

Diego Bassani

**DESENVOLVIMENTO DE ARAME TUBULAR DE
NÚCLEO METÁLICO DE LIGA INCONEL 625
PARA SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Fevereiro/2016

Diego Bassani

(Coordenador de Pesquisa & Desenvolvimento, 2016)

DESENVOLVIMENTO DE ARAME TUBULAR DE NÚCLEO METÁLICO DE LIGA INCONEL 625 PARA SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração:
Engenharia da Soldagem

Orientador:

Professor Doutor Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

Fevereiro/2016

*"Nada na vida deve ser temido, somente compreendido.
Agora é hora de compreender mais para temer menos."
(Marie Curie)*

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, pelo constante apoio e incentivo durante toda a minha trajetória profissional e científica.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Sérgio Duarte Brandi, pela orientação científica e conselhos cedidos;

Ao Adilson Manjon Moreno, pela sempre presente colaboração e orientação;

À Professora Idalina Vieira Aoki, com a ajuda nos ensaios eletroquímicos;

Aos meus pais e irmãs, por estarem sempre presentes;

Aos meus familiares próximos, por todo o apoio;

À voestalpine Böhler Welding pelo apoio ao desenvolvimento dos corpos de prova;

CURRICULUM VITAE

Formado em Engenharia Metalúrgica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, trabalha desde 2011 na voestalpine Böhler Welding Soldas do Brasil Ltda. na área de Pesquisa & Desenvolvimento. Atualmente ocupa o cargo de Coordenador de Pesquisa & Desenvolvimento.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo verificar se é possível a fabricação de um arame tubular de núcleo metálico para soldagem por arco submerso de uma liga INCONEL 625, que apresente o mesmo desempenho de um arame sólido.

Desenvolveu-se o arame a partir de uma fita de níquel, formulando o fluxo interno para atender à composição química desejada. O diâmetro final do arame desenvolvido foi de 2,40 mm.

Comparou-se o arame tubular de núcleo metálico com o arame sólido de mesmo diâmetro em diversos testes como propriedades mecânicas, análises químicas, resistência à corrosão sob tensão e resistência à corrosão por pite.

Ao final, constatou-se que é possível a fabricação de um arame tubular de núcleo metálico com propriedades similares ou superiores ao arame sólido da liga INCONEL 625.

ABSTRACT

This study aims to verify if is possible the production of a metal cored wire for submerged arc welding of the alloy INCONEL 625, presenting the same performance of a solid wire for the same alloy.

It was developed the wire from a nickel strip, formulating the internal flux to meet the desired chemical composition. The final wire diameter for the metal cored wire was 2.40 mm.

It was compared the metal core wire with solid wire of the same diameter in several tests such as mechanical properties, chemical analysis, stress corrosion and pitting corrosion resistance.

Finally, It was found that the manufacture of metal wire core with properties similar or superior to solid wire INCONEL 625 alloy is possible.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Princípio de funcionamento do processo de soldagem por arco submerso (Okumura & Taniguchi, 1982).....	3
Figura 2-2: Equipamentos básicos referentes ao processo de soldagem por arco submerso (Paranhas, 1992)	5
Figura 2-3: Soldagem em peças circulares. (a) cabeçote se movimentando e (b) cabeçote fixo (Paranhas, 1992)	7
Figura 2-4: Testes de fluência realizados a 816°C/52 Mpa (Eiselstein & Tillack, 1991)	11
Figura 2-5: Exemplo de trinca de solidificação em uma liga a base de níquel (Dupont, Lippold, & Kiser, 2009)	13
Figura 2-6: Densidade de corrente em um arame tubular de núcleo metálico. 14	
Figura 2-7: Perfil de um arame metal cored (Moreno, 2012)	15
Figura 2-8: Representação da propagação de pite (Zanetic, 2001)	16
Figura 4-1: Processo de laminação do arame tubular de núcleo metálico	23
Figura 4-2: Processo de trefilação do arame tubular de núcleo metálico.....	24
Figura 4-3: Amostra do arame tubular de núcleo metálico	24
Figura 4-4: Corpo de prova para análise química	26
Figura 4-5: Modelo dos corpos de prova para ensaios mecânicos (AWS A5.23, 2013)	27
Figura 4-6: Equação para o cálculo da taxa de deposição	28
Figura 4-7: Cabeçote Fixo	29

Figura 4-8: Tubo de Aço Carbono para Medida da Taxa de Deposição Metálica	29
Figura 4-9: Corpo de prova para medição da altura do depósito, penetração do cordão de solda e análise de diluição do ferro	31
Figura 4-10: Equação de perda de massa	32
Figura 4-11: Detalhe da junta soldada (valores em mm).....	34
Figura 4-12: Método para medida de dureza HRC em junta de topo (NACE MR0175, 2009)	35
Figura 4-13: Regiões para a medição do potencial de pite através da curva de polarização potenciodinâmica. Os círculos vermelhos representam as áreas que serão analisadas.....	36
Figura 4-14: Célula plana modificada para ensaio de polarização cíclica	38
Figura 4-15: Detalhe mostrando a ligação do eletrodo ao corpo de prova, a vedação de silicone e o bico de pipeta	38
Figura 5-1: Comparação da taxa de deposição metálica entre o arame sólido e a amostra 625+Mg.....	44
Figura 5-2: Determinação da corrente equivalente para soldagem dos corpos de prova para determinação de susceptibilidade de corrosão sob tensão conforme NACE 0175	47
Figura 5-3: Mapa de dureza para pontos ensaiados	48
Figura 5-4: Macrografia da secção transversal do corpo de prova soldado com arame sólido	49
Figura 5-5: Macrografia da secção transversal do corpo de prova soldado com a amostra 625+Mg.....	50

Figura 5-6: Polarização cíclica para ensaio S-A-C-1	51
Figura 5-7: Polarização cíclica para ensaio S-A-C-2	51
Figura 5-8: Polarização cíclica para ensaio S-A-C-3	52
Figura 5-9: Polarização cíclica para ensaio M-A-C-1	52
Figura 5-10: Polarização cíclica para ensaio M-A-C-2.....	53
Figura 5-11: Polarização cíclica para ensaio M-A-C-3.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Composição típica da liga INCONEL 625 (%) (Eiselstein & Tillack, 1991)	10
Tabela 4-1: Composição química requerida para o arame ERNiCrMo-3 (ASME SFA-5.14, 2013)	20
Tabela 4-2: Análise química da fita de níquel, em (%)	21
Tabela 4-3: Composição química das matérias primas, em (%)	22
Tabela 4-4: Memória de cálculo para as amostras 625 e 625+Mg. O fluxo corresponde a 36% do arame. Valores em (%)	22
Tabela 4-5: Composição química do metal de solda depositado pela combinação entre o arame sólido e o fluxo para soldagem informada pelo fabricante (%)	25
Tabela 4-6: Composição química do fluxo para soldagem por arco submerso informada pelo fabricante, em (%)	25
Tabela 4-7: Classificação conforme composição química para a liga de níquel INCONEL 625 (API 6A, 2010)	30
Tabela 4-8: Composição química do aço ASTM A333 gr. 8. Valores em (%) ...	33
Tabela 5-1: Análise química do arame sólido	39
Tabela 5-2: Análise química dos depósitos de solda	40
Tabela 5-3: Ensaio de tração para o arame sólido e a amostra 625+Mg	41
Tabela 5-4: Ensaio de impacto para o arame sólido e a amostra 625+Mg	41
Tabela 5-5: Resultados obtidos para ensaio de taxa de deposição metálica com 230 A	42

Tabela 5-6: Resultados obtidos para ensaio de taxa de deposição metálica com 300 A	43
Tabela 5-7: Resultados obtidos para ensaio de taxa de deposição metálica com 300 A	43
Tabela 5-8: Resultados obtidos para ensaio de taxa de deposição metálica com 400 A	43
Tabela 5-9: Análise química para soldagem overlay	45
Tabela 5-10: Classificação das amostras conforme quantidade de ferro segundo norma API 6A	45
Tabela 5-11: Resultado do ensaio de perda de massa conforme ASTM G48 ...	46
Tabela 5-12: Resultado do ensaio de dureza conforme NACE 0175.....	48
Tabela 5-13: Espessura da ZTA.....	49
Tabela 5-14: Potencial de pite par as amostras ensaiadas.....	54

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

AWS:	American Welding Society
B.I.:	Índice de Basicidade
GMAW:	Gas Metal Arc Welding
SW:	Arame Sólido (Solid Wire)
MCW:	Arame Tubular de Núcleo Metálico (Metal Cored Wire)
ZAC:	Zona Afetada pelo Calor
HRC:	Dureza Rockwell Escala C
TDM:	Taxa de Deposição Metálica

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
CURRICULUM VITAE.....	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xii
SUMÁRIO.....	xiii
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Soldagem por arco submerso.....	2
2.1.1 Principais Características.....	3
2.1.2 Equipamentos	5
2.1.3 Fluxo.....	7
2.2 Níquel e Suas Ligas	8
2.2.1 A liga INCONEL 625.....	10
2.2.2 Soldabilidade de Ligas de Níquel	12
2.3 Arame Tubular de Núcleo Metálico	13
2.4 Corrosão por Pite	15
2.5 Corrosão sob Tensão.....	16
2.6 Normas Aplicadas	17

3	OBJETIVOS	19
4	MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1	Desenvolvimento do Arame Tubular de Núcleo Metálico	20
4.1.1	Análise da Fita	21
4.1.2	Memória de Cálculo	21
4.1.3	Processo de Fabricação.....	23
4.2	Arame Sólido	25
4.3	Fluxo para Soldagem por Arco Submerso	25
4.4	Análise Química do Arame Sólido	25
4.5	Análise Química do Metal Depositado	26
4.6	Ensaio Mecânicos	27
4.7	Avaliação da Taxa de Deposição	28
4.8	Análise de Ferro em Soldagem Overlay Conforme API 6A	30
4.9	Perda de Massa e Formação de Pite no Metal de Adição Conforme ASTM G48	32
4.10	Avaliação da Susceptibilidade da Corrosão Sob Tensão em Junta de Topo Conforme NACE 0175	33
4.10.1	Metal Base	33
4.10.2	Soldagem da Tubulação.....	34
4.10.3	Medição de Dureza	35
4.11	Determinação do Potencial de Pite Através da Curva de Polarização Cíclica para regiões do Metal de Adição	36
4.11.1	Amostras Ensaadas.....	36
4.11.2	Equipamento e Parâmetros	37

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1	Análise Química do Arame Sólido	39
5.2	Análise Química do Metal Depositado	40
5.3	Ensaio Mecânicos	41
5.4	Avaliação da Taxa de Deposição	42
5.5	Análise de Ferro em Soldagem Overlay Conforme API 6A	45
5.6	Perda de Massa e Formação de Pite no Metal de Adição Conforme ASTM G48	46
5.7	Avaliação da Susceptibilidade da Corrosão Sob Tensão em Junta de Topo Conforme NACE 0175	47
5.8	Determinação do Potencial de Pite Através da Curva de Polarização Cíclica para regiões do Metal de Adição	51
6	CONCLUSÕES.....	55
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	56
8	BIBLIOGRAFIA.....	57

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Atualmente, observa-se um crescente emprego das ligas à base de níquel na indústria petrolífera mundial, com seu campo de aplicação em expansão. Ligas do tipo INCONEL 625 também se enquadram nesse cenário, sendo utilizadas desde o revestimento de peças metálicas até soldagem de união de tubulações.

Paralelamente à aplicação das ligas de níquel, o setor industrial busca cada vez mais aumentar a produtividade de seus processos de soldagem. Para tanto, a opção do uso de arames tubulares de núcleo metálico (metal cored) surge como alternativa para suprir essa necessidade.

Combinando a demanda pelas ligas à base de níquel com a alta produtividade dos arames tubulares de núcleo metálico, este trabalho pretende avaliar se é possível a fabricação de um arame metal cored de liga INCONEL 625 que mantenha as mesmas propriedades ou apresente propriedades superiores a um arame sólido de mesma composição química. O desenvolvimento deste arame foi pensado para soldagem por arco submerso, devido à alta produtividade associada a este processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Soldagem por arco submerso*

A soldagem por arco submerso é um processo no qual o arco elétrico estabelecido entre o arame e o metal de base permanece sob uma camada de um material fundente, o qual é chamado de fluxo, cuja principal função é de proteger o metal de solda contaminações e efeitos da atmosfera, além de atuar como isolante térmico e agir como desoxidante, limpando o metal de solda. (Okumura & Taniguchi, 1982) (Paranhas, 1992).

O processo de soldagem utilizando um fluxo granulado em combinação com um arame de alimentação contínua remonta ao ano de 1935, utilizado na indústria naval e na fabricação de tubos. Com a automatização do processo, entre os anos de 1939 a 1945, seu uso foi intensificado permitindo a construção em larga escala de equipamentos pesados, durante a segunda grande guerra. Após este período, o processo foi consolidado, juntamente com o desenvolvimento de melhores fluxos e melhores equipamentos de soldagem (Paranhas, 1992).

