado. Aumento 500X, Ataque Behara.....	138
Figura 79 - Zona de Fusão. Arco pulsado. Aumento 1000X, Ataque Behara.....	139
Figura 80 - Zona de transição do Metal de Base para a Zona de Fusão. Arco pulsado. Aumento 100X, Ataque Eletrolítico (NaOH).....	140
Figura 81 - Zona de Fusão. Arco pulsado. Aumento 1000X, Ataque Eletrolítico (NaOH).....	141
Figura 82 - Zona de transição do Metal de Base para a Zona de Fusão. Arco não pulsado. Aumento 100X, Ataque Eletrolítico (NaOH).....	141
Figura 83 - Zona de Fusão. Arco não pulsado. Aumento 1000X, Ataque Eletrolítico (NaOH)	142
Figura 84 - Imagem (d) – Imagem em tons de cinza obtida com ataque eletrolítico usando NaOH (10 gramas para 100 ml de água destilada). Austenita mais clara, ferrita em cinza mais escuro e fase sigma como pontos pretos nos contornos de grãos.....	143
Figura 85 - Aspecto microestrutural revelado por ataque eletrolítico com KOH (a) ferrita, α , em tons de azul e austenita, γ , em tons mais claros (b) fase σ , nas cores marrom / preto, que apareceu após 10h de tratamento térmico a 850°C.....	145
Figura 86 - Zona de transição do Metal de Base para a Zona de Fusão. Arco não pulsado. A linha amarela indica a região cujo resultado de análise química de elementos presentes é apresentada na Figura 88.....	148
Figura 87 - Imagem da Figura 86 após realce de contraste, tornando clara a distinção entre a Zona de Fusão do Metal de Base	148
Figura 88 - Resultado do EDS realizado pela técnica de <i>line scan</i> da região indicada na Figura 86.....	149
Figura 89 - Zona de transição do Metal de Base para a Zona de Fusão. Arco pulsado. A linha amarela indica a região cujo resultado de análise química de elementos presentes é apresentada na Figura 92.....	149
Figura 90 - Imagem da Figura 89 após realce de contraste, tornando clara a distinção entre a Zona de Fusão do Metal de Base	150

Figura 91 - Resultado do EDS realizado pela técnica de <i>line scan</i> da região indicada na Figura 89.....	150
Figura 92 - Aspecto micrográfico da zona de fusão da amostra por arco não pulsado. MEV (modo SE) da superfície previamente atacada quimicamente para análise por técnica de metalografia colorida (“color etching”), aumento 1000X.....	152
Figura 93 - Aspecto micrográfico da zona de fusão da amostra por arco não pulsado. MEV (modo BSE) de superfície previamente atacada quimicamente para análise por técnica de metalografia colorida (“color etching”), aumento 1000X.....	152
Figura 94 - Aspecto micrográfico da zona de fusão da amostra por arco não pulsado. MEV (modo SE - direita) x MEV (modo BSE - esquerda) da superfície previamente atacada quimicamente por metalografia colorida (“color etching”), ambas aumento 1000X.....	153
Figura 95 - Aspecto micrográfico da zona de fusão da amostra por arco não pulsado. MEV (modo SE) da superfície previamente atacada (“color etching”), 1000X.....	154
Figura 96 - Aspecto micrográfico da zona de fusão da amostra por arco pulsado. MEV (modo SE) da superfície previamente atacada (“color etching”), aumento 500X.....	155
Figura 97 - Aspecto micrográfico da zona de fusão da amostra por arco pulsado. MEV (modo SE) da superfície previamente atacada (“color etching”), aumento 1000X.....	155
Figura 98 - Imagem da ZF com aumento 500x antes do comando <i>crop</i> . Amostra TIG manual arco não pulsado, ataque BEHARA.....	156
Figura 99 - Imagem da microestrutura, Figura 98, com aumento 500x depois do comando <i>crop</i> . Amostra TIG manual arco não pulsado, ataque BEHARA.....	157
Figura 100 - Imagem da microestrutura com aumento 500x após a conversão para tons de cinza da imagem da Figura 99	158
Figura 101 - Imagem com aumento 1000x obtida na ZF para amostra solda TIG solda manual arco pulsado exemplificando a presença de “ruídos” na fase objeto de interesse para a segmentação (austenita).....	159

