

FERNANDO VALÉRIO IDALGO LEITE

**Deposição de Inconel 625 em aço AISI 4130 usando soldagem de
arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW)**

Fernando Valério Idalgo Leite

**Deposição de Inconel 625 em aço AISI 4130 usando soldagem de
arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW)**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

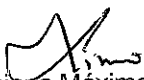
Orientador: Prof. Dr. Peterson L. Ferrandini

Leite, Fernando Valério Idalgo
L533d Deposição de Inconel 625 em Aço AISI 4130 usando soldagem de arco
elétrico com eletrodo revestido (SMAW) / Fernando Valério Idalgo Leite –
Guaratinguetá, 2017.
25f : il.
Bibliografia: f. 24-25

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini

1. Soldagem elétrica. 2. Revestimentos. 3. Aço – Análise. I. Título

CDU 621.791



Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-83595

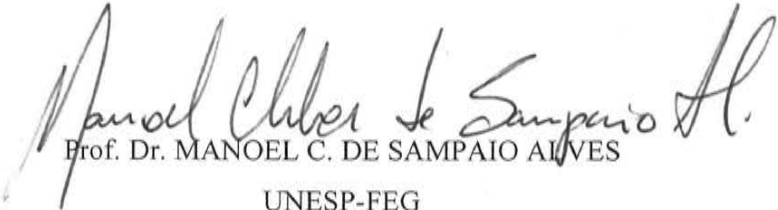
FERNANDO VALÉRIO IDALGO LEITE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI
Orientador/ UNESP-FEG


Prof. Dr. MANOEL C. DE SAMPAIO ALVES
UNESP-FEG


Engº EVERTON COELHO DE MEDEIROS
UNESP-FEG

Dezembro de 2017

DADOS CURRICULARES

FERNANDO VALÉRIO IDALGO LEITE

NASCIMENTO: 19.07.1991 – Jacareí / SP

FILIAÇÃO: Maria de Lourdes Valério Idalgo Leite
Rubens Idalgo Leite

2010/2017 Curso de Graduação
Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho” - Campus de Guaratinguetá

RESUMO

As propriedades superficiais dos materiais utilizados nos componentes de engenharia são determinantes para o seu desempenho. Em vista disso, há um amplo interesse no estudo do revestimento de componentes para alterar tais propriedades, visando o aumento da vida útil, sendo o Inconel utilizado por diversas vezes como o material para esse revestimento. Neste trabalho, Inconel 625 foi depositado em amostras de aço AISI 4130 através de solda a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), sendo utilizados eletrodos comercialmente disponíveis. Três cordões de solda foram produzidos utilizando 110 A, 140 A e 170 A e, através de análises de geometria, dureza e microestruturas obtidas após processo de soldagem, observou-se que um aumento na corrente de 110 A a 140 A resultou em um aumento no volume depositado e em um aumento na diluição de 31,8% a 44%, enquanto a dureza se reduziu de (201 ± 5) HV para (176 ± 30) HV. Quando houve o aumento da corrente de 140 A para 170 A, tanto diluição quanto dureza apresentaram uma variação menos pronunciada, 52% e (176 ± 3) HV, respectivamente. A variação do espaçamento interdendrítico foi ainda menos pronunciada. Conclui-se que não houve crescimento linear do volume depositado e da zona termicamente afetada; as microestruturas obtidas foram semelhantes; o espaçamento interdendrítico aumentou ligeiramente; houve uma clara mudança na dureza; e a estrutura da ZTA se mostrou martensítica, devido a rápida extração de calor.

PALAVRAS-CHAVE: Inconel 625. Deposição. Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido.

ABSTRACT

Surface properties of an engineering component are determinant for its performance. Thus, there is a large number of studies concerning clad components in order to enhance service life and, many times inconel is used as a cladding material. In this work, Inconel 625 was deposited on an AISI 4130 steel substrate, using SMAW and commercially available flux coated electrodes. Three clad beads were produced using 110 A, 140 A and 170 A and it was observed that raising welding current from 110 A to 140 A lead to an increased deposited volume and raised dilution from 31,8% to 44%, while hardness lowered from (201 ± 5) HV to (183 ± 6) HV. When raising welding current to 170 A, both dilution and hardness presented less pronounced variation, 52% and (176 ± 3) HV. Inter-dendritic spacing variation was even less pronounced. It was concluded that there was no linear growth of the deposited volume and the thermally affected zone; the microstructures obtained were similar; the interdendritic spacing increased slightly; there was a clear change in hardness; and the structure of the ZTA showed to be martensitic due to the fast extraction of heat.

KEYWORDS: Inconel 625. Deposition. Shielded metal arc welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1–Efeito do teor do soluto em ligas binárias de Ni na tensão de escoamento	11
Figura 2–Processo de solda por arco elétrico com eletrodo revestido	14
Figura 3–Temperatura de pico do metal base durante a soldagem.....	15
Figura 4–Regiões formadas durante a soldagem.....	15
Figura 5–Máquina de Solda utilizada no trabalho.....	16
Figura 6–Durômetro utilizado no trabalho.....	18
Figura 7–Microscópio utilizado no trabalho	19
Figura 8–Perfis transversais dos grânulos obtidos com (A) 110 A, (B) 140 A, (C) 170 A.....	19
Figura 9 – ZTA dos cordões realizados a 110 A e 140 A	21
Figura 10– Micrografias mostrando a estrutura dendrítica dos cordões estudados B	23
Figura 11 – Micrografias apresentando microestrutura do metal base após soldagem a 140 A	24
Figura 12 – Imagens da zona de transição entre a zona termicamente afetada e o metal base. Solda com 170 A e ampliação de 50 vezes	25
Figura 13 – Zona termicamente afetada, cordão realizado a 110 A: estrutura martensítica	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1–Composição química do aço AISI 4130	12
Tabela 2–Vantagens, limitações e aplicações da SMAW	14
Tabela 3–Composição Química do Inconel 625.....	17
Tabela 4–Resultados obtidos da solda.....	22

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	9
1.2. OBJETIVOS	10
2. REVISÃO DA LITERATURA	10
2.1. SUPERLIGAS DE NÍQUEL	10
2.2. INCONEL 625	11
2.3. AÇO AISI 4130	12
2.4. SOLDABILIDADE	13
2.5. SOLDA A ARCO ELÉTRICO COM ELETRODO REVESTIDO (SMAW).....	13
2.6. REGIÕES DE UMA JUNTA SOLDADA	14
3. MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1 ANÁLISE DA GEOMETRIA DO CORDÃO.....	20
4.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	22
5. CONCLUSÃO	26
REFERÊNCIAS	26
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	27

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Em vista da grande utilização do aço em todos os ramos da indústria moderna, em termos mundiais, existe a necessidade cada vez maior de aumentar a vida útil dos componentes que o utilizam como metal base, para que se reduzam os custos com manutenção e até mesmo de troca de componentes.