Neste processo de soldagem, o calor gerado pelo arco elétrico estabelecido entre o arame e o metal de base ocasiona a fusão de parte do fluxo juntamente com a ponta do eletrodo. A zona em que ocorre a soldagem fica sempre envolta e protegida pelo fluxo, o qual também atua como escorificante (Paranhas, 1992).

A Figura 2-1 mostra o esquema deste processo de soldagem, especificando os principais componentes e materiais.

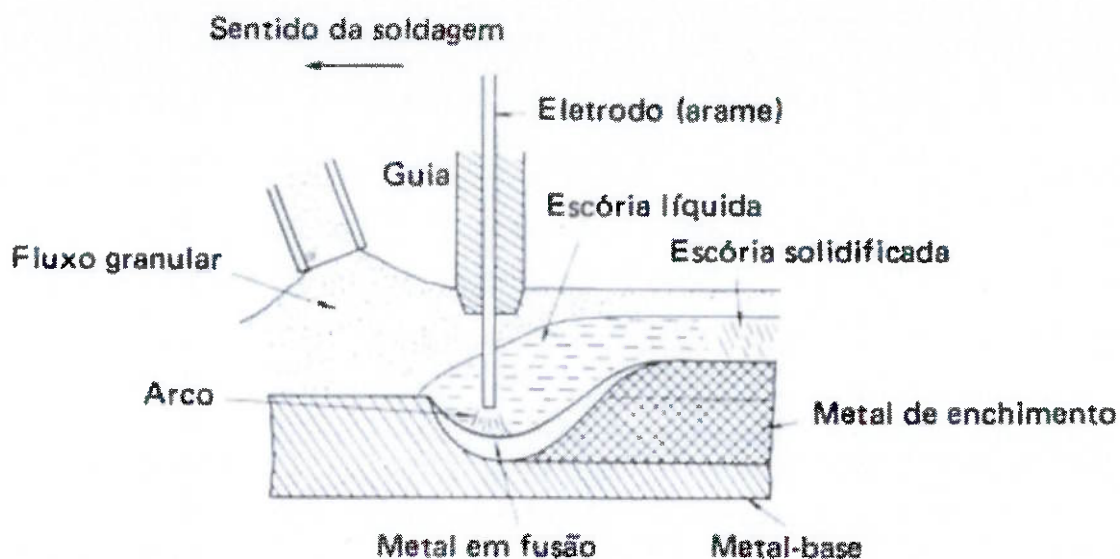


Figura 2-1: Princípio de funcionamento do processo de soldagem por arco submerso (Okumura & Taniguchi, 1982)

Nesta figura, pode-se observar que o eletrodo (arame) é alimentado continuamente passando por uma guia, levando o arame até o metal de base. Neste exemplo, o fluxo também é constantemente alimentado durante o processo, acompanhando o sentido da soldagem, garantindo que durante toda a operação o arco elétrico fique sempre coberto pelo fluxo.

2.1.1 Principais Características

A soldagem por arco submerso apresenta características e vantagens bastante típicas. Como o arco elétrico e a poça de fusão estão totalmente protegidos pelo fluxo, o metal depositado ao final do processo apresenta elevada qualidade (Okumura & Taniguchi, 1982).

Outra característica deste processo de soldagem é o seu alto rendimento. A perda de metal por projeção não ocorre na soldagem por arco submerso, o que diminui consideravelmente a perda de material. Normalmente

os arames possuem diâmetros elevados, comportando correntes de soldagem elevadas quando comparadas com outros processos de soldagem, resultando em altas taxas de deposição. Essas características tornam a soldagem por arco submerso um processo econômico e rápido (Okumura & Taniguchi, 1982) (Paranhas, 1992).

As propriedades mecânicas do metal de solda resultantes do processo de soldagem por arco submerso são função das características do metal de base e da combinação arame-fluxo utilizada na soldagem. No geral, as soldas feitas por este processo normalmente apresentam boa tenacidade ao impacto, boa ductilidade, boa uniformidade e acabamento do cordão de solda (Okumura & Taniguchi, 1982) (Paranhas, 1992).

O processo de soldagem pode ser semi ou totalmente automatizado. A automatização do processo não requerer treinamento especializado do operador, e este tem menor influência no resultado da qualidade final da junta soldada em comparação com os outros processos de soldagem (Okumura & Taniguchi, 1982) (Paranhas, 1992).

A principal limitação do arco submerso diz respeito à posição de soldagem, que só pode ser realizada na plana ou na horizontal, devido à necessidade do fluxo permanecer sobre a poça de fusão durante todo o processo. Para a soldagem circunferencial, como a de tubos e cilindros, torna-se necessário o uso de posicionadores (Paranhas, 1992).

2.1.2 Equipamentos

Os equipamentos básicos referentes ao processo de soldagem por arco submerso estão representados na Figura 2-2.

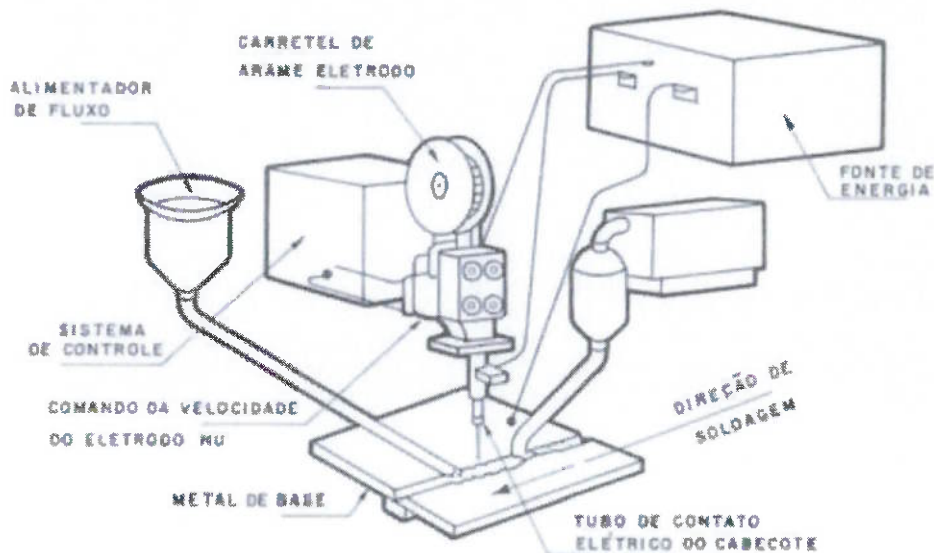


Figura 2-2: Equipamentos básicos referentes ao processo de soldagem por arco submerso (Paranhas, 1992)

As fontes de energia podem ser de corrente alternada ou corrente contínua. As fontes de alimentação de corrente alternada geralmente apresentam custos mais acessíveis e são facilmente operáveis. Porém, estas fontes exigem um controle mais preciso da velocidade de alimentação do arame. Já com as fontes que operam com corrente contínua é possível trabalhar com velocidades de arame constante. O processo de corrente contínua é empregado na soldagem de chapas finas de aço e a altas velocidades. As fontes podem ainda ser do tipo potencial constante ou corrente constante. Para as fontes de potencial constante, determina-se uma tensão no equipamento e as correções da velocidade de alimentação do eletrodo são feitas automaticamente pelo sistema, de modo que a tensão determinada

permaneça sempre a mesma, e a intensidade de corrente é ajustada na fonte de energia. Já as fontes de corrente constante, a intensidade da corrente que é predeterminada, mantendo fixa a velocidade de alimentação do arame, sendo a tensão que sofre ajustes. As fontes de energia adequadas para a soldagem por arco submerso tem a capacidade variando de 600 a 1500 A (Okumura & Taniguchi, 1982) (Paranhas, 1992).

Outro equipamento básico para este processo de soldagem é o cabeçote de solda, que é composto de um motor-redutor, rolos de pressão e guias para alimentar o arame até a peça. A corrente é transmitida ao eletrodo através de um tudo de contato elétrico. O sistema ainda pode possuir um carretel de arame, para fixar a bobina do consumível de soldagem (Paranhas, 1992).

O fluxo para a soldagem por arco submerso é alimentado por um tubo conectado a um reservatório, normalmente acoplado à tocha ou ao cabeçote (Okumura & Taniguchi, 1982) (Paranhas, 1992).

O movimento do sistema pode ser realizado de duas maneiras; ou o cabeçote se move ao longo da peça a ser soldada ou a peça que realiza o movimento enquanto o cabeçote permanece fixo (Paranhas, 1992). A Figura 2-3 mostra os dois tipos de sistema.

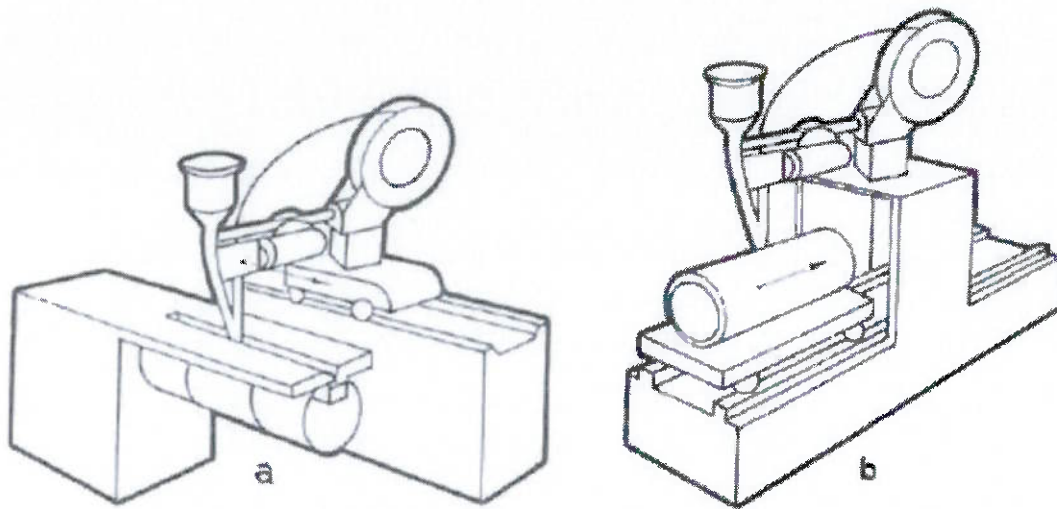


Figura 2-3: Soldagem em peças circulares. (a) cabeçote se movimentando e (b) cabeçote fixo (Paranhas, 1992)

2.1.3 Fluxo

Os fluxos para soldagem por arco submerso devem ser projetados para resistirem as correntes de soldagem bastante elevadas características do processo. Para efeitos de classificação, existem dois grandes grupos, os fluxos fundidos e os fluxos aglomerados (Okumura & Taniguchi, 1982) (Paranhas, 1992).

Os fluxos fundidos são obtidos através de minérios que passam pelo processo de fusão, solidificação e moagem a uma granulação uniforme, para garantir uma composição química estável e, por consequência, manter o processo de soldagem com qualidade. Nos fluxos fundidos, não há elementos de ligas que se fundem ao cordão de solda durante o processo, sendo o arame a única fonte para prover os elementos necessários ao processo. Já os fluxos aglomerados são obtidos através da mistura a seco de minerais e metais na forma metálica, com a adição de silicatos para que ocorra a agregação destes componentes. O elemento cromo possui forte tendência a oxidação. Para

compensar esta perda de cromo durante a soldagem de arames Cr-Ni e Cr-Ni-Mo, fluxos ligados com cromo são bastante usuais nos fluxos aglomerados (Okumura & Taniguchi, 1982) (The Avesta Welding Manual, 2007).

Baseado na relação entre os óxidos básicos e ácidos obtém-se o índice de basicidade, ou basicity index (B.I.) do fluxo. A basicidade do fluxo provoca grande impacto nas propriedades mecânicas do metal de solda, particularmente na tenacidade ao impacto. Quanto maior a basicidade, menor será a quantidade de óxidos e outras inclusões na junta soldada, resultando em uma maior tenacidade ao impacto (The Avesta Welding Manual, 2007).

2.2 Níquel e Suas Ligas

O níquel é um elemento bastante versátil que irá formar ligas com praticamente qualquer metal. Apresenta grande solubilidade com os elementos ferro e cromo, o que torna possível a combinação de várias ligas diferentes. A microestrutura do níquel é a cúbica de face centrada, que pode ser fortalecida através dos mecanismos de endurecimento por solução sólida e precipitação de carbonetos (ASM Metals Handbook: "Welding, Brazing and Soldering", 1993).

