

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 03/01/2019.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

Robert de Souza Bonuti

Efeito da adição de níquel e nitrogênio na microestrutura e propriedades mecânicas de juntas de aço superduplex UNS S32750 soldadas com Laser Pulsado Nd:YAG

Ilha Solteira

2018



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

Robert de Souza Bonuti

Efeito da adição de níquel e nitrogênio na microestrutura e propriedades mecânicas de juntas de aço superduplex UNS S32750 soldadas com Laser Pulsado Nd:YAG

Estudo apresentado como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (PPGEM-FEIS-UNESP). Área de Conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação.

Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella
Orientador

Ilha Solteira

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B722e Bonuti, Robert de Souza.
Efeito da adição de níquel e nitrogênio na microestrutura e propriedades mecânicas de juntas de aço superduplex UNS S32750 soldadas com laser pulsado Nd:YAG / Robert de Souza Bonuti. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
91 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2018

Orientador: Vicente Afonso Ventrella
Inclui bibliografia

1. Gamagênico. 2. Soldagem autógena. 3. Inconel. 4. Hastelloy.
5. Soldagem laser. 6. Uns S32750.



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Efeito da adição de níquel e nitrogênio na microestrutura e propriedades mecânicas de juntas de aço superduplex UNS S32750 soldadas com Laser Pulsado Nd:YAG.

AUTOR: ROBERT DE SOUZA BONUTI

ORIENTADOR: VICENTE AFONSO VENTRELLA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. VICENTE AFONSO VENTRELLA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RUI CAMARGO TOKIMATSU

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA

Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de Rio Verde

Ilha Solteira, 03 de julho de 2018

DEDICO,

A minha esposa Rosa Márcia, por sempre estar presente ao meu lado, mesmo nos momentos mais difíceis, sabendo me aconselhar, incentivar e apoiar, e entendendo que tudo o que faço é por ela.

A meus filhos Maria Bárbara e Pedro Antônio, que desde o começo sempre torceram por mim, além de entenderem todas as minhas ausências, pois também sabem que tudo o que faço é por eles.

A meus pais Antônio e Maria, pelo dom da vida, e apoio desde os primeiros momentos nas fases iniciais de minha vida escolar.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, pelo dom da graça, da saúde e da força, pois sem Ele nada disso seria possível.

Ao Prof.^o Dr. Vicente Ventrella, pela ajuda, pelo apoio e pela oportunidade de tê-lo como orientador.

A UNIRV, na pessoa do Prof.^o Dr. Warley Augusto Pereira, pelo convite feito a época para que eu pudesse participar das aulas no Minter.

A UNESP, através da Faculdade de Engenharia Mecânica de Ilha Solteira, pela oferta do Programa de Pós-Graduação, e pela oportunidade de estudar em uma Universidade com grande reconhecimento.

Ao SENAI, Departamento Regional de Goiás, pela ajuda desde o início do meu curso.

“Em tudo o que se vai fazer na vida, o mais importante, é ter pessoas ao seu lado.”

Marcos Pontes

RESUMO

O presente trabalho consistiu em uma análise da influência da adição de elementos gamagênicos, estabilizadores da austenita, no processo de união autógena do aço superduplex UNS S32750, soldados com Laser Pulsado Nd:YAG. Os corpos de prova foram soldados utilizando duas técnicas: introdução de nitrogênio gasoso na atmosfera protetora, e adição de uma liga de níquel (Inconel 625 e Hastelloy C-276) na junta a ser soldada, tendo-se como objetivo a avaliação das propriedades mecânicas e microestruturais da junta soldada, como microdureza e tração. Todos os dados foram obtidos nos laboratórios da área de Materiais e Processos de Fabricação e no Laboratório de Soldagem da UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus de Ilha Solteira, SP. O processo de soldagem foi realizado com a máquina de solda a laser UW 150A. Para a revelação dos detalhes dos cordões de solda foi utilizado o reagente Behara modificado. As medidas geométricas dos cordões de solda, como largura e profundidade, foram realizadas no microscópio Estéreo Zeiss Discovery V8. O MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) foi utilizado para a obtenção dos detalhes microscópicos dos cordões de solda. Os ensaios de tração foram realizados na Máquina Universal de Ensaio, e os valores de microdureza Vickers foram obtidos com o apoio do ultramicrodurômetro digital Shimadzu, modelo DUH 211S. Os resultados da microdureza Vickers, e dos ensaios de tração, nos corpos de prova obtidos com o uso dos gases de proteção Argônio e Nitrogênio, durante o processo de soldagem autógena, demonstraram semelhança de valores. Fato este que comprovou que o uso do gás inerte (Argônio) e do gás ativo (Nitrogênio), causou baixa influência na constituição do metal de solda. O uso das ligas Inconel 625, e Hastelloy C276, que mesmo tendo alto teor de Níquel, não contribuíram significativamente para elevar os valores de microdureza e de resistência mecânica no metal de solda, se comparados às do metal base.