A superfície de um componente de engenharia é definitivamente importante para a sua vida útil, uma vez que é onde se nucleia a maioria das rachaduras, a corrosão se inicia e o material sofre desgaste abrasivo.

A soldagem é um dos processos utilizados para que a vida útil do aço seja aumentada, através da deposição de material que seja mais resistente e altere características microestruturais do aço. Assim, há uma série de estudos referentes à deposição de Inconel, visando à melhoria das propriedades de superfície, utilizando laser (ABIOYE; FOLKES; CLARE; 2013) e soldagem a gás de arco de tungstênio (GTAW) (SILVA, C. C. et al, 2013). Além disso, muitos autores investigam soldagem em Inconel usando soldagem por feixe de elétrons, soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW) e solda a arco elétrico com eletrodo de tungstênio (TIG, ouGTAW)(MEI, Y. et. al, 2016). Inconel 625 é uma superliga à base de níquel, que apresenta uma matriz de Ni-Cr fortalecida por uma solução sólida de molibdênio e Nióbio (SHAKIL, M. et al, 2014). Suas propriedades físicas e químicas superiores, como alta resistência à corrosão e resistência à deformação em temperaturas elevadas levam a uma série de usos em várias indústrias, como aeroespacial, marinha, química e petroquímica. Linhas tubulares utilizadas na indústria de petróleo e gás muitas vezes recebem revestimento de Inconel por solda, por exemplo, em tubulações de aço carbono de baixa liga.

Muitos processos de soldagem comumente induzem a tensões residuais de tração, proporcionando assim uma tensão indesejável na superfície do componente. Durante a deposição de uma liga diferente sobre um metal base, usando um processo de soldagem, devido a diferentes expansões e alterações de fase associadas, surgem tensões residuais que podem variar dependendo das características dos diferentes materiais e do processo envolvido.

A microestrutura do Inconel se caracteriza por uma estrutura dendrítica, sempre dependente da direção e taxa de extração de calor. Como esperado, quanto maior for a taxa de

extração de calor, mais fina será a microestrutura. O crescimento epitaxial também é afetado. (SANDHU; SHAHI, 2016). Quando o revestimento envolve processos de soldagem, a taxa de extração de calor depende da entrada de calor, que varia com os parâmetros de soldagem e determina as microestruturas finais.

1.2. OBJETIVOS

Os objetivos centrais desse trabalho se referem ao estudo da deposição de Inconel 625 em uma estrutura de aço AISI 4130 por meio de solda a arco elétrico com eletrodo revestido. Através da variação da corrente de soldagem entre 110 A, 140 A e 170 A, determinar as características microestruturais, estimar as propriedades obtidas por meio do estudo da dureza nos três casos e o efeito de tal variação de corrente sobre o metal base por meio de estudo da ZTA.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. SUPERLIGAS DE NÍQUEL

As superligas de níquel são materiais com alta resistência mecânica em temperaturas elevadas, boa resistência à fluência, à fadiga e à corrosão. Possuem, porém, algumas características que proporcionam intenso desgaste, como fragilidade, baixa condutividade térmica e presença de carbeto.

O desenvolvimento dessas ligas foi motivado, inicialmente, para aplicação em motores de turbinas à gás. Foram posteriormente aplicadas também nos setores aeroespacial, petroquímico, automotivo e biomédico.

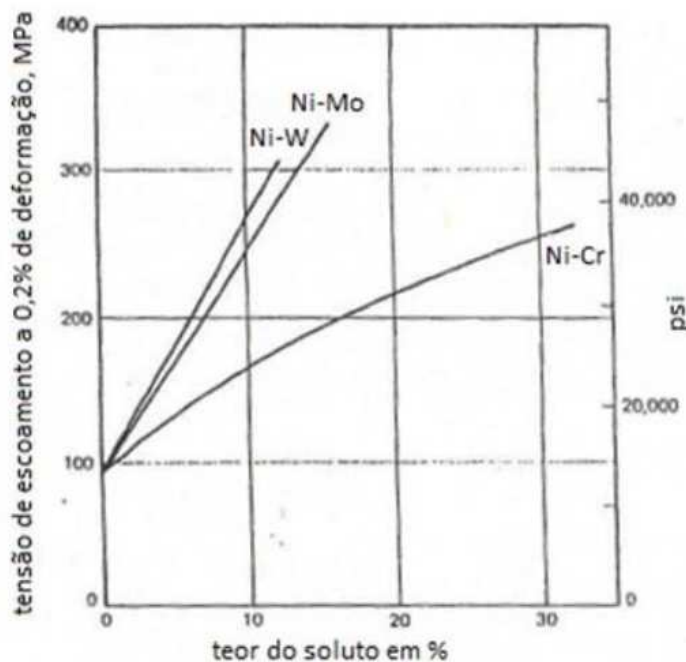
A estrutura cristalina da matriz γ austenítica das superligas de níquel é cúbica de faces centradas (CFC) e garante as ligas boa resistência à tração e à ruptura. Além disso, quando comparado a ligas cúbicas de corpo centrado (CCC), apresenta boas propriedades de fluência em temperaturas mais altas. Este comportamento é justificado pelo excelente módulo de elasticidade e a alta difusividade que os elementos secundários possuem neste tipo de matriz (ICZ - INSTITUTO DE METAIS NÃO FERROSOS - SUPERLIGAS DE NÍQUEL).

2.2. INCONEL 625

Inconel 625 é uma superliga a base de níquel, e dessa forma garante boa resistência a corrosão em atmosferas severas e de altas temperaturas, de até 982°C. Além disso, apresenta excelente resistência mecânica e dureza a temperaturas na fase criogênica, devido ao endurecimento por solução sólida dos metais Nióbio e Molibdênio em uma matriz γ de Níquel-Cromo.