O endurecimento por solução sólida ocorre na matriz de níquel pelos elementos cobalto, ferro, cromo, molibdênio, tungstênio, vanádio, titânio e alumínio. Temperaturas acima de sessenta por cento da temperatura de fusão, o endurecimento passa a ser influenciado pela difusão e elementos mais pesados com menor difusão, como o molibdênio e o tungstênio, passam a ser mais efetivos para este mecanismo (ASM Metals Handbook: "Welding, Brazing and Soldering", 1993).

Já no mecanismo de endurecimento por precipitação, o níquel não é um formador de carbonetos. Neste caso, carbono reage com outros elementos químicos que se ligam ao níquel, formando carbonetos, que podem ser prejudiciais ou não para as propriedades das ligas (ASM Metals Handbook: "Welding, Brazing and Soldering", 1993).

Os carbonetos mais frequentes encontrados em ligas de níquel são MC, M_6C , M_7C_3 , e $M_{23}C_6$ (onde M é o metal do carboneto). O carboneto do tipo MC usualmente grande e encontra-se disperso de maneira aleatória na matriz, aplicação que normalmente não é desejável. Os carbonetos M_6C estão localizados nos contornos de grãos, sendo utilizados para controlar o tamanho de grão. Desta forma, a quantidade, tamanho e distribuição afetam as propriedades mecânicas da liga. Os carbonetos M_7C_3 formam-se de forma intergranular e precipitam-se em pequenas quantidades. Em exposições a altas temperaturas, a precipitação pode ocorrer em grandes quantidades, além da formação contínua nos contornos de grãos, fragilizando a liga. Os carbonetos $M_{23}C_6$ se precipitam com frequência nos contornos de grão, influenciando as propriedades mecânicas das ligas de níquel, quando em temperaturas de 760°C a 980°C, causando precipitação angular de carbonetos (ASM Handbook: "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials").

Sobre as ligas níquel-cromo-ferro, sua aplicação é baseada na presença de cromo e outros elementos de liga. O cromo é um elemento essencial para conferir resistência à corrosão à liga, sendo normalmente encontrado na concentração de 15% a 30%. Os outros elementos, se presentes, estão normalmente encontrado em níveis variando entre 3% a 20%, e estão

relacionados com o aumento da resistência à deformação em altas temperaturas. As ligas de níquel-cromo-ferro que apresentam estas características são comumente conhecidas como ligas INCONEL (DONACHIE, 1984) (Buso, 1999).

O níquel e as ligas de níquel são utilizados em uma grande variedade de aplicações, a maioria as quais envolvem resistência à corrosão e/ou resistência ao calor. Pode-se citar o uso em turbinas de aviões (câmeras de combustão, eixos), sistemas de usinas nucleares (eixos, hastes de válvulas), processamento de metais (ferramentas de trabalho a quente), entre outros (ASM Handbook: "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials").

2.2.1 A liga INCONEL 625

O desenvolvimento da liga INCONEL 625 teve o seu início na década de 50 para atender a demanda recém-percebida na época de materiais para tubulação com alta resistência, principalmente para linhas de vapor. Após vários anos de pesquisa sobre como os elementos afetariam as propriedades e a forma de fabricação desta liga, o pedido de patente foi apresentado em 24 de janeiro de 1962 (Eiselstein & Tillack, 1991). A composição típica da liga INCONEL 625 está indicada na Tabela 2-1.

Tabela 2-1: Composição típica da liga INCONEL 625 (%) (Eiselstein & Tillack, 1991)

Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	C	Si	Al	Ti	Mn	S
61,0	21,5	9,00	3,60	2,00	0,05	0,20	0,20	0,20	0,20	0,001

Através de vários experimentos, foram determinados os níveis ótimos de nióbio, cromo e molibdênio. A solubilidade do nióbio na liga é em torno de 2,50% e aumenta com a diminuição de cromo e molibdênio. A função do nióbio

está relacionada com a tenacidade desta liga. O molibdênio aumenta a resistência da matriz de níquel e pode sozinho ou através da interação com o nióbio aumentar a resposta ao envelhecimento. A adição de cromo em níveis entre 16% e 22% também aumentam a resistência da matriz. (Eiselstein & Tillack, 1991). O molibdênio, o cromo e especialmente o nióbio conferem grande impacto na resistência a fluência desta liga, como mostra a Figura 2-4.

O alumínio e o titânio foram intencionalmente mantidos em baixas concentrações para minimizar o endurecimento por envelhecimento da liga. Outra vantagem dos baixos teores de alumínio e titânio é melhorar a soldabilidade desta liga (Eiselstein & Tillack, 1991).

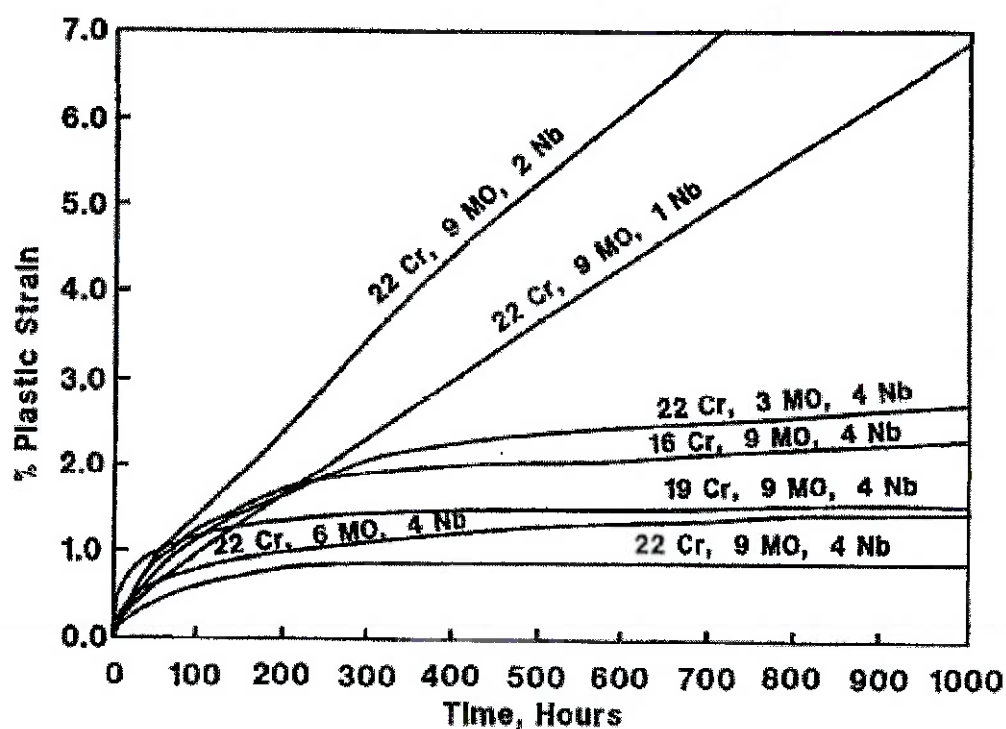


Figura 2-4: Testes de fluência realizados a 816°C/52 Mpa (Eiselstein & Tillack, 1991)

Obter uma liga que apresentasse excelente soldabilidade foi um dos objetivos durante o desenvolvimento da liga INCONEL 625. A presença de teores relativamente altos de nióbio criou uma preocupação sobre a resistência

à formação de trincas durante a exposição a tratamentos térmicos pós-soldagem a temperaturas intermediárias. Para avaliar esta propriedade, vários testes de soldagem foram realizados durante o desenvolvimento desta liga. Soldagens circulares foram testadas e expostas a 649°C/1000h, reparadas por soldagem e então expostas a mais tratamentos térmicos de 649°C sem apresentar trincas. Aplicações em campo e experiências coletadas a mais de 25 anos reforçam que a liga 625 é uma das superligas mais soldáveis do mercado. Por vários anos, a liga INCONEL 625 vem sendo usada para soldar estruturas de ligas contendo 9% de níquel, comuns em aplicações criogênicas devido a sua alta resistência, ductilidade e tenacidade ao impacto (Eiselstein & Tillack, 1991).

2.2.2 Soldabilidade de Ligas de Níquel

As ligas de níquel são susceptíveis a formação de trincas de solidificação durante a soldagem. Este fenômeno ocorre devido à solidificação da fase austenita, resultando em uma intensa segregação de elementos de liga e de impurezas para os contornos de grão durante a solidificação. Esta microsegregação de elementos de liga e de impurezas abaixa a temperatura solidus. Desta forma, apesar de parecer completamente solidificado, o cordão de solda apresenta filmes de material líquido em seu interior. Se esta região líquida estiver distribuída ao longo dos contornos de grão como um filme contínuo, as tensões de solidificação não conseguirão ser acomodadas e os contornos de grão irão se separar, formando as trincas (Dupont, Lippold, & Kiser, 2009). A Figura 2-5 apresenta uma trinca de solidificação em um liga de níquel.

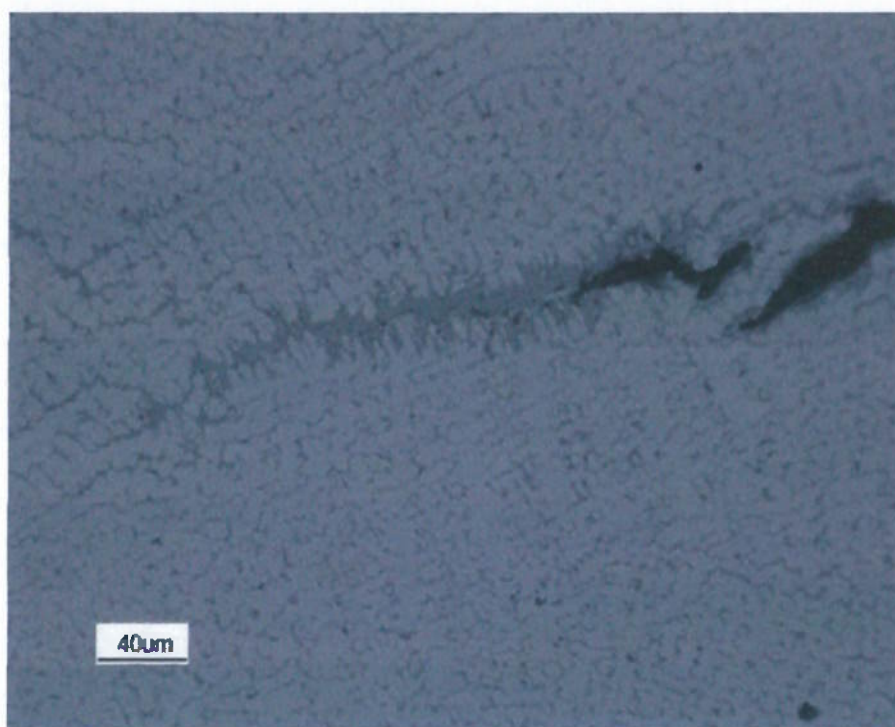


Figura 2-5: Exemplo de trinca de solidificação em uma liga a base de níquel (Dupont, Lippold, & Kiser, 2009)

2.3 Arame Tubular de Núcleo Metálico

O desenvolvimento do arame tubular de núcleo metálico surgiu da necessidade da indústria de aumentar a produtividade dos processos de soldagem. O objetivo seria atingir o alto nível de produtividade dos arames tubulares (flux cored) mantendo as elevadas taxas de deposição dos arames sólidos para soldagem GMAW (Myers, 2002).

A tubulação metálica do arame tubular de núcleo metálico conduz toda a corrente elétrica do processo de soldagem, aumentando assim a densidade de corrente (A/mm^2) quando comparada ao processo de soldagem GMAW com os mesmos parâmetros elétricos, o resultado deste efeito é uma maior taxa de deposição metálica do processo (Myers, 2002). A Figura 2-6 representa a

característica de maior densidade de corrente em um arame tubular de núcleo metálico em comparação ao arame sólido.