Palavras-chave: Gamagênico. Soldagem autógena. Inconel. Hastelloy. Soldagem laser. UNS S32750.

ABSTRACT

The present work consisted in an analysis of the influence of the addition of gamma - genic elements, stabilizers of austenite, in the process of autogenous union of the superduplex steel UNS S32750, welded with Nd: YAG Pulsed Laser. The specimens were welded using two techniques: introduction of gaseous nitrogen into the protective atmosphere and addition of a nickel alloy (Inconel 625 and Hastelloy C-276) in the joint to be welded, with the objective of evaluating the mechanical properties and microstructural weld joints, such as microhardness and tensile strength. All data were obtained from laboratories in the area of Materials and Processes of Manufacture and at the Welding Laboratory of UNESP - Paulista State University Júlio de Mesquita Filho, Campus de Ilha Solteira, SP. The welding process was performed with the UW 150A laser welding machine. For the development of details of the weld beads, the modified Behara reagent was used. The geometric measurements of the weld beads, such as width and depth, were performed on the Zeiss Discovery V8 Stereo Microscope. SEM (Scanning Electron Microscope) was used to obtain the microscopic details of the weld beads. The tensile tests were performed in the Universal Testing Machine, and the Vickers microhardness values were obtained with the support of the Shimadzu digital ultramicrodurometer, model DUH 211S. The results of the Vickers microhardness and the tensile tests on the specimens obtained with the protection gases Argon and Nitrogen during the autogenous welding process showed similar values. This fact proved that the use of the inert gas (Argon) and the active gas (Nitrogen), caused little influence on the constitution of the weld metal. The use of the Inconel 625 and Hastelloy C276 alloys, which although having a high Nickel content, did not contribute significantly to increase the microhardness and mechanical strength values in the weld metal compared to those of the base metal.

Keywords: Gamagênico. Autogenous welding. Inconel. Hastelloy. Laser welding. UNS S32750.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Produção brasileira de aço inoxidável.....	21
Figura 2	- Produção mundial de aço Inoxidável.....	21
Figura 3	- Formação da camada passiva de óxido de cromo.....	22
Figura 4	- Representação da microestrutura da ferrita (Aço inoxidável AISI 409 recozido por 1 hora a 870° C e resfriado ao ar. Ataque: 10 ml HNO ₃ -10 ml ácido acético -15 ml HCl –2 gotas de glicerol (100x)).....	24
Figura 5	- Representação da microestrutura da austenita (Aço inoxidável AISI 316 recozido a 1035° C. Ataque: H ₂ O-HCl-HNO ₃ (100x)).....	25
Figura 6	- Representação da microestrutura da martensita do aço inoxidável martensítico CA6NM.....	26
Figura 7	- Gráfico ilustrando a taxa de corrosão (em mm/ano) de acordo com a quantidade de cromo (em %)......	28
Figura 8	- Diagrama de equilíbrio ferro-cromo.....	29
Figura 9	- Comparação do sistema Fe-Cr e Fe-Ni sob a influência da transformação alotrópica do Fe.....	32
Figura 10	- Modificações de composição a partir do aço inoxidável austenítico 304, visando propriedades especiais.....	37
Figura 11	- Microscopia óptica de um aço inoxidável ferrítico, tipo 409, oriundo da laminação a quente no Steckel. Material como recebido. Aumento de 100X. Reagente de Villela.....	40
Figura 12	- Micrografia ótica mostrando a estrutura austenítica-ferrítica do aço inoxidável duplex em forma de laminado a quente. As áreas escuras e as claras correspondem às fases ferrítica e austenítica, respectivamente.....	43
Figura 13	- Microscopia Óptica do aço UNS S 32760 (Superduplex), mostrando as formas alongadas de austenita (fase clara) na matriz ferrita (fase escura), ataque Villela.....	44