Através do gráfico da figura 1, pode-se avaliar o potencial de endurecimento do tungstênio (W), Molibdenio (Mo) e Cromo (Cr) através da inclinação das respectivas curvas e perceber a relevância do Mo no endurecimento desta matriz. Além disso, o material pode sofrer endurecimento por precipitação da fase γ'' (Ni_3Nb) após recozimento em condições específicas (BROOKS, 1984).

Figura 1 - Efeito do teor do soluto em ligas binárias de Ni na tensão de escoamento



Fonte: Brooks (1984).

A matriz de Cromo e Níquel garante alta resistência mecânica em ambientes oxidantes, ao passo que a matriz de Molibdênio e Níquel garante resistência à oxidação. O cromo é essencial para garantir a estabilidade da camada superficial passiva, pela formação de Cr_2O_3 , o que garante a resistência à corrosão no Inconel 625. A presença do molibdênio garante

resistência a pites e fissuras por corrosão e os altos teores de níquel previnem o surgimento de trincas.

O Inconel 625 apresenta em sua microestrutura uma matriz cubica de face centrada de nióbio fase γ endurecida por solução sólida. Diversos carbeto são formados, como MC e M₆C (sendo M o elemento constituinte do carbeto, no geral níquel, nióbio e molibdênio).

O endurecimento na superliga Inconel 625 é derivado da precipitação fina da fase metaestável γ'' Ni₃Nb, após recozimento a longos períodos a temperaturas entre 550°C e 850°C. Em geral, essa precipitação ocorre na forma de discos coerentes com a matriz γ (FARINA, VILLARES METALS).

A liga Inconel 625 apresenta boa soldabilidade, podendo servir de metal de adição em diferentes procedimentos de soldagem. Não são necessários tratamentos térmicos após a soldagem para que seja obtida alta resistência mecânica e ductilidade na liga (SPECIAL METALS)

Pode ocorrer, porém, fragilização por trincas a quente. Estudos demonstram que quanto maior a diferença entre a temperatura máxima obtida durante a soldagem e a temperatura mínima de operação, maior a probabilidade de tal fragilização. (CIESLAK, 1991).

2.3. AÇO AISI 4130

A conhecida nomenclatura 41XX se refere aos aços constituídos por de 0,8% a 1,1% de cromo (Cr) e de 0,15% a 0,25% de molibdênio (Mo); ainda, XX30 se refere à porcentagem de carbono que o constitui, multiplicado por 100 (0,3%).

Classificado como aço de baixo carbono, o AISI 4130 apresenta maior resistência mecânica em relação aos aços de baixo carbono, características atribuídas pela adição do Cr e do Mo, porém menores ductilidade e dureza. É amplamente utilizado em engrenagens e tubos estruturais que requerem alta resistência mecânica. A tabela 1 apresenta a composição química do aço AISI 4130

Tabela 1 - Composição química do aço AISI 4130 (% em peso)

Componente	C	MN	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V
Porcentagem (em peso)	0,28 a 0,33	0,40 a 0,60	0,03 (max.)	0,04 (max.)	0,15 a 0,35	-	0,80 a 1,10	0,15 a 0,25	-

Fonte: Manual de Aços Gerdau (2003).

2.4. SOLDABILIDADE

A soldabilidade pode ser definida como a capacidade do material de ser soldado em condições especificadas para atender, satisfatoriamente, as propriedades requeridas de um dado projeto. O primeiro fator que interfere na soldabilidade de um metal é sua composição química. Cada tipo de metal permite certos limites nos processos de soldagem que garantem uma boa soldagem do material. Se estes limites são extensos o material é de boa soldabilidade, no entanto se são pequenos o material é de difícil soldabilidade (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1997).

O cálculo do carbono equivalente (CE) pode ser usado para avaliar a soldabilidade equivalente. O CE é um índice que relaciona a composição química do aço com a propensão deste apresentar problemas no processo de soldagem. Um valor de carbono equivalente máximo é, geralmente, especificado para aços estruturais como forma de minimizar os riscos de dureza excessiva ou trincas induzidas por hidrogênio, por exemplo. Geralmente, a susceptibilidade a trincas aumenta quando o CE é maior que 0,4 (LANCASTER, 1999).

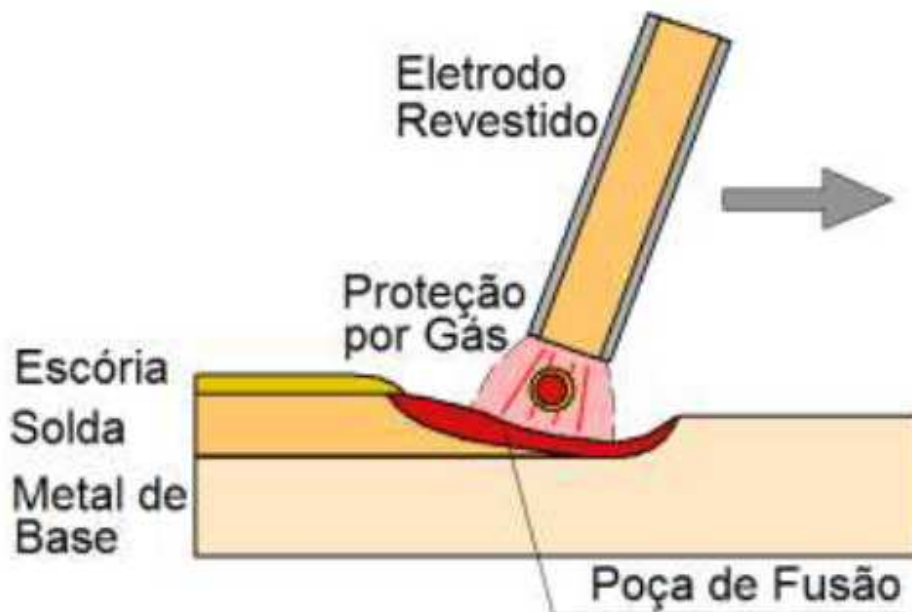
2.5. SOLDA A ARCO ELÉTRICO COM ELETRODO REVESTIDO (SMAW)

A solda por arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW) é um processo no qual a coalescência dos metais é obtida pelo aquecimento destes com um arco estabelecido entre um eletrodo especial revestido e a peça.