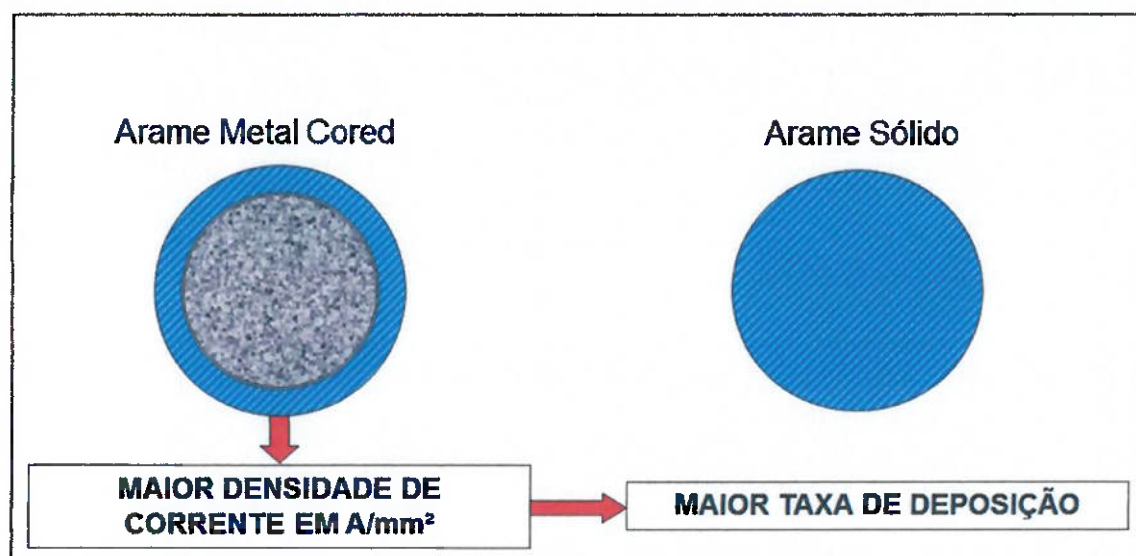


Figura 2-6: Densidade de corrente em um arame tubular de núcleo metálico

Os componentes internos dos arames tubulares de núcleo metálico são principalmente elementos de liga, como cromo, níquel, molibdênio entre outros. Em arames de aço, o balanço desta composição se dá com o ferro. Podem-se encontrar também pequenas adições de elementos estabilizadores de arco elétrico, como sódio e potássio (Myers, 2002).

Outra importante característica dos arames tubulares de núcleo metálico é a sua versatilidade para o desenvolvimento de diversas ligas diferentes. Como o núcleo metálico pode ser formulado, do ponto de vista de fabricação torna-se muito fácil desenvolver ligas com composição química diferentes, alterando apenas a quantidade e o tipo de elementos metálicos presentes. Para visualizar a versatilidade oferecida por este processo, é possível fabricar desde um aço carbono de 1,0% de manganês até uma liga de aço inoxidável baixo carbono

com 22Cr-12Ni (Moreno, 2012). A Figura 2-7 mostra o perfil de um arame metal cored.

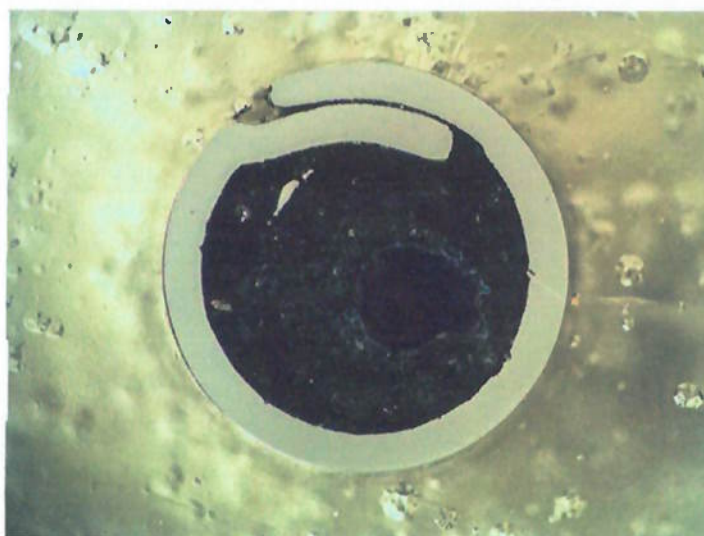


Figura 2-7: Perfil de um arame metal cored (Moreno, 2012)

A comparação entre o arame sólido e o arame tubular de núcleo metálico para o ganho de velocidade de deposição, utilizando os mesmos parâmetros de soldagem, varia com a corrente aplicada e com o processo submetido. Os valores que a literatura apresenta indicam ganhos de 15% a 30%.

2.4 Corrosão por Pite

A corrosão por pite é uma forma de corrosão localizada, em que os agentes corrosivos atacam a superfície ocasionando a formação de pites. Este tipo de corrosão pode ser bastante destrutivo, uma vez que o pite perfura a estrutura metálica, ocasionando estragos em seu interior que não são evidentes na superfície (Sedriks, 1996).

A propagação do pite envolve a dissolução do metal e manutenção de um ambiente ácido na superfície do pite, através da hidrólise dos íons de metal dissolvidos. A reação anódica de dissolução do metal na superfície do pite, $M \rightarrow$

$M^{+n} + Ne$, é balanceada pela reação catódica na superfície adjacente, $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$. O aumento da concentração de M^+ resulta na migração dos íons cloreto (Cl^-) para manter a neutralidade. O cloreto metálico formado, M^+Cl^- , é hidrolisado pela água, pela reação $MCl + H_2O \rightarrow MOH + H^+Cl^-$ (Sedriks, 1996). A Figura 2-8 representa a forma de propagação de um pite, evidenciando o mecanismo descrito.

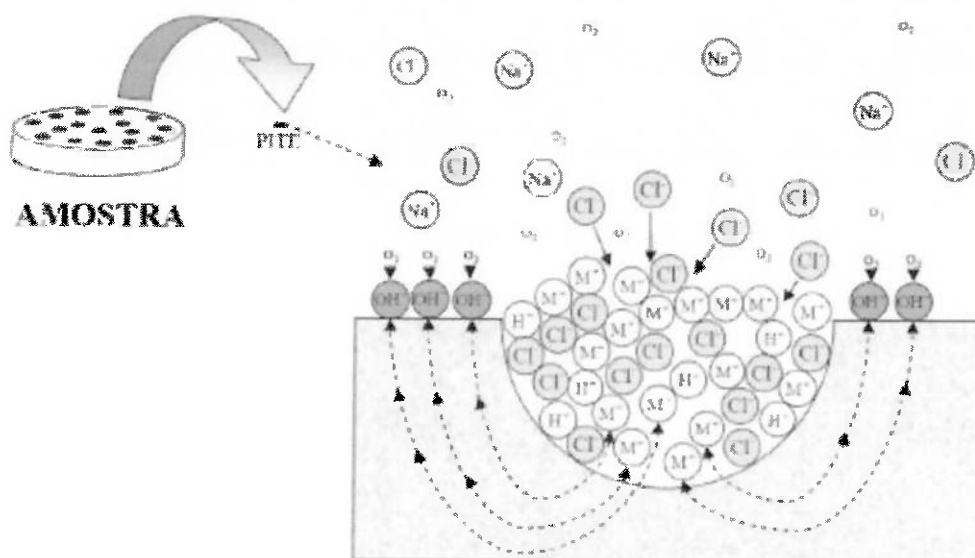


Figura 2-8: Representação da propagação de pite (Zanetic, 2001)

2.5 Corrosão sob Tensão

A corrosão sob tensão deteriora o material através da combinação entre tensões residuais ou aplicadas ao equipamento e a presença de um meio corrosivo, que ocasionam uma fratura em um tempo mais curto do que a soma das ações isoladas da tensão e da corrosão. As tensões residuais normalmente são provenientes da operação de soldagem ou de deformação a frio, como estampagem e o dobramento. Já as tensões aplicadas são decorrentes das condições de operação do equipamento como, por exemplo, a pressurização de tubulações (Gentil, 1996).

Uma característica importante da corrosão sob tensão é que nesta não se observa perda de massa significativa. O material aparenta estar em boas condições até o momento da ruptura. O comportamento da falha tem características de um material frágil, embora a liga metálica seja apresentem comportamento dúctil. Além disso, as trincas se formam em tensões relativamente baixas, abaixo do limite de resistência à tração (Gentil, 1996) (Callister, 2002).

Sobre o mecanismo de atuação da corrosão sob tensão, duas etapas são envolvidas no processo. A primeira etapa diz respeito à nucleação da trinca, causada pela nucleação de pites ou à emergência de discordâncias na superfície do metal, expondo regiões ativadas do cristal ao ataque do meio corrosivo. A segunda etapa é a propagação da trinca, que pode ocorrer de forma intergranular ou intragranular (Gentil, 1996).

2.6 Normas Aplicadas

A soldagem dos corpos de provas para os ensaios serão realizados conforme as orientações da norma Petrobrás N-133 revisão M.

Para a qualificação e classificação da análise química dos consumíveis de soldagem, será utilizada a norma ASME SFA-5.14.

Os corpos de prova para os ensaios mecânicos serão confeccionados conforme a metodologia descrita na ASTM A370.

Para a soldagem do tipo overlay, avaliar-se-á a susceptibilidade à corrosão através da classificação pela quantidade de ferro no depósito de solda conforme especificação da norma API 6A.

A avaliação da tendência à corrosão sob tensão para a soldagem de juntas será mesurada conforma a norma ANSI NACE MR0175, através das medidas de dureza em determinadas regiões do cordão de solda.

A formação de pites e a taxa de corrosão serão observadas conforme metodologia indicada na norma ASTM G48.

3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é verificar a possibilidade de desenvolvimento de um arame tubular de núcleo metálico para soldagem por arco submerso de liga INCONEL 625, mantendo as mesmas características ou apresentando características superiores ao arame sólido de mesma liga.

Para alcançar este objetivo, serão realizados testes comparativos entre as amostras desenvolvidas e o arame sólido de mesma liga. Avaliar-se-á a possibilidade de alcançar a composição química do arame tubular de núcleo metálico, as características mecânicas bem como a realização de ensaios de interesse da indústria petroquímica.

Ao final deste trabalho, analisaremos se é possível desenvolver este consumível de soldagem.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Desenvolvimento do Arame Tubular de Núcleo Metálico

Esta seção do trabalho dedica-se a explicar o método de fabricação do arame tubular de núcleo metálico da liga INCONEL 625. Para tanto, especificar-se-ás a fita utilizada neste consumível de soldagem, a memória de cálculo utilizada para formular o núcleo metálico do arame tubular e explicar-se-á o processo de fabricação pelo qual as amostras foram submetidas.

O arame tubular será desenvolvido para atender a classificação de composição química da norma ASME SFA-5.14 ERNiCrMo-3, cuja composição química está indicada na Tabela 4-1. Após a soldagem, o depósito de solda resultante da combinação entre o fluxo e o arame também deve atender à composição química referente a uma liga do tipo INCONEL 625.

Tabela 4-1: Composição química requerida para o arame ERNiCrMo-3 (ASME SFA-5.14, 2013)

Elemento	(%)
C	0,10 máx.
Mn	0,50 máx.
Fe	5,00 máx.
P	0,02 máx.
S	0,015 máx.
Si	0,50 máx.
Cu	0,50 máx.
Ni	58,0 mín.
Al	0,40 máx.
Ti	0,40 máx.
Cr	20,0 – 23,0
Nb + Ta	3,15 – 4,15
Mo	8,00 – 10,0
Outros elementos	0,50 máx.

4.1.1 Análise da Fita

Para a fabricação das amostras será utilizada uma fita de níquel puro, cuja composição química está apresentada na Tabela 4-2. A análise química foi realizada por espectrometria de emissão ótica. A fita tem dimensões 10,5 mm de largura e 0,25 mm de espessura.

Tabela 4-2: Análise química da fita de níquel, em (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe	Nb	Ni
0,038	0,020	0,110	0,001	0,001	0,028	0,002	0,001	0,002	99,8

4.1.2 Memória de Cálculo

Para o estudo, foram desenvolvidas duas amostras de arame tubular de núcleo metálico. A primeira amostra, que será chamada de 625, terá como matérias-primas, pós-metálicos de cromo, molibdênio e ferro nióbio, além da fita de níquel. Porém, é sabido que o elemento cromo está sujeito a forte oxidação durante o processo de soldagem, sofrendo perdas durante a operação. Desta forma, para preservar o cromo na forma metálica no cordão de solda, foi desenvolvida uma segunda amostra, utilizando as mesmas matérias primas anteriores, adicionando-se magnésio metálico na forma de pó para que este sofra oxidação preferencial sobre o cromo. Esta amostra será chamada de 625+Mg.

Para a formulação do núcleo metálico das amostras, foi efetuada a memória de cálculo para estimar a composição química final do arame. Devido a características do processo produtivo, a taxa de enchimento (relação entre arame e fluxo) foi determinada em 36%. A análise química das matérias-primas se encontra na Tabela 4-3 e a memória de cálculo para as duas amostras está apresentada na Tabela 4-4.