Figura 102 - Imagem obtida após aplicação do filtro “passa baixa” <i>circular mean</i> sobre a imagem da Figura 101.....	159
Figura 103 - Imagem que mostra o resultado da segmentação realizada sobre a imagem da Figura 101 sem a eliminação dos ruídos na fase austenita.....	160
Figura 104 - Imagem obtida após a segmentação da fase mais clara (austenita) na imagem da Figura 102, onde a eliminação dos ruídos na fase austenita foi alcançada com aplicação do Kernel com operações matemáticas específicas “passa-baixa”.	160
Figura 105 - Histograma da imagem da Figura 101. A seta indica o tom utilizado para a segmentação.....	161
Figura 106 - Histograma da imagem da Figura 102. A seta indica o tom utilizado para a segmentação.....	161
Figura 107 - Imagem da microestrutura obtida após o comando de eliminação de objetos pequenos aplicado sobre a imagem da Figura 104. Pequenos objetos claros foram eliminados do <i>background</i> (fase ferrita).....	162
Figura 108 - Imagem da microestrutura após aplicação do comando de preenchimento de furos sobre a imagem da Figura 107	162
Figura 109 - Perfil de microdureza HV na superfície de soldagem pelo modo pulsado.....	165
Figura 110 - Perfil de microdureza HV na superfície de soldagem pelo modo não pulsado.....	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Principais elementos de liga (aço→ferro) e suas solubilidades máximas nas fases ferrita e austenita. As concentrações são dadas em % peso	39
Tabela 02 - Composição química nominal dos dois aços inoxidáveis duplex de alta liga, %peso.....	47
Tabela 03 - Composição química nominal de dois tipos de aço inoxidável duplex ...	52
Tabela 04 - Composição química nominal do SAF 2707 HD, Filler 27.9.5.L.....	66
Tabela 05 - Medida dos conteúdos de ferrita na junta soldada do SAF2707 HD mediante análise linear	67
Tabela 06 - Análise química (% em peso) e os “ <i>alloying vectors</i> ” do cordão de solda produzido pelo processo de soldagem SAW usando fluxo básico de tipo 15W	67
Tabela 07 - Resultados dos ensaios de tração para as juntas soldadas por TIG e SAW	68
Tabela 08 - Temperatura crítica de <i>pitting</i> do cordão de solda	69
Tabela 09 - Frações volumétricas de ferrita quantificadas na ZF com soldagem TIG circunferencial no tubo com 25,4mm de diâmetro e 1,65mm de espessura.....	71
Tabela 10 - Frações volumétricas de ferrita quantificadas na ZF da amostra com soldagem circunferencial no tubo com 168 mm de diâmetro e 7,1mm de espessura.....	72
Tabela 11 - Resultados da determinação do CPT em tubos com soldagem circunferencial, 168 mm de diâmetro e 7,1mm de espessura	73
Tabela 12 - Composição Química para 2205 e para o UNS S31803 (Percentagens em peso)	74
Tabela 13 - Fração volumétrica da fase ferrita do material como-recebido obtida por análise de imagens	78
Tabela 14 - Composição química do aço inoxidável duplex UNS S31803 e do eletrodo AWS 2209-17	80
Tabela 15 - Condições de soldagem, percentual de fração volumétrica da γ e taxa de arrefecimento	87

Tabela 16 - Fração volumétrica obtida para cada uma das regiões da microestrutura antes (F) e após o tratamento térmico (TT).....	119
Tabela 17 - Composição química do aço UNS S32707	121
Tabela 18 - Parâmetros de soldagem	123
Tabela 19 - Comparação dos resultados realizados com os obtidos por Wang, et. al., 2006	133
Tabela 20 - Fração volumétrica obtida para cada imagem analisada	163

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	amperes
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Alloy Casting Institute
AISI	American Iron and Steel Institute
AOD	argon-oxygen descarburization
VOD	vacuum oxygen descarburization
Ar	argônio
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
C	carbono
CCC	cúbica de corpo centrado
CCW	constant current welding
CFC	cúbica de face centrada
Cl	cloro
Co	cobalto
CO ₂	gás carbônico
comp.	comprimento
CPT	critical pitting temperature
Cr	cromo
Cr ₂₃ C ₆	carboneto de cromo do tipo Cr ₂₃ C ₆
Cr ₂ N	nitreto de cromo do tipo Cr ₂ N
Cr ₇ C ₃	carboneto de cromo do tipo Cr ₇ C ₃
Cr _{eq}	cromo equivalente
CrN	nitreto de cromo do tipo CrN
Cu	cobre
dc	direct current
DL	direção de laminação
EBSD	electron back-scattered diffraction
EDS	energy dispersive spectroscopy
Fe	ferro
g	gramas