Figura 14	- Imagens óticas do aço inoxidável superduplex UNS 32750.(a) Imagem obtida por microscopia óptica com ataque Behara: a matrix (áreas escuras) é composta de ferrita, e as regiões claras são austenita; (b) Imagem obtida por MEV ataque eletroquímico	45
Figura 15	- Estrutura do aço superduplex UNS S32750 após a soldagem a laser.....	46
Figura 16	- Macrografia de um exemplo de soldagem a laser.....	48
Figura 17	- Esquema do laser Nd:YAG.....	50
Figura 18	- (a) Fundamentos de soldagem a laser; (b) Representação da “tocha de soldagem”; (c) Máquina de soldagem a laser industrial Nd:YAG.....	51
Figura 19	- Esquema da soldagem a laser tipo overlapping.....	52
Figura 20	- Macrografias dos cortes transversais dos cordões de soldagem tipo bead-on-plate usando 0,5 m/mm de velocidade, - 2 mm de distância desfoque(1), 20 l/min Ar e diferentes potências do laser: (a) 4 kW; (b) 5 kW; (c) 7 kW e (d) 8 kW.....	54
Figura 21	- Micrografias do metal base. (a) MO (b) MEV.....	56
Figura 22	- Esquema representativo da junta soldada com a inserção das ligas de Ni entre as chapas do aço superduplex UNS S32750; (a) Lâmina de Inconel 625 e (b) Lâmina de Hastelloy C276.....	57
Figura 23	- Vista superior da junta soldada utilizando-se as ligas de níquel como metal de adição (a) e detalhe do cordão de solda (b).....	57
Figura 24	- Equipamento de solda a laser UW 150A pertencente à FEIS/UNESP.....	58
Figura 25	- Detalhes dos cortes (a) e corpos de prova após o corte (b).....	62
Figura 26	- Representação do ensaio de microdureza Vickers no aço inoxidável UNS S32750, com adição de liga Inconel 625.....	63
Figura 27	- Representação do ensaio de microdureza Vickers no aço inoxidável UNS S32750, com adição de liga Hastelloy C276.....	64
Figura 28	- Gráfico de microdureza na junta soldada a laser do aço inoxidável UNS S32750, com adição de Inconel 625.....	65

Figura 29	- Gráfico de microdureza na junta soldada a laser do aço inoxidável UNS S32750, com adição de Hastelloy C276.....	65
Figura 30	- Cordões das soldas: Argônio 15 l/min, Nitrogênio 15 l/min, e Nitrogênio 30 l/min.....	68
Figura 31	- Gráfico de microdureza na junta soldada a laser do aço inoxidável UNS S32750, com adição de Argônio (15 l/min), Nitrogênio (15 l/min) e Nitrogênio (30 l/min).....	69
Figura 32	- Representação da escala de microdureza no processo de soldagem autógena com gás Argônio (15 l/min). Valor da microdureza em [HV].....	72
Figura 33	- Representação da escala de microdureza no processo de soldagem autógena com gás Nitrogênio (15 l/min). Valor da microdureza em [HV].....	72
Figura 34	- Representação da escala de microdureza no processo de soldagem autógena com gás Nitrogênio (30 l/min). Valor da microdureza em [HV].....	73
Figura 35	- Gráfico de microdureza na junta soldada a laser do aço inoxidável UNS S32750, autógena, com o uso do gás de proteção Argônio (15 l/min).....	74
Figura 36	- Gráfico de microdureza na junta soldada a laser do aço inoxidável UNS S32750, autógena, com o uso do gás de proteção Nitrogênio (15 l/min).....	74
Figura 37	- Gráfico de microdureza na junta soldada a laser do aço inoxidável UNS S32750, autógena, com o uso do gás de proteção Nitrogênio (30 l/min).....	75
Figura 38	- Gráfico comparativo entre os três processos de análise de medição de microdureza: Argônio (15 l/min), Nitrogênio (15 l/min), e Nitrogênio (30 l/min).....	75
Figura 39	- Corpo de prova preso à pinça da máquina de ensaios de tração..	77
Figura 40	- Curva tensão x deformação com o metal de adição Inconel 625..	79