Tabela 4-3: Composição química das matérias primas, em (%)

Matéria Prima	C	Si	Cr	Mo	Nb	Mg	Fe
Cromo metálico	0,04		99,5				
Molibdênio metálico	0,01			99,0			
Ferro-Nióbio	0,10	0,50			68,2		31,2
Magnésio metálico						99,9	

Tabela 4-4: Memória de cálculo para as amostras 625 e 625+Mg. O fluxo corresponde a 36% do arame. Valores em (%)

Amostra 625										
Matéria Prima	% fluxo	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Mg	Fe
Cromo metálico	58,7	0,04			99,5					
Molibdênio metálico	16,1						99			
Ferro-Nióbio	25,2	0,1	0,5					68,5		31,2
Composição Química Calculada		0,038	0,042	0,081	21,03	63,87	8,98	3,71		1,97
Amostra 625+Mg										
Matéria Prima	% fluxo	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Mg	Fe
Cromo metálico	58,7	0,04			99,5					
Molibdênio metálico	15,8						99			
Ferro-Nióbio	25,2	0,1	0,5					68,5		31,2
Magnésio Metálico	0,30								99,5	
Composição Química Calculada		0,032	0,041	0,081	21,03	63,87	8,98	3,64	0,30	1,93

A Tabela 4-4 mostra, na primeira coluna, a matéria prima que está sendo analisada, seguindo pela coluna que indica a porcentagem desta matéria prima na composição do fluxo metálico que compõe o arame tubular. A soma dessas parcelas corresponde a 100%. As colunas que contém os elementos químicos mostram a quantidade de cada elemento para a matéria prima em questão. A última linha, intitulada de "Composição Química Calculada", mostra a composição química teórica final do arame tubular de núcleo metálico, já considerando que o peso do fluxo na composição é de 36% do arame, enquanto que os 64% restante correspondem à fita de níquel, cuja composição química se encontra na Tabela 4-2.

4.1.3 Processo de Fabricação

A fabricação do arame tubular de núcleo metálico compreende duas etapas distintas, o processo de laminação e o processo de trefilação. Ao final do processo de trefilação, o diâmetro do arame tubular será o valor nominal de 2,40mm.

O processo de laminação encontra-se esquematizado na Figura 4-1. Nela, pode-se observar que a fita de níquel, alimentada continuamente na linha de produção, passa por um conjunto de dies de modelamento, com o objetivo de conformar a fita em um perfil no formato de "U", para que possa receber o fluxo metálico que se encontra armazenado em um alimentador. A alimentação do fluxo na fita em formato de "U" é realizada continuamente durante todo o processo, cuja velocidade de queda é controlada para que a taxa de enchimento de 36% seja atingida. Após a etapa de alimentação, a fita passa por um conjunto de dies de fechamento, que conferem o formato tubular ao arame, cujo diâmetro após esta etapa é de 2,80mm. Terminada esta operação, o arame segue para o processo de trefilação.

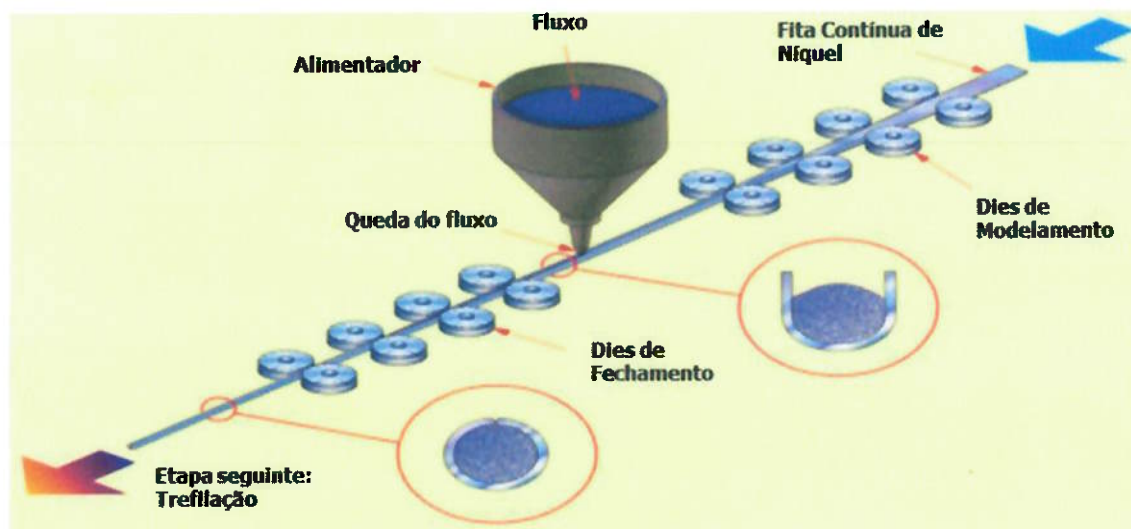


Figura 4-1: Processo de laminação do arame tubular de núcleo metálico

No processo de trefilação, o arame entra com o diâmetro de 2,80mm e passa por duas estações de redução para alcançar o diâmetro nominal final de 2,40mm. A primeira redução é realizada utilizando um die de 2,55mm. Já a segunda redução é feita através de um die de 2,38mm. A Figura 4-2 esquematiza o processo de trefilação. É utilizado sabão de trefila nas duas estações para lubrificação do processo.

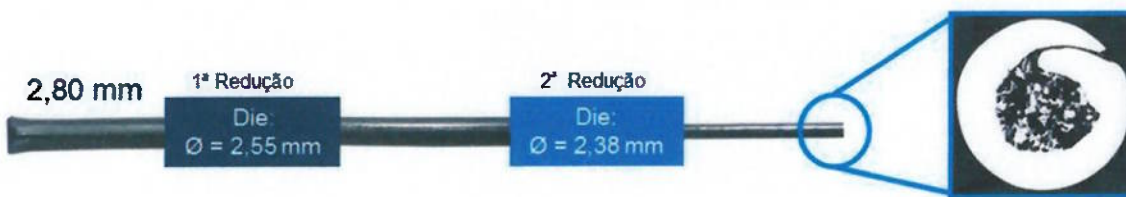


Figura 4-2: Processo de trefilação do arame tubular de núcleo metálico

Ao final do processo de trefilação, as amostras serão embobinadas em bobinas de aramado metálico de 25 kg. A Figura 4-3 apresenta uma amostra.

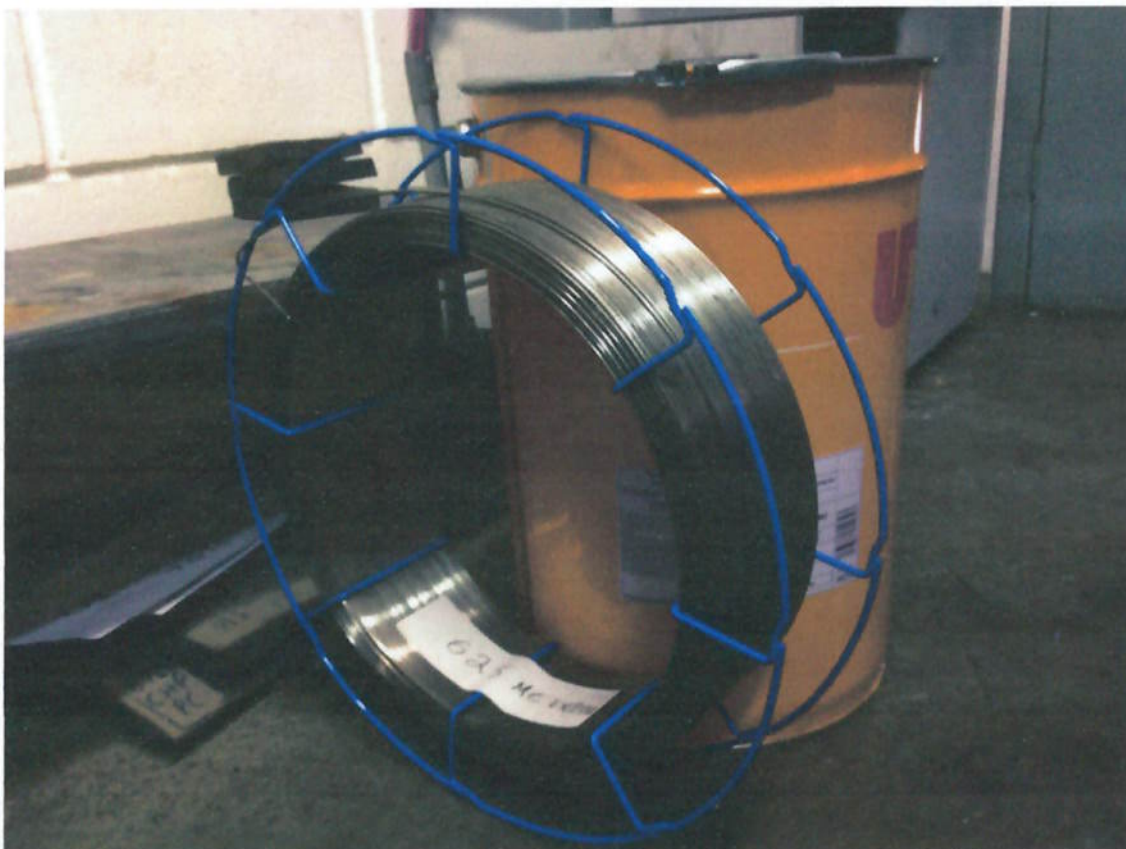


Figura 4-3: Amostra do arame tubular de núcleo metálico

4.2 Arame Sólido

O arame sólido utilizado para realizar os ensaios comparativos segue a norma ASME SFA-5.14 ERNiCuCr-3. O diâmetro deste arame é de 2,40mm. A composição química informada pelo fabricante para o metal de solda depositado com o mesmo fluxo que será utilizado neste trabalho está indicada na Tabela 4-5.

Tabela 4-5: Composição química do metal de solda depositado pela combinação entre o arame sólido e o fluxo para soldagem informada pelo fabricante (%)

C	Si	Cr	Mo	Ni	Nb	Fe
0,02	0,20	22,0	9,0	bal.	3,50	1,00

4.3 Fluxo para Soldagem por Arco Submerso

O fluxo utilizado para realizar a soldagem por arco submerso atende a norma EN ISO 14174: SA AB 2 AC. A composição química deste fluxo informada pelo fabricante está indicada na Tabela 4-6.

Tabela 4-6: Composição química do fluxo para soldagem por arco submerso informada pelo fabricante, em (%)

CaF ₂	SiO ₂ + TiO ₂	CaO + MgO	Al ₂ O ₃ + MnO	K ₂ O + Na ₂ O
24,0	8,0	13,0	52,0	2,5

4.4 Análise Química do Arame Sólido

O arame sólido será analisado conforme a norma ASTM E 1473, indicada pela norma ASME SFA-5.14, para os elementos carbono, níquel, cromo, molibdênio, nióbio e ferro. A análise química será realizada para efeitos de comparação com a memória de cálculo e os resultados do arame tubular.

4.5 Análise Química do Metal Depositado

As análises químicas dos corpos de prova foram realizadas por espectrometria de emissão ótica. O aparelho foi calibrado com um padrão de uma liga de níquel do tipo INCONEL 625.

O corpo de prova para a soldagem de todas as amostras foi realizado utilizando 28 V e 350 A sobre um metal de base de aço carbono do tipo ASTM A36. Foram soldadas quatro camadas, cada uma com três passes, para evitar o efeito da diluição do metal de base. A Figura 4-4 mostra o esquema do corpo de prova para análise química.

Serão realizadas análises químicas para as amostras do metal depositado com o arame sólido, com a experiência 625 e com a experiência 625+Mg. Através da comparação do resultado das análises químicas poderemos observar o efeito da adição de magnésio na proteção contra a oxidação do cromo.

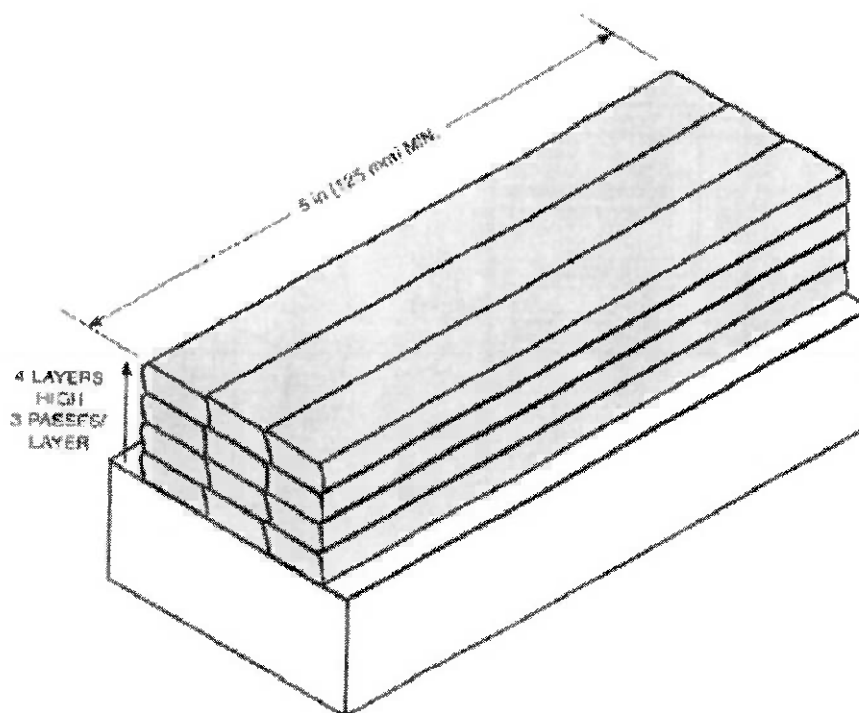


Figura 4-4: Corpo de prova para análise química

4.6 Ensaios Mecânicos

A metodologia para a realização dos corpos de prova para ensaios mecânicos será realizada conforme a norma ASTM A370. A soldagem dos corpos de prova será realizada conforme a norma ASME SFA-5.23, com tensão de 28 V e corrente de 350 A. A soldagem será realizada utilizando como metal base ASTM A36, porém com amanteigamento dos chanfros e do backing para evitar o efeito da diluição no metal de solda. O amanteigamento será realizado com eletrodo revestido de norma AWS A5.11 ENiCrMo-3. A Figura 4-5 mostra o modelo dos corpos de prova para ensaios mecânicos.