O eletrodo é formado por um núcleo metálico ("alma"), recoberto por uma camada de minerais e/ou outros materiais (revestimento). A alma do eletrodo conduz a corrente elétrica e serve como metal de adição. O revestimento gera escória e gases que protegem da atmosfera a região sendo soldada e estabilizam o arco. O revestimento pode ainda conter elementos que são incorporados à solda, influenciando sua composição química e características metalúrgicas. A figura 2 ilustra o processo e a tabela 2 mostra suas vantagens, limitações e aplicações.

O equipamento necessário ao processo consiste de porta-eletrodo, cabos e fonte de energia, que pode ser de corrente contínua (CC) ou alternada (CA) dependendo do tipo de eletrodo e material sendo soldado.

Figura 2 – Ilustração do processo de solda por arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW)



Fonte: Modenesi; Marques; Santos (2012).

Tabela 2 – Tabela com vantagens, limitações e aplicações da SMAW

Vantagens e limitações	Aplicações
Equipamento simples, portátil e barato.	Soldagem de produção, manutenção e em montagens no campo.
Não necessita fluxos ou gases externos.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga.
Pouco sensível à presença de correntes de ar.	Soldagem de ferro fundido.
Processo extremamente versátil em termos de materiais soldáveis.	Soldagem de alumínio, níquel e suas ligas.
Facilidade para atingir áreas de acesso restrito.	
Aplicação difícil para materiais reativos.	
Produtividade relativamente baixa.	
Exige limpeza após cada passe de soldagem.	

Fonte: Modenesi; Marques; Santos (2012).

2.6. REGIÕES DE UMA JUNTA SOLDADA

Durante a realização de uma solda, esta e as regiões adjacentes ao metal base são submetidas a ciclos térmicos cujas temperaturas de pico decrescem à medida que se afasta do eixo central da solda (figura 3). Nestas condições, podem-se esperar alterações microestruturais, em relação ao material original, ao longo de sua seção transversal. Desta

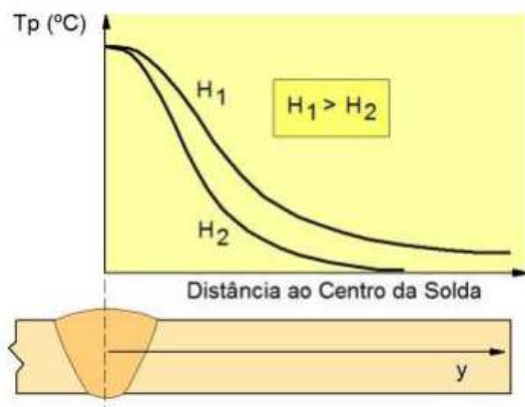
forma, em uma solda por fusão, pode-se arbitrariamente considerar a existência de três regiões básicas, conforme figura 4 (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012):

I - Zona Fundida (ZF): região onde o material foi fundido durante a soldagem e caracterizado por temperaturas de pico superiores à sua temperatura de fusão.

II - Zona Termicamente Afetada (ZTA): região não fundida do metal base, mas cuja microestrutura e/ou propriedades foram alteradas pelo ciclo térmico de soldagem. As temperaturas de pico são superiores a uma temperatura crítica (T_c) característica do metal base.

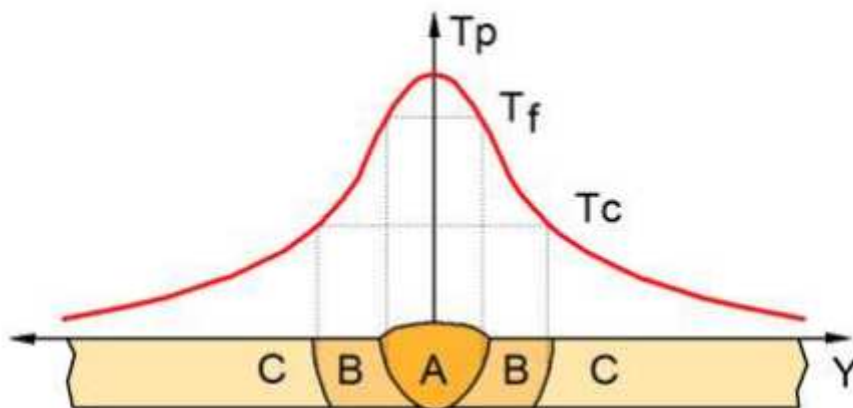
III - Metal Base (MB): Regiões mais afastadas da solda que não foram alteradas pelo ciclo térmico. Suas temperaturas de pico são inferiores a T_c .

Figura 3 – Temperatura de pico do metal base durante a soldagem



Fonte: Modenesi; Marques; Santos (2012).

Figura 4 – Regiões formadas durante a soldagem



Fonte: Modenesi; Marques; Santos (2012)

3. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O Inconel 625 foi depositado numa placa AISI 4130, de dimensões 190 mm x 15 mm x 30 mm, utilizando SMAW e eletrodos revestidos comercialmente disponíveis, de diâmetro 4,00 mm. Devido à falta de prática com o método de soldagem e visando um cordão de solda mais coeso e homogêneo para as três condições, foi utilizada mão de obra especializada neste tipo de soldagem.

O equipamento utilizado nesse processo foi o de modelo RC 250 (figura 5), disponível na oficina de mecânica da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG-UNESP).

Figura 5: máquina de solda utilizada no trabalho



Fonte: Autoria própria

A composição química padrão do metal de adição utilizado no presente trabalho é apresentado na tabela 3.

Tabela 3: Composição Química do Inconel 625 (%)

Material	C	Cr	Mo	Fe	Co	Nb	Ti	Al	Mn	Ni	Si
Inconel 625	0,1	20 a 23	8 a 10	5	1	3,15 a 4,15	0,4	0,4	0,5	58	0,5

Fonte: SpecialMetals. Propriedades metalúrgicas da liga INCONEL 625 (2013).

Os dois eletrodos e a placa de substrato foram aquecidos a 150°C antes da deposição. Um único cordão de recobrimento de aproximadamente 130 mm de comprimento foi produzido para cada corrente de soldagem utilizada, na posição plana, mantendo o eletrodo a um ângulo de 45° com a superfície do substrato.