Figura 41	- Curva tensão x deformação com o metal de adição Hastelloy C276.....	79
Figura 42	- Detalhes do local de rompimento nos corpos de prova com metal de adição Inconel 625 (a); e Hastelloy C276 (b).....	80
Figura 43	- Perfis dos cordões de solda. Da esquerda para a direita, a imagem plena do cordão; suas medidas e os detalhes de seus grãos.....	81
Figura 44	- Microscopia ótica dos cordões de solda: Inconel e Hastelloy.....	82
Figura 45	- Imagens das trincas ocorridas no metal de solda durante o processo de soldagem com o Inconel 625.....	83
Figura 46	- Imagens das trincas ocorridas no metal de solda durante o processo de soldagem com o Hastelloy C276.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Composição química do aço inoxidável superduplex UNS S32750 (SAF 2507).....	45
Tabela 2 -	Composição química do aço inoxidável superduplex UNS S32750 (SAF 2507).....	55
Tabela 3 -	Propriedades mecânicas do aço inoxidável superduplex UNS S32750.....	55
Tabela 4 -	Composição química da liga Inconel 625 e da liga Hastelloy C276	56
Tabela 5 -	Características da máquina de soldagem a laser UW 150 A.....	59
Tabela 6 -	Descrições dos corpos de prova.....	59
Tabela 7 -	Parâmetros de soldagem.....	60
Tabela 8 -	Valores de microdureza Vickers de acordo com os pontos de medição. Metal base UNS S32750, e metais de adição Inconel 625 e Hastelloy C276.....	66
Tabela 9 -	Valores de microdureza Vickers de acordo com os pontos de medição. Soldagem autógena do metal base UNS S32750 com os gases de proteção Argônio (15 l/min) e Nitrogênio (15 l/min e 30 l/min).....	70
Tabela 10 -	Valores referentes aos ensaios de tração: metal base UNS S32750; com metal de adição Inconel 625 e Hastelloy C276; com gás de proteção Argônio (15 l/min), Nitrogênio (15 l/min) e Nitrogênio (30 l/min).....	78
Tabela 11 -	Composição química das fases secundárias nos aços superduplex e suas respectivas temperaturas de precipitação.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABINOX	Associação Brasileira do Aço Inoxidável
AID	Aço inoxidável duplex
AISD	Aço inoxidável superduplex
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASM	<i>International de Materials Information Society</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C	Carbono
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
Cl	Cloreto
Co	Cobalto
CTP	Temperatura crítica por pite
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Fe	Ferro
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
g	gramas
GTAW	<i>Gas Shielded Tungsten Arc Welding</i>
HAZ	<i>Heat Affect Zone</i>
HCl	Ácido Clorídrico
HNO ₃	Ácido Nítrico
HV	<i>Hardness Vickers</i>
Hz	Hertz
H ₂ O	Água
Ni	Níquel
ISSF	<i>International Stainless Steel Forum</i>
J	Joules
kW	Kilowatts
l/min	Litros por minuto

MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MB	Metal Base
Mo	Molibdênio
MO	Microscopia ótica
mm	milímetros
Mn	Manganês
MPa	Mega Pascal
ms	milisegundos
N	Nitrogênio
NaOH	Hidróxido de Sódio
Ni	Níquel
Nb	Nióbio
Nd:YAG	Neodímio: ítrio alumínio granada
nm	Nanometros
P	Fósforo
PRE	Resistência ao pite equivalente
PREN	Número de resistência crítica ao pite equivalente
S	Enxofre
SAF	<i>Sandvick Austenitic Ferritic</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
Se	Selênio
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
Si	Silício
Sn	Estanho
Ti	Titânio
UNS	<i>Unified Numbering System</i>
µm	Micrometro
W	Watts
ZAT	Zona Afetada Termicamente

LISTA DE SIMBOLOS

γ	Austenita
λ	Comprimento de onda
α	Ferrita alfa
σ	Ferrita delta
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVOS.....	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1	O ESTADO DA ARTE.....	20
3.2	MICROESTRUTURA DOS AÇOS.....	23
3.2.1	Ferrita	24
3.2.2	Austenita (γ).....	24
3.2.3	Martensita	25
3.3	PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS	26
3.3.1	Cromo.....	27
3.3.2	Níquel	30
3.3.3	O sistema Fe-Cr-Ni	31
3.3.4	Nitrogênio	32
3.4	AÇOS INOXIDÁVEIS E SUAS CLASSIFICAÇÕES	33
3.4.1	Classificações dos aços inoxidáveis	34
3.4.2	Tipos de aços inoxidáveis	35
3.4.2.1	<i>Austeníticos</i>	35
3.4.2.1.1	<i>Exemplos</i> de aços inox austeníticos	37
3.4.2.2	<i>Ferríticos</i>	39
3.4.2.3	<i>Martensíticos</i>	40
3.4.2.4	<i>Duplex</i>	41
3.4.2.5	<i>Superduplex</i>	43
3.4.2.6	<i>Endurecidos</i> por precipitação	45
3.5	SOLDAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX/SUPERDUPLEX PELO PROCESSO LASER	46
3.5.1	Características gerais da Soldagem a Laser	46
3.5.2	Processo de Soldagem a Laser e o Laser Nd:YAG	47
3.5.2.1	<i>Soldagem</i> a laser no modo pulsado	51
3.5.3	Principais características da soldagem a laser <i>overlapping</i> ("sobreposição de pontos").....	52
3.5.3.1	<i>Do número de pulsos</i>	52