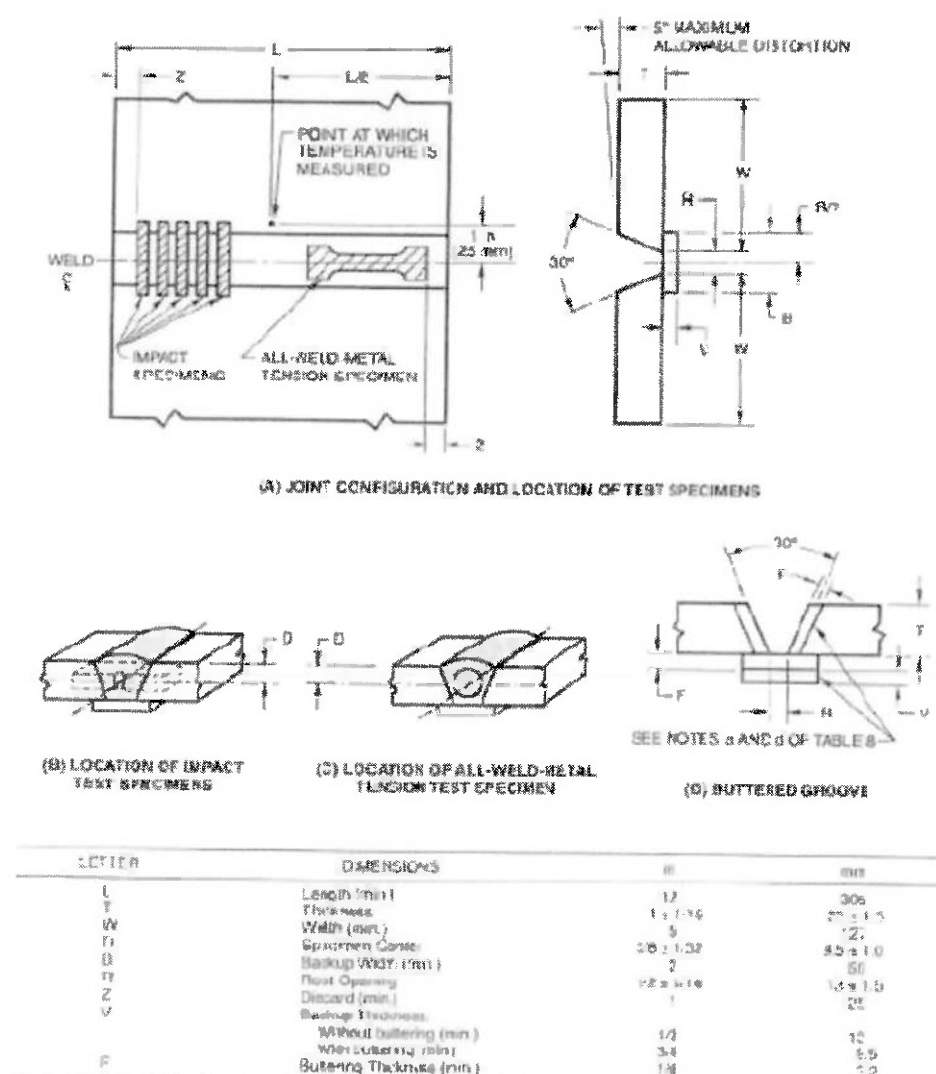


Figura 4-5: Modelo dos corpos de prova para ensaios mecânicos (AWS A5.23, 2013)

4.7 Avaliação da Taxa de Deposição

Para a avaliação da taxa de deposição, serão soldados cinco cordões de cada amostra sobre um tubo de aço carbono do tipo ASTM A36 com as mesmas condições de tensão, corrente e velocidade de soldagem para todas as amostras. Através da diferença entre o peso inicial e o peso final dos tubos de aço carbono, estimar-se-á a quantidade de metal depositado para cada amostra e assim avaliar de maneira comparativa se o arame tubular de núcleo metálico oferece maior taxa de deposição durante o processo. A equação para o cálculo da taxa de deposição se encontra na Figura 4-6.

$$TDM = \frac{m_f - m_i}{t}$$

Figura 4-6: Equação para o cálculo da taxa de deposição

Onde TDM corresponde à taxa de deposição, m_i é a massa inicial do tubo de aço carbono, m_f é a massa final do tubo de aço carbono e t é o tempo de soldagem. O valor da taxa de deposição metálica será expresso em g/min.

Para a soldagem das amostras será utilizado como parâmetros elétricos 32 V e valores de corrente de 230, 300, 350 e 380 A. A velocidade de soldagem será de 5,6 mm/s. O tempo de soldagem será cronometrado durante a operação. O tubo utilizado possui 200 mm de diâmetro e 5 mm de espessura.

A soldagem dos cordões de foi realizada mantendo o cabeçote fixo e girando o tubo sobre seu eixo. A velocidade de soldagem foi a mesma para todas as amostras, mantendo a rotação constante. O tempo de soldagem foi registrado para cada cordão de solda. O equipamento e o tubo estão demonstrados na Figura 4-7 e na Figura 4-8.



Figura 4-7: Cabeçote Fixo



Figura 4-8: Tubo de Aço Carbono para Medida da Taxa de Deposição Metálica

4.8 Análise de Ferro em Soldagem Overlay Conforme API 6A

O capítulo 6.5 da norma API 6A especifica a quantidade de ferro presente na soldagem overlay para ligas de níquel do tipo INCONEL 625. O controle de ferro no depósito é realizado para garantir a resistência à corrosão na superfície do revestimento.

A norma classifica o revestimento de acordo com a quantidade de ferro na superfície em duas categorias, classe Fe 5 para limite máximo de 5,0% de ferro e classe Fe 10 para limite máximo de 10,0% no revestimento. A Tabela 4-7 mostra a classificação conforme a norma. Para o consumível ser aprovado pela norma, a quantidade de ferro deve se enquadrar em uma dessas categorias.

Tabela 4-7: Classificação conforme composição química para a liga de níquel INCONEL 625 (API 6A, 2010)

Classe	Elemento	Composição Química % massa
Fe 5	Ferro	5,0 máx.
Fe 10	Ferro	10,0 máx.

Para realizar esta análise, será simulada uma soldagem do tipo overlay sobre chapa de aço carbono ASTM A36 com duas camadas. Serão usados os mesmos parâmetros elétricos para todas as amostras (28 V, 320 A). A soldagem será realizada mantendo o cabeçote fixo, com a peça apoiada em uma mesa móvel que se deslocará com a velocidade de 4,25 mm/s para todas as amostras soldadas.

Após a soldagem dos corpos de prova, será realizado um corte com disco abrasivo na sessão transversal da amostra para medir a altura do depósito e a

penetração do cordão em uma lupa estereoscópica. Para tanto, será lixada esta secção com lixas 120, 220, 320, 400 e 800 mesh. O polimento será feito com alumina 1,0 e 0,5 micron.

Depois de realizada a medição, superfície do metal de solda será retificada para realizar a análise química da segunda camada. A composição química da quantidade de ferro na segunda camada após a retificação será realizada por espectrometria de emissão ótica, o mesmo método utilizado para realizar a análise química do metal depositado. A Figura 4-9 mostra o corpo de prova referente ao arame sólido após a soldagem. A região destacada em vermelho corresponde à área onde será realizada a análise química e a marcação da sessão que será medida na lupa estereoscópica.

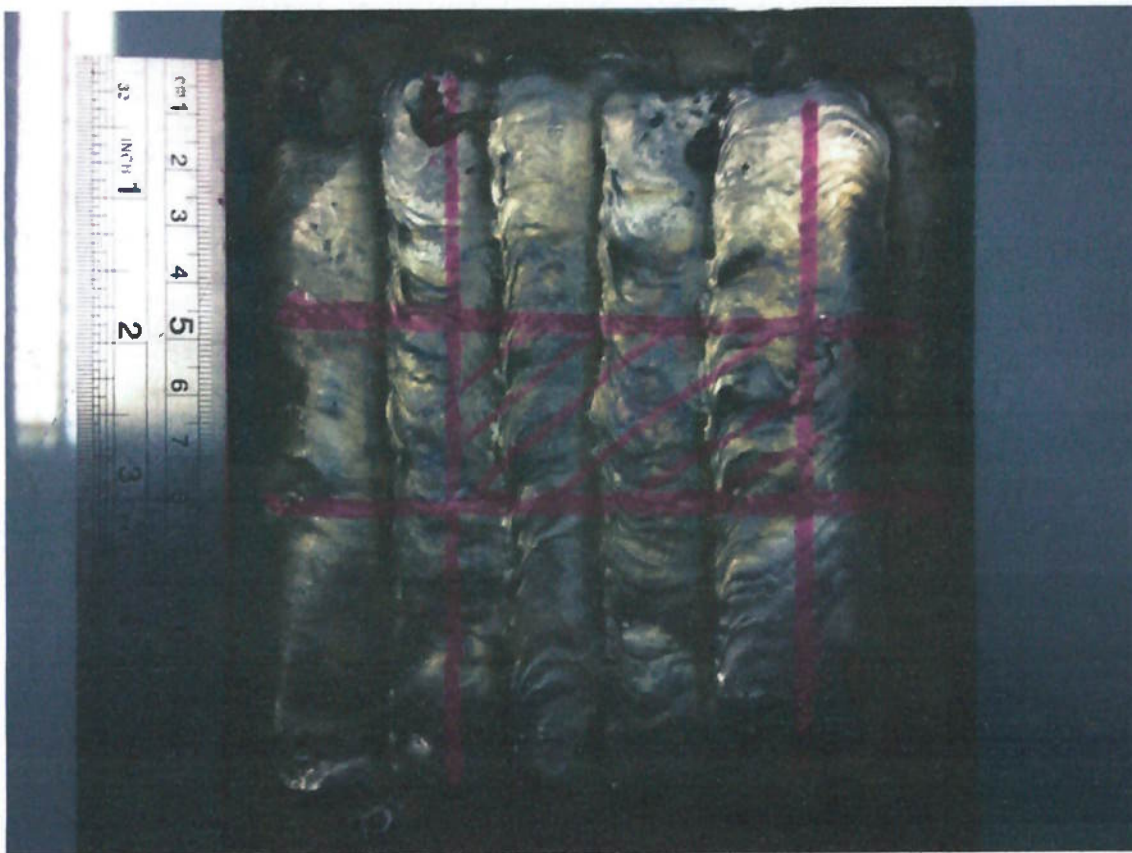


Figura 4-9: Corpo de prova para medição da altura do depósito, penetração do cordão de solda e análise de diluição do ferro

4.9 Perda de Massa e Formação de Pite no Metal de Adição Conforme ASTM G48

Para a avaliação de perda de massa e da corrosão por pite, será realizado o ensaio conforme a prática A da norma ASTM G48. O objetivo é comparar as propriedades corrosivas entre os consumíveis, verificando se há diferenças significativas.

Para a confecção do corpo de prova, serão depositadas oito camadas do metal de adição sobre uma chapa de aço inoxidável do tipo AISI 304L com dimensões 120 X 150 X 20 mm. Após a soldagem, esta chapa será usinada para obtermos corpos de prova com dimensões 25 X 50 X 15 mm. O objetivo de realiza a soldagem com seis camadas para depois usar em corpos de prova com espessura menor é evitar o efeito da diluição do metal de base, para que possamos apenas avaliar as características de corrosão do metal de adição. Os corpos de prova serão imersos em solução de 6% de FeCl_3 durante 72 horas, pesados antes e depois do ensaio para determinar a perda de massa por corrosão. A equação da perda de massa encontra-se na Figura 4-10.

$$PM = \frac{m_i - m_f}{AT \cdot t}$$

Figura 4-10: Equação de perda de massa

Nessa equação, PM corresponde a perda de massa ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$), m_i é a massa inicial (g), m_f é a massa final (g), AT é a área total do corpo de prova (cm^2) e t é o tempo do ensaio (h).