Para o primeiro cordão, os parâmetros de solda foram 110 A, 21 V e 2,9 mm/s; Para o segundo, 140 A, 22 V e 3,0 mm/s; Para o terceiro 170 A, 25 V e 3,1 mm/s. A entrada de calor, de acordo com QW-409.1 da ASME IX (MELFI, 2010), foi de 0,8 kJ/mm, 1,0 kJ/mm e 1,4 kJ/mm, respectivamente.

As amostras de cada cordão foram cortadas, com serra de corte disponível no laboratório de faculdade, montadas e convencionalmente preparadas para metalografia. As amostras foram inicialmente atacadas com nital 3% para revelar a macroestrutura e microestrutura do material. Em seguida, para revelar a microestrutura do cordão, foram atacadas durante 10 s com o seguinte reagente: 50 ml de HNO₃, 45 ml de HCL, 5 ml de H₂O₂.

Os valores de dureza Micro Vickers foram determinados utilizando carga de 500 gf, aplicados durante 10 s, em vários pontos da seção transversal da solda. Foi utilizado um durômetro modelo 401 MVD da Wilson Instruments, disponível no laboratório da faculdade (figura 6).

Figura 6: durômetro utilizado no trabalho



Fonte: Autoria própria

Seções transversais dos cordões foram medidas utilizando um projetor de perfil; Para determinar o espaçamento inter-dendrítico as imagens ópticas foram analisadas utilizando microscópio modelo EPIPHOT 200 da NIKON (figura 7), juntamente ao software IMAGE J. A diluição também foi determinada utilizando a IMAGE J, dividindo a área do cordão situado sob a superfície original da placa de substrato pela área total do cordão.

Figura 7: microscópio utilizado no trabalho

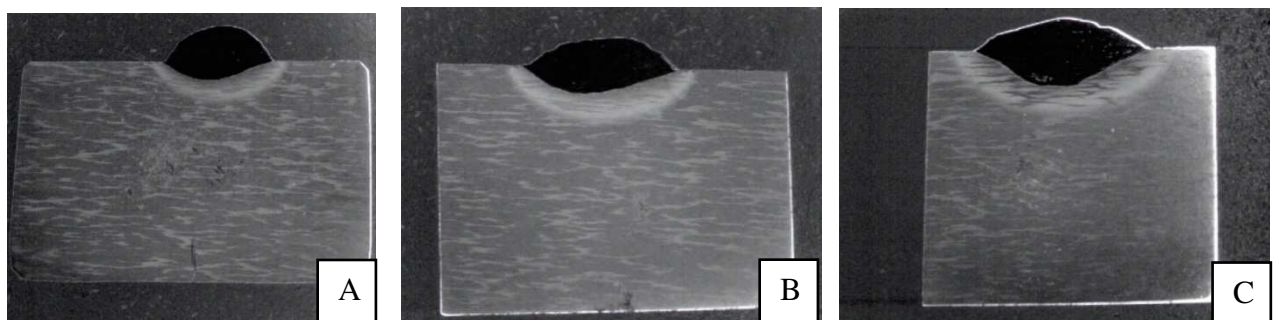


Fonte: Autoria própria.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 8 mostra as seções transversais dos cordões e a Tabela 4 mostra os valores de microdureza, geometria, diluição e espaçamento inter-dendríticos dos cordões obtidos com cada valor de corrente de soldagem.

Figura 8: Perfis transversais dos grânulos obtidos com (A) 110 A, (B) 140 A, (C) 170 A



Fonte: Autoria própria.

4.1 ANÁLISE DA GEOMETRIA DO CORDÃO

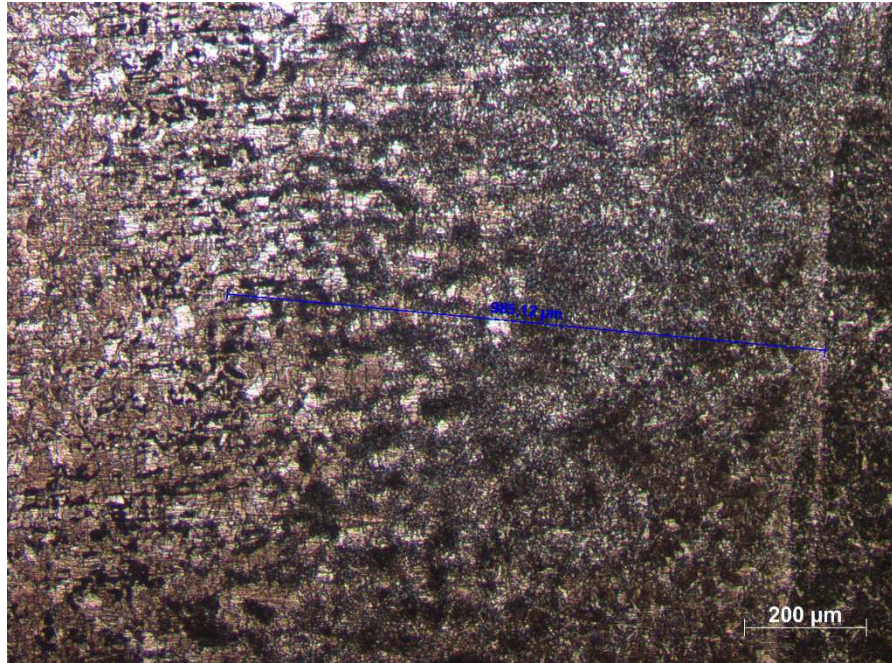
O aumento da corrente de soldagem de 110 A para 140 A resultou em um aumento do volume depositado e um aumento da diluição de 31,8% para 44%. Como esperado, a penetração foi maior para 140 A.

Ao considerar o ligeiro aumento na velocidade de soldagem, verifica-se que a maior entrada de calor foi completamente convertida em um maior volume depositado. (MEI, 2016) observou que a entrada de calor apresenta um efeito muito mais pronunciado na geometria do cordão do que a velocidade de soldagem.

Quando a corrente de soldagem foi aumentada de 140 A para 170 A, por outro lado, o volume depositado não aumentou tão acentuadamente. De fato, a largura e o reforço observados, são os mesmos para 140 A e 170 A. A penetração e a diluição aumentaram moderadamente, quando comparados aos valores relativos à mudança da corrente de soldagem de 110 A a 140 A.