3.5.4	Efeito da potência do laser.....	53
4	MATERIAIS E MÉTODOS	55
4.1	MATERIAIS.....	55
4.2	MÉTODOS	58
4.2.1	Soldagem	58
4.2.2	Metalografia	60
4.2.3	Ensaio de microdureza Vickers (HV)	61
4.2.4	Ensaio de tração	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1	ENSAIOS DE MICRODUREZA.....	63
5.2	ENSAIOS DE TRAÇÃO	76
5.3	MICROSCOPIA ÓTICA.....	80
6	CONCLUSÕES	88
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira do Aço Inoxidável - ABINOX (2015) a presença do aço inox nos mais variados setores da atividade humana é tão extensa e comum que a maioria das pessoas não percebe o quanto interagem com esse centenário material, direta ou indiretamente, durante o dia a dia. Do acordar, ao café da manhã, do almoço ao jantar, entre as atividades de casa e trabalho, até nas horas de descanso, em algum momento, o inox está presente proporcionando conforto, saúde e bem estar.

A ABINOX cita ainda que resistente e higiênico, o inox tornou-se obrigatório em grande variedade de aplicações, que vão do utensílio e eletrodomésticos ao transporte, indústria farmacêutica, de alimentos e bebidas, à arquitetura, energia, óleo e gás, papel e celulose, entre outras. Não importa a utilização, o inox está presente tanto em parafusos aos gigantescos equipamentos das usinas sucroalcooleiras e das indústrias petroquímicas; ou nas tubulações de gás e carrocerias de modais de transporte, como o Metrô. Nesse sentido, o aço inox é referência em versatilidade, estética e um ícone da indústria moderna.

Os aços superduplex UNS S32750, metal base utilizado neste trabalho, apresentam uma matriz estrutural binária de ferrita/austenita, com proporção 50/50%, sendo a ferrita responsável pelas boas qualidades mecânicas e a austenita responsável pelas qualidades de resistência a corrosão. Porém, quando da necessidade de soldagem desses materiais, descobriu--se que o processo causava um desbalanceamento da proporção ideal de 50/50% de ferrita/austenita, o que acarretava em perda de alguma das características que se buscava na utilização desses aços. Com isso, iniciaram-se diversas pesquisas sobre processos de soldagem em aços inoxidáveis duplex/superduplex, ganhando grande enfoque os processos de soldagem a laser.

De acordo com Camarinha (2013), o processo de soldagem a laser é caracterizado pela fusão localizada da junta através de seu bombardeamento por

feixe de luz concentrada, coerente e monocromática de alta intensidade, o fóton. Os feixes são de alta intensidade e suficientes para fundir parte do material da junta no ponto onde o feixe está localizado no material, causando um furo, *keyhole*, que penetra profundamente no metal base.

Os processos de soldagem nos corpos de prova foram realizados com o uso de uma fonte laser Nd:YAG, modelo UW 150 A, pertencente ao Laboratório de Soldagem Laser, do Departamento de Engenharia, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS/UNESP.

Com o objetivo de se preservar os valores de microdureza Vickers e de resistência mecânica, no metal de solda, foram utilizadas ligas com alta taxa de Níquel, como o Inconel e o Hastelloy. Ainda com esse mesmo objetivo, foram utilizados gases de proteção no processo de soldagem autógena, como argônio e o nitrogênio, pois, de acordo com Paiva et al. (2014), o nitrogênio atua como estabilizador da austenita - aumentando a resistência mecânica e a resistência à corrosão.