4.10 Avaliação da Susceptibilidade da Corrosão Sob Tensão em Junta de Topo Conforme NACE 0175

4.10.1 Metal Base

O metal de base utilizado para a avaliação da susceptibilidade da corrosão sob tensão será o ASTM A333 gr. 8 na forma de tubo. Trata-se de uma liga de aço-níquel cuja especificação da composição química encontra-se na Tabela 4-8. A escolha desse aço para realizar o teste foi devido à aplicação real de soldagem de tubulações na indústria offshore, utilizando o mesmo metal base e metal de adição.

A justificativa pela indústria para a escolha deste aço é devido à conjunção dos elementos de liga que proporcionam a este material elevadas propriedades mecânicas, com valores de limite de resistência da ordem de 435 MPa e limites de escoamento de 315 MPa, possibilitando o emprego de espessuras reduzidas para os equipamentos e tubulações além de condições altamente atrativas para o emprego em equipamentos que irão operar em altas pressões aliadas a baixas temperaturas, pois o alto teor do elemento níquel eleva bastante a tenacidade do material. A energia absorvida no ensaio de impacto a -196°C chega a valores da ordem de 170 J, com expansão lateral em torno de 1,8 mm. Outro requisito importante dos aços ligado ao níquel é a boa resistência à corrosão, pois estas tubulações serão submetidas a ambientes corrosivos, com elevados teores de CO_2 e H_2S .

Tabela 4-8: Composição química do aço ASTM A333 gr. 8. Valores em (%)

C	Mn	P	S	Si	Ni
0,13 máx.	0,90 máx.	0,025 máx.	0,025 máx.	0,13 – 0,32	8,40 – 9,60

4.10.2 Soldagem da Tubulação

Será realizada soldagem de tubulação de aço ASTM A333 gr. 8 para as amostras de arame sólido e de arame tubular de núcleo metálico. Para tanto, será utilizado ângulo de chanfro de $60^\circ \pm 5^\circ$ com abertura de raiz de 3 mm e face de raiz de 2 mm. O passe de raiz será realizado com eletrodo revestido de classificação AWS A5.11 ENiCrMo-3 de 2,40 mm de diâmetro. Os passes de enchimento e de acabamento serão realizados com as amostras de arame sólido e de arame tubular de núcleo metálico. A Figura 4-11 mostra o detalhe da junta soldada.

Detalhe da Junta

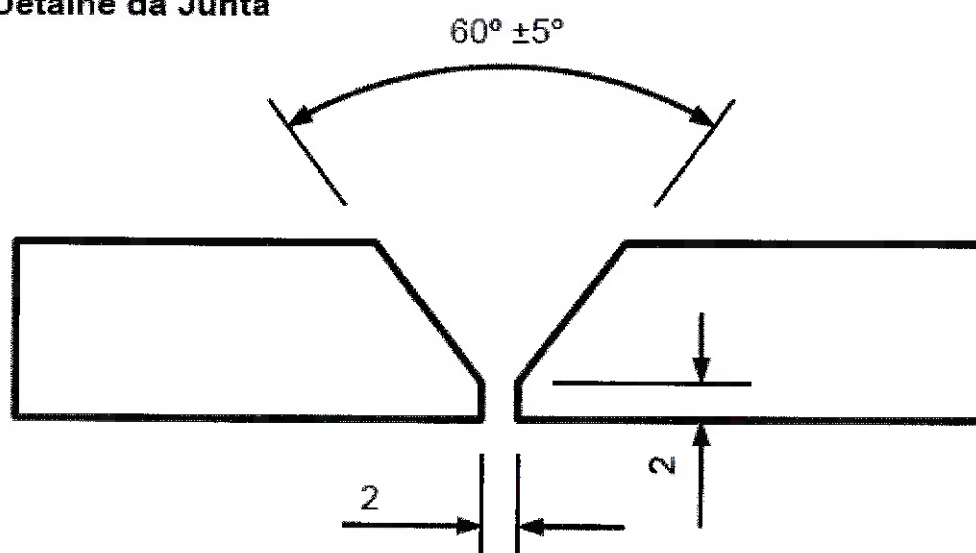


Figura 4-11: Detalhe da junta soldada (valores em mm)

A corrente e tensão utilizadas serão determinadas após a avaliação da taxa de deposição. Após a soldagem, a tubulação será cortada na seção transversal para que seja possível preparar os corpos de prova de dureza conforme NACE 0175. As seções cortadas serão lixadas com lixas 120, 220, 320, 400 e 600 mesh, polidas com alumina 1,0 e 0,5 micron e atacadas com o reagente químico Nital 10%.

4.10.3 Medição de Dureza

A medida de dureza para estimar a susceptibilidade da corrosão sob tensão será realizada conforme a norma NACE 0175. Serão realizadas medições de dureza do perfil do cordão de solda no acabamento do, no interior e no passe de raiz. As medidas serão realizadas em HRC conforme a Figura 4-12, onde a região A representa o metal de solda, a região B representa a ZAC e a região C é o metal de base. As dimensões especificadas na Figura 4-12 estão expressas em milímetros. O critério de aceitação pela norma é que todas as medições de dureza estejam abaixo de 22 HRC.

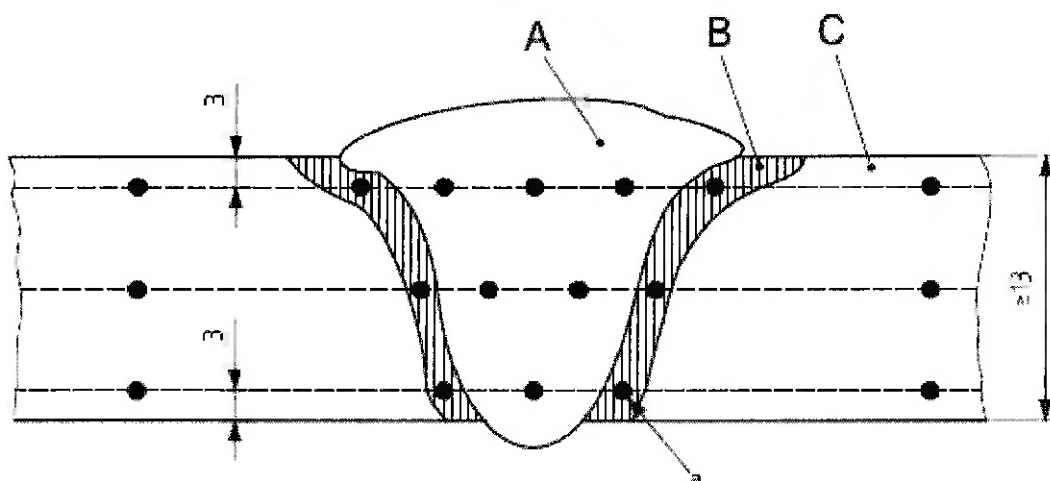


Figura 4-12: Método para medida de dureza HRC em junta de topo (NACE MR0175, 2009)

4.11 Determinação do Potencial de Pite Através da Curva de Polarização Cíclica para regiões do Metal de Adição

4.11.1 Amostras Ensaçadas

A determinação do potencial de pite para o metal de adição e o metal base será realizada nas amostras desenvolvidas para a medição da dureza na junta em topo conforme a NACE 0175, ou seja, a seção transversal da tubulação de aço ASTM A333 soldada com o arame sólido e com a amostra 625+Mg. Serão medidos os potenciais de pite no metal de adição e na ZAC da região central do cordão de solda. A Figura 4-13 mostra de maneira esquemática as regiões onde serão feitas as análises. Serão realizadas três medições do potencial de pite para cada região ensaiada, identificadas como M-A-C-1, M-A-C-2 e M-A-C-3 para os pontos do arame metal cored no metal de adição, S-A-C-1, S-A-C-2 e S-A-C-3 para os pontos do arame sólido no metal de adição.

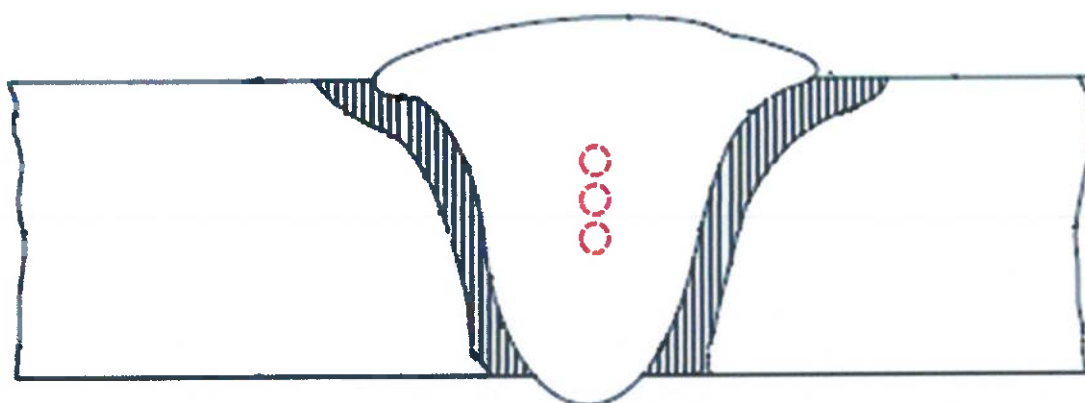


Figura 4-13: Regiões para a medição do potencial de pite através da curva de polarização potenciodinâmica. Os círculos vermelhos representam as áreas que serão analisadas

4.11.2 Equipamento e Parâmetros

O potenciostato utilizado para a realização do ensaio de polarização cíclica foi disponibilizado pelo Laboratório de Eletroquímica e Corrosão do Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Utilizou-se como eletrodo de referência eletrodo de Ag/AgCl imerso em solução saturada de KCl. A área exposta foi imersa em uma solução 3,5%NaCl acidificada com PH 2,0. O tempo de polarização antes do início do ensaio foi de 300 segundos. A velocidade de varredura de potencial adotada foi 1 mV/s. A fim de conectar o circuito elétrico, foi soldada uma pequena chapa de aço inoxidável na região oposta à superfície analisada do corpo de prova.

Foi utilizada uma célula plana modificada para este ensaio, com o intuito de reduzir a área de exposição do corpo de prova em $0,65 \text{ cm}^2$, aumentando a precisão da região ensaiada. Para tanto, a solução eletrolítica foi mantida em um bico de pipeta com orifício de exposição ao corpo de prova de 0,45 cm. O contra eletrodo e o eletrodo de referência foram posicionados na região da abertura superior do bico de pipeta, imersos na solução. Todo o suporte foi mantido unido por uma garra de laboratório. A vedação do orifício do bico de pipeta com a amostra ensaiada foi realizada utilizando silicone líquido, garantindo que não houvesse vazamento da solução eletrolítica. Antes de cada ensaio, foi realizado teste de estanqueidade utilizando água destilada para certificar a eficiência da vedação. Após cada ensaio, o silicone e o resíduo de silicone no corpo de prova foi removido utilizando-se acetona. As Figura 4-14 e Figura 4-15 mostram o equipamento utilizado e a disposição dos elementos na célula plana modificada.

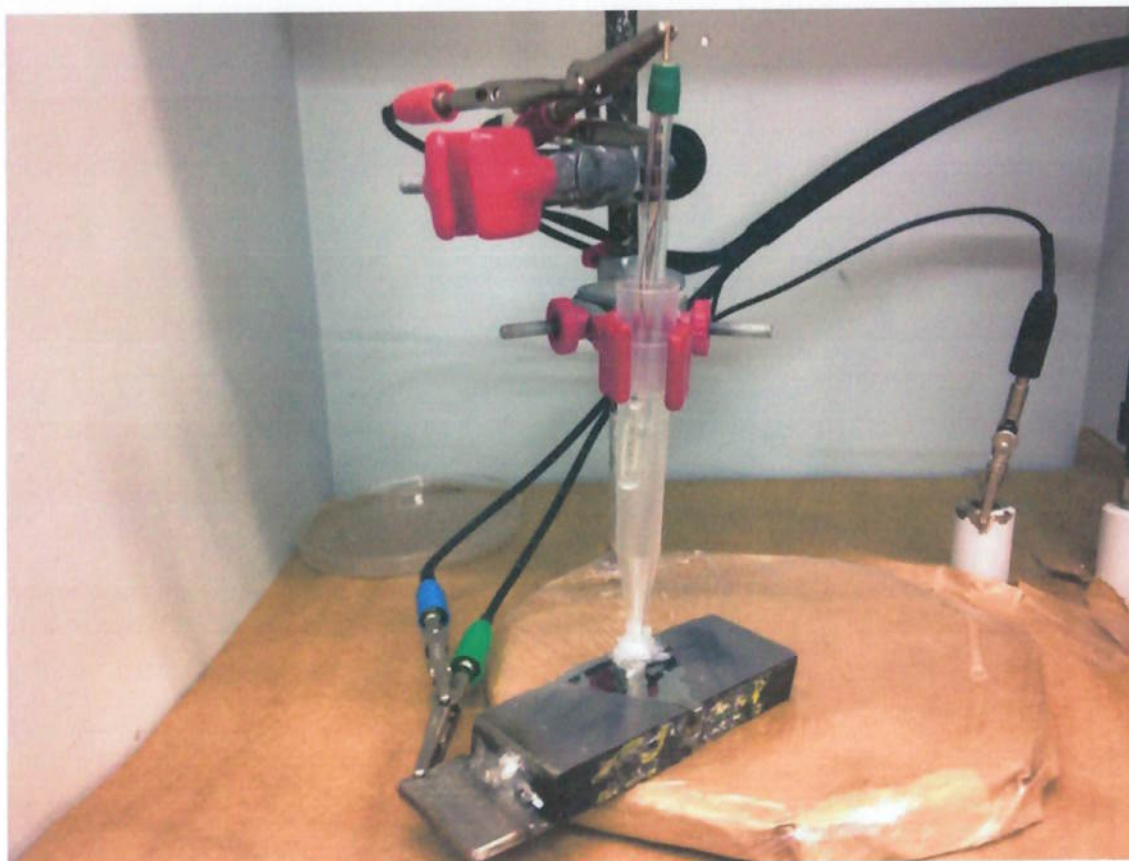


Figura 4-14: Célula plana modificada para ensaio de polarização cíclica



Figura 4-15: Detalhe mostrando a ligação do eletrodo ao corpo de prova, a vedação de silicone e o bico de pipeta