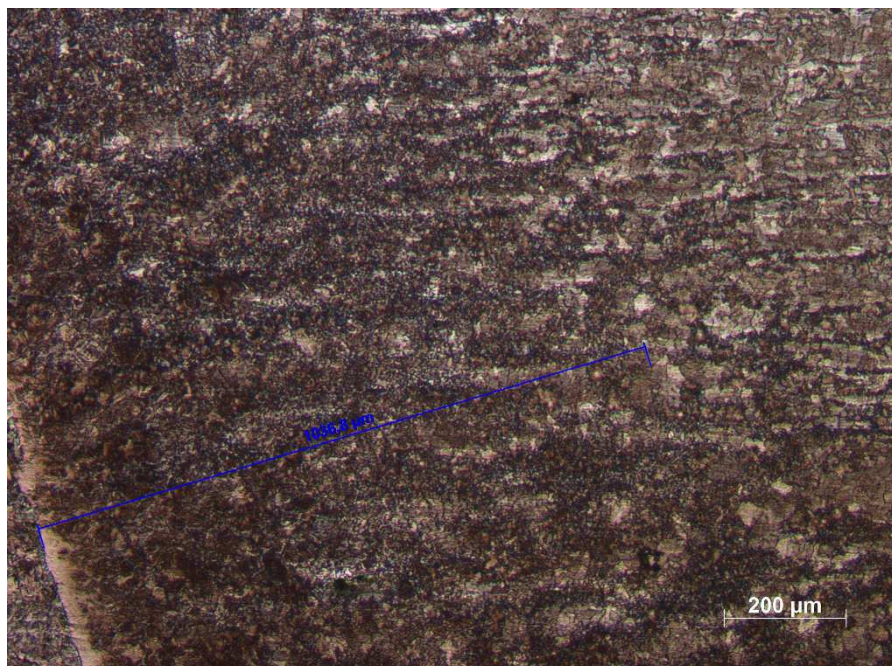
A zona termicamente afetada (ZTA) apresentou largura média de $(1,2 \pm 0,3)$ mm, $(1,2 \pm 0,3)$ mm e $(1,6 \pm 0,3)$ mm para os grânulos obtidos com 110 A, 140 A e 170 A, respectivamente, conforme figuras 9a e 9b. O aumento da entrada de calor não aumenta o volume depositado e a largura de ZTA proporcionalmente, em oposição aos resultados relatados por Ramkumar. Note-se que Sandhu e Shahi, que depositaram Inconel em aço inoxidável, trabalharam com correntes de soldagem de 80 A, 90 A, 100 A, 105 A e relataram uma diminuição no volume depositado ao mudar de 100 A para 105 A.

Figura 9a:. ZTA do cordão realizado com solda a 110 A.



Fonte: Autoria própria.

Figura 9b: ZTA do cordão realizado com solda a 140 A.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4: Geometria do cordão, diluição, microdureza e espaçamento interdendrítico dos revestimentos Inconel 625 de camada única.

Corrente (A)	Parâmetros da geometria do cordão				Microdureza média (VHN)	Espaçamento interdendrítico (μm)
	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Diluição (%)		
110	8,1	2,5	1,2	31,8	(201 $\pm$ 5)	(9,1 $\pm$ 1,6)
140	9,9	3,9	1,8	44	(183 $\pm$ 6)	(9,3 $\pm$ 1,4)
170	9,8	3,9	2,1	52,3	(176 $\pm$ 3)	(10,4 $\pm$ 0,4)

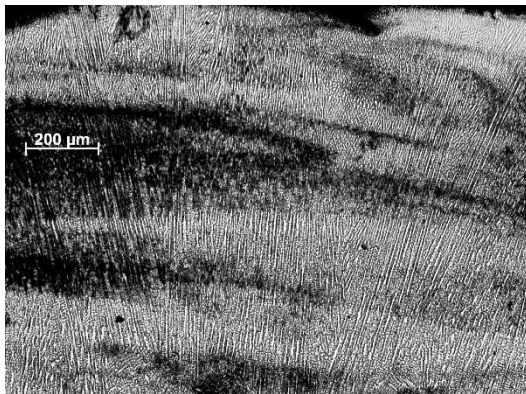
Fonte: Autoria própria.

4.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

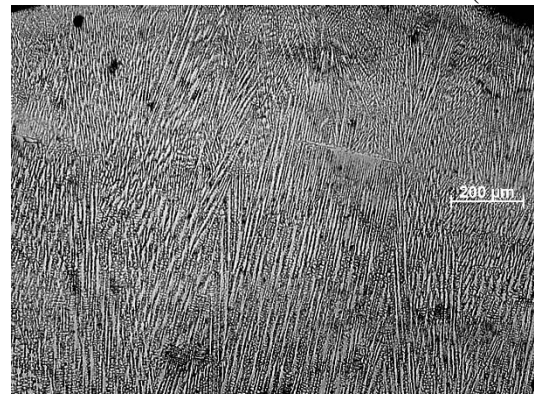
A Figura 9 mostra as microestruturas dos cordões obtidos. As Figuras 10a, 10b, 10c mostram a estrutura na região próxima ao metal base para as três correntes de soldagem estudadas. Verifica-se claramente que a entrada de calor variável não determinou nenhuma diferença estrutural relevante. As três microestruturas apresentam uma estrutura completamente dendrítica, altamente orientada, de acordo com a direção de extração de calor. As três amostras apresentaram pouco crescimento epitaxial, que também foi relatado anteriormente (SANDHU; SHAHI, 2016). As micrografias relativas à região central dos cordões são vistas nas Figuras 10d, 10e e 10f. A estrutura dendrítica completamente orientada ainda é observada. As figuras 10g, 10h e 10i mostram detalhes microestruturais da região de reforço. Observa-se claramente que, embora a estrutura dendrítica seja mantida, não está tão orientada quanto nas duas outras regiões estudadas. Além disso, as dendritas são consideravelmente mais curtas quando comparadas às observadas anteriormente. A perda de orientação e os dendritos mais curtos são atribuídos à maior taxa de extração de calor perto da superfície. O espaçamento interdendrítico foi determinado e foi encontrada variação expressiva. De fato, a tabela 4 mostra uma ligeira tendência de crescimento no espaçamento interdendrítico, pois a entrada de calor é aumentada, o que está de acordo com os resultados relatados anteriormente (SANDHU; SHAHI, 2016).