6 CONCLUSÕES

O uso dos gases de proteção não influenciou no balanço da microestrutura do metal de solda, pois o Nitrogênio, que mesmo sendo um gás gamagênico, apresentou valores semelhantes de microdureza Vickers, em suas diferentes taxas de vazão, em relação ao Argônio, que é um gás inerte. A elevação do valor na microdureza Vickers no metal de solda, se comparado ao valor da microdureza no metal base, pode ser explicada por uma provável ferritização dessa região. Essa ferritização pode ter sido gerada pela alta taxa de resfriamento, própria do processo de soldagem a laser.

Para o caso da soldagem com o uso das ligas, houve uma baixa contribuição das ligas Inconel 625 e Hastelloy C276 para o metal de solda, pois os seus valores de microdureza Vickers ficaram mais baixos que o da microdureza do metal base.

Os ensaios de tração mostraram uma maior resistência mecânica da junta soldada pelo processo autógeno, se comparados aos valores de resistência mecânica do processo de soldagem com o uso das ligas de níquel.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Fica, como sugestão para os trabalhos futuros, os seguintes itens:

- realizar soldagem a arco elétrico com o processo GTAW;
- estudar a corrosão no metal de solda;
- realizar o balanço das fases austenita e ferrita no metal de solda;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AÇO INOXIDÁVEL- ABINOX. [S.l.: s.n., 2016]. Disponível em: <<http://www.abinox.org.br/upfiles/arquivos/biblioteca/tipos-de-acos-inoxidaveis.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AÇO INOXIDÁVEL- ABINOX. [S.l.: s.n., 2018]. Disponível em: <<http://www.abinox.org.br/aco-inox-estatisticas-anuais.php>>. Acesso em: 19 jun. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AÇO INOXIDÁVEL- ABINOX. **Informativo nº 1, agosto de 2015**. [S.l.: s.n.] 2016. Disponível em: <<http://www.abinox.org.br/site/publicacoes-abinox.php?cod=176>>. Acesso em: 3 set. 2016.

ALCÂNTARA, A. P. **Estudo da fadiga termomecânica em um aço inoxidável martensítico da série X22**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

ARMAS, A. I. **Duplex stainless steel: brief history and some recent alloys. Recent Patents on Mechanical Engineering**, Emirados Árabes Unidos, v.1, n. 1, p. 51-57, 2008.

BERALDO, C. H. **Efeito da temperatura de envelhecimento sobre as propriedades mecânicas e resistência à corrosão por pite do aço inoxidável martensítico endurecido por precipitação UNS S46500**. 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado)– Escola Politécnica- EP, Universidade de São Paulo- USP, São Paulo, 2013.

BERRETTA, J. R. et al. Soldagem com laser de Nd:YAG do aço inoxidável martensítico AISI 420. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM - CONSOLDA, 26., 2000, Curitiba. **Congresso...** São Paulo: IPEN, 2000. p. 12.. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/15386/10313.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 6 nov. 2017.

BORDINASSI, E. C. et al. Superficial integrity analysis in a super-duplex stainless steel after turning. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v.18, v.1-2, p. 335-338, 2006. Disponível em: <http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_amme06/1176.pdf>. Acesso em: 3 set. 2016.

BRAGA, E. M. **Efeito do teor de nitrogênio sobre a susceptibilidade a trinca de solidificação em aço inoxidável austenítico soldado pelo processo FCAW com e sem pulsação do arco.** 2002. 112 f. Tese (Doutorado)– Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

BROWN MCFARLANE. **Global steel solutions.** [S.l.: s.n., 2017]. Disponível em: <<https://www.brownmac.com/pt/produtos/aco-inoxidavel-super-duplex/uns-s32750-1-4410>>. Acesso em: 11 ago. 2017.

BUBANI, F. C. et al. Efeitos da adição de níquel em ligas ferro-cromo. parte I: propriedades mecânicas. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 1, jan.-mar. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672007000100023>. Acesso em: 27 jul. 2016.

CALLISTER JUNIOR., W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 575 p.

CAMARINHA, M. G. G. **Avaliação do comportamento em fadiga do aço maring 300 submetido a processo de soldagem a laser.** 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado)– Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.

CANDEL, E. H. P. **Soldagem dos aços inoxidáveis superduplex UNS S32750 e UNS S32760.** 2016. 137 f. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

CARVALHO, S. M. **Estudo da soldabilidade a laser e a TIG do titânio comercialmente puro grau 2 empregado em sistemas pneumáticos de aeronaves.** 2012. 159 f. Dissertação (Mestrado)– Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos.** 6. ed. São Paulo: ABM, 1988. 561 p.