GBA	grain boundaries austenite
GTAW	gas tungsten arc welding
H	hidrogênio
h	horas
H ₂ S	ácido sulfúrico
HAZ	heat affected zone
HCl	ácido clorídrico
HRC	hardness Rockwell C
HV	hardness Vickers
Hz	hertz
J	Joule
K ₂ S ₂ O ₅	metabissulfito de potássio
kJ	kilo Joule
L	litros
larg.	largura
max	máximo
MB	metal de base
MEV	microscópio eletrônico de varredura
min	minutos
mL	mililitros
Mm	milímetros
Mn	manganês
Mo	molibdênio
MPa	mega Pascal
MS	metal de solda
N	Newton
N	nitrogênio
NaOH	hidróxido de sódio
Nb	nióbio
Ni	níquel
Ni _{eq}	níquel equivalente
Ø	diâmetro
°C	graus Celsius
P	fósforo

PCW	pulsed current welding
PDI	processamento digital de imagem
ppm	partículas por milhão
PREn	pitting resistance equivalent number
RGB	red, green, blue
R_m	limite de resistência a tração
R_p	limite de escoamento
$R_{p0,2}$	limite de escoamento a 0,2 de deformação
rpm	rotações por minuto
s	segundos
S	enxofre
SAW	submerged arc welding
SE	elétrons secundários
Si	silício
SNR	razão sinal/ruído
T	temperatura
Ti	titânio
TIG	tungsten Inert Gas
TTT	transformação tempo temperatura
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UNS	unified numbering system for metals and alloys
V	volts
VOD	vacuum oxygen decarburization
Vol.	volume
W	tungstênio
X	vezes (aumento em microscopia)
ZAC	zona afetada pelo calor
ZACTB	zona afetada pelo calor de temperatura baixa
ZACTE	zona afetada pelo calor de temperatura elevada
ZF	zona de fusão
ZTA	zona Termicamente Afetada
α	fase ferrita
θ	teta
χ	fase chi

γ	fase austenita
γ_2	fase austenita secundária
$\dot{\gamma}_2$ (IGA)	intra-granular austenite
$\dot{\gamma}_2$ (W)	austenita Widmanstätten
σ	fase sigma
τ	fase tal
%	percentual
>	maior
\pm	mais ou menos
\leq	menor ou igual
$^{\circ}\text{F}$	Fahrenheit
μm	mícron

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	24
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
1.1	Histórico	27
1.1.1	<u>Aços Inoxidáveis: generalidades</u>	36
1.1.2	<u>Aços Inoxidáveis Austeníticos</u>	39
1.1.3	<u>Aços Inoxidáveis Ferríticos</u>	41
1.1.4	<u>Aços Inoxidáveis de Estrutura Duplex Austenítico-Ferríticos</u>	42
1.1.4.1	Os aços Inoxidáveis Hiperduplex.....	46
1.1.5	<u>Equilíbrio das Fases</u>	53
1.1.6	<u>Precipitação de Fase Sigma (σ)</u>	55
1.1.7	<u>Formação da Austenita Secundária</u>	64
1.2	Efeitos dos Processos de Soldagem nos Aços de Estrutura Duplex ..	65
1.3	Técnicas de Processamento Digital de Imagem (PDI)	93
1.3.1	<u>Representação Digital de Imagens</u>	94
1.3.2	<u>Aplicação de Filtro</u>	96
1.3.3	<u>Principais Etapas da Análise Digital de Imagens</u>	97
1.3.4	<u>Aquisição da Imagem</u>	98
1.3.5	<u>Pré-processamento</u>	98
1.3.5.1	Histograma de níveis de cinza.....	98
1.3.5.2	Redução de Ruído.....	100
1.3.5.3	Pseudo Coloração (<i>Lookup Table</i>)	102
1.3.5.4	Correção de Iluminação Irregular	102
1.3.6	<u>Segmentação da Imagem</u>	103
1.3.7	Pós-processamento.....	106
1.3.8	Medições	106
1.3.9	PDI para caracterização microestrutural.....	108
2	MATERIAIS E MÉTODOS	121
2.1	Material: Aço inoxidável UNS S32707	121
2.2	Soldagem	122
2.3	Preparação Metalográfica	124
2.4	Análise Macroscópica	126

2.5	Microscopia	127
2.5.1	<u>Microscopia Óptica</u>	127
2.5.2	<u>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</u>	128
2.6	Processamento Digital de Imagens	129
2.7	Ensaio de Microdureza	130
2.8	Análise Estatística dos Resultados	131
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	132
3.1	Macrografia	132
3.2	Aspectos Micrográficos	134
3.3	Ataque Eletrolítico	140
3.4	Análise química semi-quantitativa	147
3.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	151
3.6	Processamento Digital de Imagem (PDI)	156
3.6.1	<u>Análise Estatística</u>	164
3.7	Microdureza Vickers (HV – Hardness Vickers)	165
3.7.1	<u>Análise Estatística</u>	167
4	CONCLUSÃO	169
	REFERÊNCIAS	170
	ANEXO I - ASTM A 923-08	171