Figura 10. Micrografias mostrando a estrutura dendrítica dos cordões estudados.

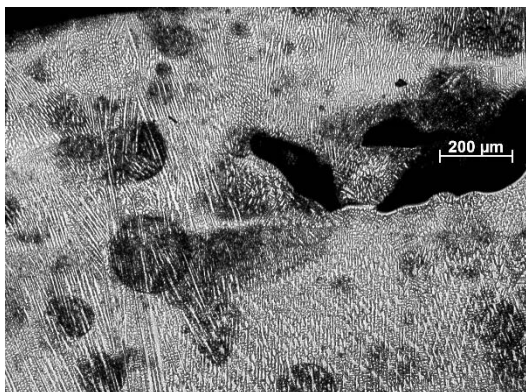
(continua)



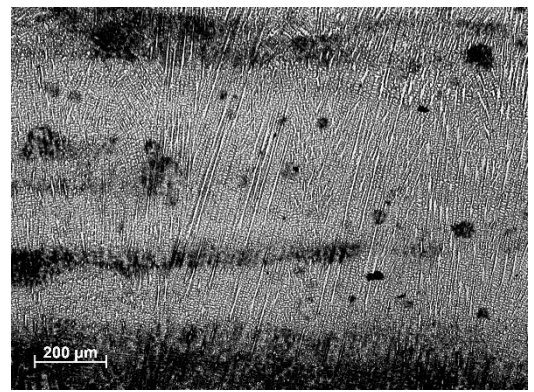
A)



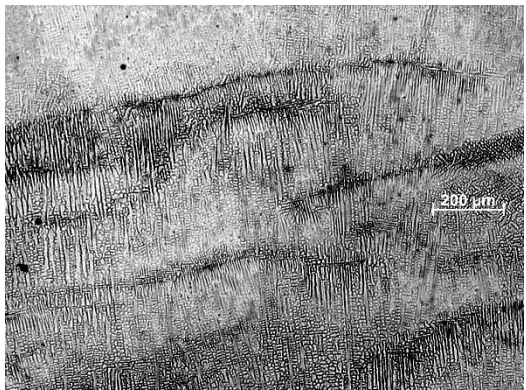
B)



C)



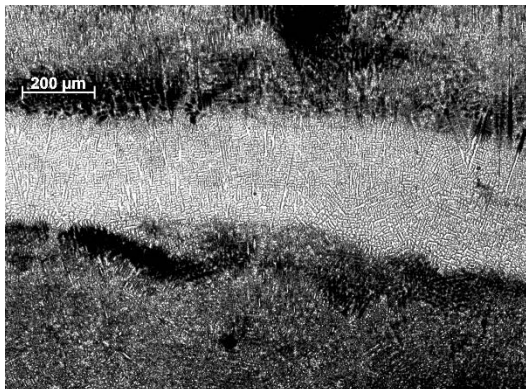
D)



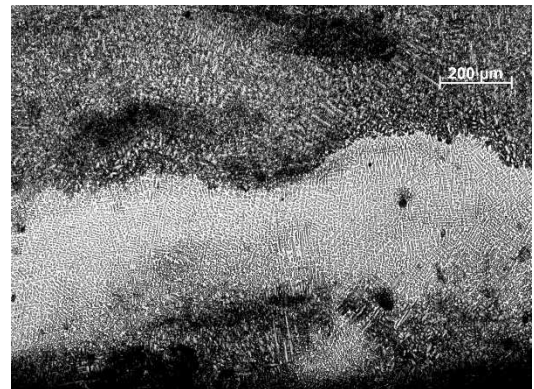
E)



F)

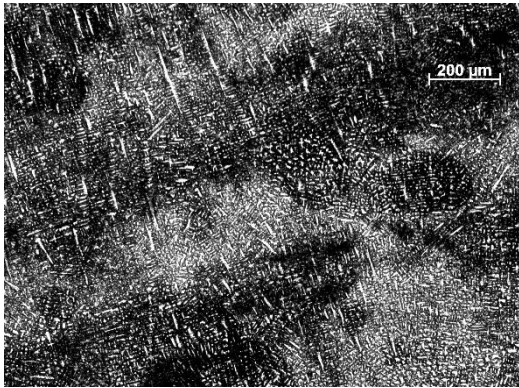


G)



H)

Figura 10: Micrografias mostrando a estrutura dendrítica dos cordões estudados.

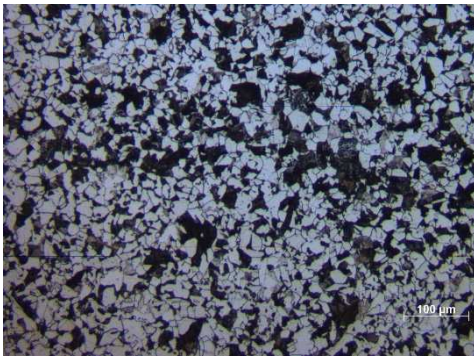


D)

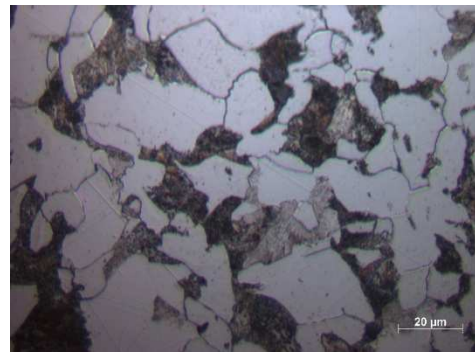
Fonte: Autoria própria.

A figura 11 mostra o metal base após a solda. As figuras 11a e 11b se referem à operação realizada com corrente de 140 A e mostram com clareza a estrutura ferrítica com a presença de perlita, com aumento de 100 e 500 vezes, respectivamente.

Figura 11: Micrografias mostrando a estrutura do metal base após soldagem a 140 A.



A)



B)

Fonte: Autoria própria.

A zona de transição entre o metal base e a zona termicamente afetada (ZTA) obtida através do processo realizado a 170 A é apresentada na figura 12. Através da ampliação de 50 vezes, nota-se tanto a estrutura ferritaperlita do metal base quanto a estrutura martensítica da ZTA. A obtenção dessas duas fases ferrítica com perlita pode ser explicada pelo resfriamento relativamente lento da ZTA, uma vez que tanto eletrodo quanto o metal base foram aquecidos a aproximadamente 150°C antes da deposição.