CUNTO, J. C. **Estudo da resistência à corrosão de aços inoxidáveis para uso na parte fria dos sistemas de exaustão de veículos.** 2005. 101 f. Dissertação (Mestrado)– Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. 2005.

EL-BATAHGY, A.; KHOURSHID, A. K.; SHAREF, T. Effect of laser beam welding parameters on microstructure and properties of duplex stainless steel. **Materials Sciences and Applications, Scientific Research**, v. 2, n. 10, p. 1443 – 1451. 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/A_El-Batahgy/publication/276541373_Effect_of_Laser_Beam_Welding_Parameters_on_Microstructure_and_

Properties_of_Duplex_Stainless_Steel/links/564d41f708aefe619b0ddb23/Effect-of-Laser-Beam-Welding-Parameters-on-Microstructure-and-Properties-of-Duplex-Stainless-Steel.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2016.

FRANZINI, O. D. **Aplicação de laser pulsado Nd:YAG** na soldagem do aço super duplex UNS S32750. 2016. 71 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, 2016.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996. 332 p. Disponível em: <http://www.worldstainless.org/crude_steel_production/crude_2015>. Acesso em: 20 set. 2016.

GIRALDO, C. A. S. **Resistência à corrosão intergranular do aço inoxidável ferrítico UNS S43000**: avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito de tratamento isotérmico e mecanismo de sensibilização. 2006. 197 f. Tese (Doutorado)- Escola Politécnica- EP, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

INTERNATIONAL STAINLESS STEEL FORUM- ISSF. **Stainless in figures 2018**. Shanghai: [s.n.], 2018. Disponível em: <http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Figures_2018_English_Public.pdf> . Acesso em: 19 jun. 2018.

MELLO JUNIOR, M. M. B. **Estudo sobre o efeito dos parâmetros de processamento dos pós e sinterização do aço inox 316L reforçado com NbC**. 2011. 76 f. Dissertação (Mestrado)– Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

KNOLL, P. K. **Utilização de solução polimérica em substituição ao óleo como meio de resfriamento no tratamento térmico de têmpera de barras e aço**. 2009. 45 f. Dissertação (Mestrado)– Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

LAPSANKA, H.; CHMELICKOVA, H.; HRABOVSKY, M. Effect of beam energy on weld geometric characteristics in nd:yag laser overlapping spot welding of thin aisi 304 stainless steel sheets. **The Minerals, Metal & Materials Society and ASM International**, Estados Unidos, v. 41B, v. 5, p. 1108 – 1115, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-010-9399-8>>. Acesso em: 21 set. 2016.

LIMA, D. B. P. L. **Avaliação da soldabilidade do aço inoxidável superduplex UNS 32750**. 2006. 124 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

MANUAL técnico de aço inoxidável. São Paulo: [s.n.], 2011. Disponível em: <<http://www.kloecknermetals.com.br/pdf/3.pdf>>. Acesso em: 8 set. 2016.

MARIANO, C. **Obtenção de revestimentos de nióbio depositados por aspersão térmica para proteção à corrosão marinha**. 2008. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MARQUES, D. C. **Estudo da influência do teor de níquel na usinabilidade de ligas Fe-Cr-Ni**. 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

MARTINS, M. **Caracterização microestrutural-mecânica e resistência à corrosão de aço inoxidável super-duplex ASTM A890 / A890M Grau 6 A**. 2006. 242 f. Tese (Doutorado)– Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo-USP, São Carlos, 2006.

MATHEUS, J. R. G. **Evolução microestrutural dos aços inoxidáveis ferríticos AISI 409 e AISI 430E durante o processamento em um laminador Steckel**. 2006. 247 f. Tese (Doutorado)– Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

MOUSAVI, S. A. A. A; SUFIZADEH, A. R. Metallurgical investigations of pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 321 and AISI 630 stainless steels. **Materials & Design**, Surey, v. 30, n. 8, p. 3150-3157, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306908005645>>. Acesso em: 7 out. 2016.

MUTHUPANDI, V. et al. Effect of nickel and nitrogen addition on the microstructure and mechanical properties of power beam processed duplex stainless steel (UNS 31803) weld metals. **Materials Letters**, Amsterdam, v. 59, n. 18, p. 2305-2309, 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X05002508>>. Acesso em: 24 ago. 2016.

NAEMM, M; BRANDIT, M. **Nd: YAG Laser welding**. [S.l.]: New Developments in Advanced Welding, 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781855739703500056>>. Acessado em: 17 out. 2016.