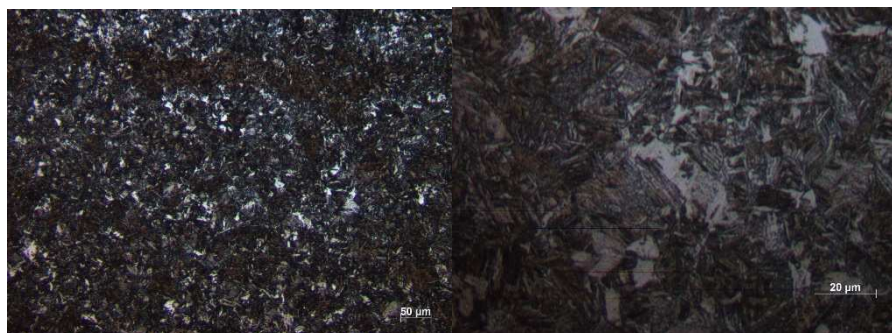
Figura 12: Imagem da zona de transição entre a zona termicamente afetada e o metal base. Solda com 170A e ampliação de 50 vezes.



Fonte: Autoria própria.

A figura 13 mostra a microestrutura da ZTA ocasionada pela soldagem de 110 A em três diferentes ampliações: 13a com ampliação de 100 vezes, 13b ampliada em 500 vezes e por fim 13c, ampliada em 1000 vezes. Fica clara a estrutura martensítica, resultado do processo de têmpera durante a soldagem. Uma vez que o pré-aquecimento tivesse sido realizado a temperaturas superiores à utilizada nesse trabalho, o resfriamento seria mais lento e essa estrutura se faria menos pronunciada.

Figura 13. Zona termicamente afetada, cordão realizado a 110 A: estrutura martensítica



A)

B)



C)

Fonte: Autoria própria.

5. CONCLUSÃO

O Inconel 625 foi depositado em aço AISI 4130, usando SMAW e três valores de corrente de soldagem diferentes. Os cordões foram analisados e concluiu-se que:

1. O aumento da entrada de calor não aumenta o volume depositado e a largura da ZTA linearmente;
2. Apesar da variação da entrada de calor, os cordões apresentam principalmente estrutura dendrítica, fortemente orientada, de acordo com a direção de extração de calor;
3. O espaçamento entre dendríticos tende a aumentar com a entrada de calor, mas o efeito não é fortemente observado;
4. O efeito da variação da entrada de calor é claramente mais forte na dureza;
5. A análise da microestrutura da ZTA apresenta com clareza a martensita, formada devido à rápida extração de calor após o processo de solda, processo de têmpera.

REFERÊNCIAS

ABIYOE, T. E.; FOLKES, J.; CLARE, A. T. **Journal A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition**, Journal of Materials Processing Technology, v. 213, p. 2145-2151, 2013.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding handbook**. 8. ed. American Welding Society, 1997. 2 v.

BROOKS, C. R. **Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys**. American Society for Metals, 1984.

CIESLAK, M. J. **The welding and solidification metallurgy of alloy 625**. 1991.

FARINA, A. **Metalografia das ligas e superligas de níquel**. Villares Metals.

ICZ - INSTITUTO DE METAIS NÃO FERROSOS. **Superligas de Níquel**. Disponível em: <<http://www.icz.org.br/niquel-superligas.php>>. Acesso em: 20 nov. 2017 .

LANCASTER, J. F. **Metallurgy of Welding**. Woodhead Publishing Limited, 1999.

MEI, Y. et. al. **Effect of base metal and welding speed on fusion zone microstructure and HAZ hot-cracking of electron-beam welded Inconel 718**. Materials and Design 89 964-977 (2016).

MELFI, T. **New codes requirements for calculating heat input**. Welding Journal 61-63. 2010.

MODENESI, P. P.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte – 2012

SANDHU, S. S.; SHAHI, A. S. **Metallurgical, wear and fatigue performance of Inconel 625 weld claddings**. Journal of Materials Processing Technology 233 (2016) 1- 8.

SHAKIL, M. et al. **Microstructure and hardness studies of electron beam welded Inconel 625 and stainless steel 304L**. Vacuum 110 (2014) 121-126

SILVA, C. C. et al. **New insight on the solidification path of an alloy 625 weld overlay** Journal of Materials Research and Technology 2013 2(3) 228-237.

SPECIAL METALS. **Propriedades metalúrgicas da liga INCONEL 625**. Disponível em: <<http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>> . Acesso em: 20 nov. 2017

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ABIOYEA, T.E.; MCCARTNEY, D. G.; CLARE, A. T. Laser cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 217, p. 232-240, 2015.

ABIOYE, T. E., MCCARTNEY, D. G., CLARE, A. T. **Laser cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection** Journal of Materials Processing Technology 217 (2015) 232-240.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding handbook: metals and their weldability**. 7. ed. American Welding Society, 1982.

BENGHALIA, G.; WOOD, J. **Autofrettage of Weld Clad Components** Procedia Engineering 130 (2015) 453-465.

EVERHART, J. L. **Engineering properties of Nickel and Nickel alloys**. New york: Plenum Press, 1971.

KOU, S. **Welding metallurgy**. New York: John Wiley & Sons, 2003.

LIU, S. et. Al. **Real-time monitoring of laser hot-wire cladding of Inconel 625** Optics & Laser Technology vol. 62 (2014) 124-134

NEMECEK, S., FIDLER, L., FISEROVA, P. **Corrosion resistance of laser clads of Inconel 625 and Metco 41C** Physics Procedia 56 (2014) 294–300.

PAUL, C. P. et. al. **Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components**. Optics & Laser Technology, v.39, p.800-805, 2007.

RAMKUMAR, K. D. et al. **Influence of laser peening on the tensile strength and impact toughness of dissimilar welds of Inconel 625 and UNS S32205**. Materials Science & Engineering A 676 (2016) 88-89.

RAMKUMAR, K. D. et al. **Studies on the weldability, microstructure and mechanical properties of activated flux TIG weldments of Inconel 718** Materials Science & Engineering A 639 (2015) 234-244.