OCHOA, D. M. L. **Estudo do desgaste erosivo-corrosivo de aços inoxidáveis de alto nitrogênio em meio lamacento**. 2007. 174 f. Tese (Doutorado)– Escola Politécnica- EP, Universidade de São Paulo- USP, São Paulo. 2007.

OLIVEIRA JÚNIOR, C. A. **Torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 e influência na resistência à corrosão**. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas, 2013.

PADILHA, A.F.; GUEDES, L.C. **Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades.** São Paulo: Hemus, 2004. 170 p.

PAIVA, T. C. et al. Análise da influência do gás de purga na raiz de juntas soldadas pelo processo GTAW em aço inoxidável superduplex UNS S32750. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7., 2013, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, 2013. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/siteCOBEF2013/anais/PDFS/COBEF2013-0439.PDF>> . Acesso em: 21 set. 2016.

REALUM. **Soluções em titânio e altas ligas.** [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em: <<http://www.realum.com.br>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

RIBOLLA, A.; DAMOULIS G. L.; BATALHA G. F. The use of Nd:YAG laser weld for large scale volume assembly of automotive body in white. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 164-165, p. 1120-1127, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605002086>>. Acesso em: 19 ago. 2016.

ROSSI, W. ROCHA, G. A. NEVES, M. D. M. Soldagem de aço inoxidável super duplex UNS S32750 com laser pulsado de Nd:YAG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7., 2013, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas- ABCM, 2013. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/siteCOBEF2013/anais/PDFS/COBEF2013-0056.PDF>>. Acesso em: 21 set. 2016.

SALES, A. M.; WESTIN, A. M.; COLEGROVE, P. Effect of nitrogen in backing gas on duplex root weld properties of heavy-walled pipe. **Journal of Materials Processing Technology**, Alemanha, v. 60, n. 5, p. 877-882, 2016.

SANCHES, L. P. **Estudo comparativo quanto à resistência a corrosão entre aços inoxidáveis utilizados em trocadores de calor.** 2009. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)- Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SANTOS, R. O. et al. Análise da influência do processo de soldagem GTAW na microestrutura e resistência à corrosão do aço superduplex uns s32760. **Revista Virtual de Química**, Salvador, v. 8, n. 4, p. 1040-1053, jul. 2016. Disponível em: <<file:///D:/Meus%20documentos/Downloads/1794-8951-2-PB.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2016.

SATHIYA, P.; ABDULJALEEL, M. Y. Measurement of the bead profile and microstructural characterization of a CO2 laser welded AISI904L superaustenitic stainless steel. 9 p. **Optics & Laser Technology**, Surrey, v. 42, n. 6, p. 960-968,

2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399210000162>>. Acesso em: 20 out. 2016

SATHIYA, P.; MISHRA, M. K.; SHANMUGARAJAN, B. Effect of shielding gases on microstructure and mechanical properties of super austenitic stainless steel by hybrid welding. **Materials & Design**, Elsevier, v. 33, p. 203-212, 2012. Disponível em: Acesso em: 21 set. 2016.

SCURACCHIO, B.G. **Influência dos elementos de liga no intervalo de solidificação do aço inoxidável martensíticos CA6NM**. 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica- EP, Universidade de São Paulo- USP, São Paulo, 2009.

SENATORE, M.; FINITO, L.; PEREA, E. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. **Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 60, n.1, p. 175-181. 2007.

SILVEIRA, D. M. **Avaliação da resistência à corrosão de juntas soldadas de aço inoxidável *lean* duplex UNS S32304 usando a espectroscopia de impedância eletroquímica**. 2013. 113 f. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SOUZA, J. P. B. et al. Análise da resistência à corrosão por pite em soldas de reparo pelo processo TIG em aço inoxidável superduplex UNS S32750. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 104-113, 2011.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciências dos materiais**. 13. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2000. 413 p.

ZAMBON A.; BONOLLO, F. Rapid solidification in laser welding of stainless steel. **Materials Sciences and Engineering**, v. 178, n. 1-2, p. 203-207, 1994. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/921509394905444>>. Acesso em: 17 out. 2016.

ZAMBON, A.; FERRO, P.; BONOLLO, F. Microstructural, compositional and residual stress evaluation of CO₂ laser welded superaustenitic AISI 904L stainless steel. **Materials Sciences and Engineering**, v. 424, n. 1-2, p. 117-127, 2006. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509306002474>>. Acesso em: 19 out. 2016.