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise Química do Arame Sólido

O resultado da análise química do arame sólido realizado por via úmida se encontra na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Análise química do arame sólido

Elemento	(%)
Fe	0,24
Ni	64,0
Cr	22,5
Mo	8,7
Nb	3,65
C	0,012

Em comparação com a memória de cálculo realizada para as amostras 625 e 625+Mg, pode-se notar que a composição dos elementos de liga são aproximadamente iguais, com exceção do cromo que se encontra 1,00% abaixo. Outro destaque é a quantidade de ferro, que no arame sólido apresenta quantidades muito inferiores do que a calculada para as amostras de arame tubular de núcleo metálico. Esse aumento na quantidade de ferro na memória de cálculo dos arames tubulares de núcleo metálico é devido à matéria prima ferro-nióbio, que é usada como única fonte de nióbio para atingir a composição química esperada.

5.2 Análise Química do Metal Depositado

A Tabela 5-2 apresenta o resultado de composição química do metal depositado para o arame sólido e as amostras 625 e 625+Mg.

Tabela 5-2: Análise química dos depósitos de solda

Material	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Fe	%Nb
Arame sólido	0,028	0,35	0,17	0,011	0,006	21,15	8,65	2,08	3,33
625	0,028	0,30	0,19	0,008	0,007	19,10	8,61	3,21	3,83
625+Mg	0,029	0,31	0,17	0,009	0,007	20,92	8,23	3,19	3,42

Pela análise dos resultados, percebe-se que a amostra 625 não atingiu o teor mínimo de cromo no metal depositado. Apesar da memória de cálculo para esta amostra apontar uma composição teórica de 21,03%, a oxidação do cromo durante a soldagem resultou em uma menor composição no metal de solda. Entretanto, pode-se observar na amostra 625+Mg que a adição de magnésio foi efetiva em proteger o cromo da oxidação preferencial, atingindo a composição química esperada para uma liga INCONEL 625. Como a amostra 625 não obteve resultado satisfatório, não realizaremos os demais testes com esta amostra.

Outra análise a ser realizada é sobre o teor de ferro. Apesar das amostras 625 e 625+Mg apresentarem maior composição de ferro na análise química do depósito de solda em comparação ao arame sólido, o aumento do teor de ferro no depósito dessas amostras foi relativamente menor do que o aumento encontrado no depósito do arame sólido, quando consideramos a quantidade de ferro nas memórias de cálculo e na análise química do arame sólido (1,97% para 625 e 1,93% para 625+Mg conforme Tabela 4-4 e 0,24%

para o arame sólido, conforme Tabela 5-1). Isto pode indicar menor interação do metal de base com o depósito de solda.

5.3 Ensaios Mecânicos

Os resultados dos ensaios mecânico realizados para os corpos de prova do arame sólido e do arame 625+Mg encontram-se nas tabelas Tabela 5-3 e Tabela 5-4. Os valores marcados com (*) não foram considerados para o cálculo da média de tenacidade ao impacto.

Tabela 5-3: Ensaio de tração para o arame sólido e a amostra 625+Mg

Material	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
Arame Sólido	475	716	32
625+Mg	450	724	38

Tabela 5-4: Ensaio de impacto para o arame sólido e a amostra 625+Mg

Material	Temperatura de Ensaio	C1 (J)	C2 (J)	C3 (J)	C4 (J)	C5 (J)	Média (J)
Arame Sólido	- 45°C	68	68	60*	75*	65	67
625+Mg	- 45°C	67*	69	74	70	86*	71

Pode-se observar que a amostra 625+Mg não sofreu nenhuma deterioração dos valores mecânicos quando comparada com o arame sólido. Isto indica que o processo de fabricação e soldagem do arame tubular de núcleo metálico não prejudica nas propriedades mecânicas do metal depositado para a liga INCONEL 625.

5.4 Avaliação da Taxa de Deposição

A avaliação da taxa de deposição metálica foi realizada com o arame sólido e com a amostra 625+Mg. Os resultados encontrados para essas amostras e o cálculo da taxa de deposição metálica com diferentes valores de corrente estão registrados nas tabelas Tabela 5-5 a Tabela 5-8.

Os valores t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , e t_5 correspondem ao tempo de deposição de cada cordão de solda para a corrente fixada. O valor de t total é a soma dos tempos medidos. M_i e m_f representam a massa inicial e a massa final do corpo de prova antes e após a soldagem. O cálculo da TDM foi realizado conforme explicado na Figura 4-6 do capítulo 4.7.

Os resultados da taxa de deposição metálica foram plotados no gráfico da Figura 5-1.

Tabela 5-5: Resultados obtidos para ensaio de taxa de deposição metálica com 230 A

230 A		
	Arame Sólido	625+Mg
t1	114,1 s	113,30 s
t2	113,2 s	113,50 s
t3	113,8 s	113,20 s
t4	113,5 s	113,80 s
t5	114,2 s	114,60 s
t total	568,82 s	568,40 s
mi	18,38 Kg	21,25 Kg
mf	19,02 Kg	21,95 Kg
TDM	4,07 Kg/h	4,42 Kg/h
Aumento de TDM		7,96%

Tabela 5-6: Resultados obtidos para ensaio de taxa de deposição metálica com 300 A

300 A		
	Arame Sólido	625+Mg
t1	113,5 s	113,80 s
t2	113,4 s	113,60 s
t3	113,8 s	113,30 s
t4	114,2 s	113,30 s
t5	113,8 s	113,40 s
t total	568,70 s	567,40 s
mi	19,02 Kg	21,95 Kg
mf	19,72 Kg	22,70 Kg
TDM	4,43 Kg/h	4,79 Kg/h
Aumento de TDM		8,14%

Tabela 5-7: Resultados obtidos para ensaio de taxa de deposição metálica com 300 A

350 A		
	Arame Sólido	625+Mg
t1	114,2 s	113,60 s
t2	113,2 s	113,50 s
t3	113,2 s	113,80 s
t4	113,3 s	113,50 s
t5	113,2 s	113,60 s
t total	567,10 s	568,00 s
mi	19,72 Kg	22,70 Kg
mf	20,46 Kg	23,54 Kg
TDM	4,68 Kg/h	5,30 Kg/h
Aumento de TDM		14,03%

Tabela 5-8: Resultados obtidos para ensaio de taxa de deposição metálica com 400 A

380 A		
	Arame Sólido	625+Mg
t1	114,2 s	113,50 s
t2	113,5 s	113,50 s
t3	113,6 s	113,40 s
t4	113,8 s	113,60 s
t5	114,1 s	113,50 s
t total	569,20 s	567,50 s
mi	20,46 Kg	23,54 Kg
mf	21,25 Kg	24,47 Kg
TDM	4,98 Kg/h	5,89 Kg/h
Aumento de TDM		20,59%

Pela análise dos resultados pode-se perceber que o arame tubular de núcleo metálico possui taxa de deposição superior ao arame sólido. Quando aplicada a mesma corrente para os dois materiais, o arame tubular de núcleo metálico apresentou maior TDM em todas as medições realizadas. Pode-se também perceber pelo gráfico que a diferença entre as taxas de deposição dos dois arames aumenta com o aumento da corrente. Para a corrente mais baixa (230 A), essa diferença foi de 7,96%, ocorrendo aumento gradual até atingir uma diferença de 20,59% para a corrente ensaiada mais elevada (380 A). Este fenômeno pode ser explicado pela maior densidade de corrente aplicada no arame tubular de núcleo metálico em comparação ao arame sólido. Como abordado no capítulo 2.3, a geometria do arame metal cored resulta em uma maior densidade de corrente, resultando na maior taxa de deposição metálica observada nesse ensaio.

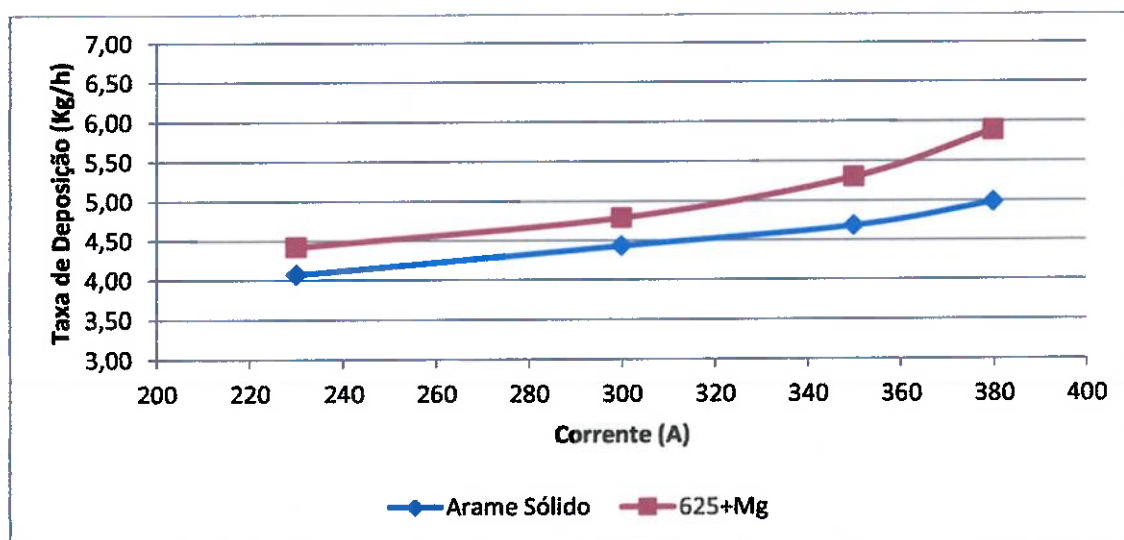


Figura 5-1: Comparação da taxa de deposição metálica entre o arame sólido e a amostra 625+Mg

5.5 Análise de Ferro em Soldagem Overlay Conforme API 6A

A Tabela 5-9 mostra o resultado da análise química para a soldagem overlay em duas camadas.

Tabela 5-9: Análise química para soldagem overlay

Amostra	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	Nb (%)	Fe (%)
Arame Sólido	0,021	0,302	0,244	19,53	7,86	3,17	8,89
625+Mg	0,023	0,285	0,231	19,03	7,57	3,02	9,28

Como pode-se observar ambas as amostras se enquadram na classificação Fe 10 conforme a norma API 6A. Não houve alteração da classificação da quantidade de ferro devido ao uso do arame tubular de núcleo metálico.

Tabela 5-10: Classificação das amostras conforme quantidade de ferro segundo norma API 6A

Amostra	Classificação Conforme API 6A
Arame Sólido	Fe 10
625+Mg	Fe 10

5.6 Perda de Massa e Formação de Pite no Metal de Adição

Conforme ASTM G48

A Tabela 5-11 mostra o resultado do ensaio de perda de massa realizado para as amostras.

Tabela 5-11: Resultado do ensaio de perda de massa conforme ASTM G48

Amostra	Perda de Massa (g/cm ²)
Arame Sólido CP1	0,00017
Arame Sólido CP2	0,00021
Arame Sólido CP3	0,00012
625+Mg CP1	0,00016
625+Mg CP2	0,00010
625+Mg CP3	0,00012

Observa-se que a perda de massa para as amostras ensaiadas são muito semelhantes e praticamente nulas. Não houve perda de massa significativa para as amostras ensaiadas.

5.7 Avaliação da Susceptibilidade da Corrosão Sob Tensão em Junta de Topo Conforme NACE 0175

Para a determinação dos parâmetros de soldagem dos corpos de prova, foi utilizada a Figura 5-1 como referência para escolha da corrente de soldagem. Para cada corpo de prova, utilizou-se uma corrente que garantisse a mesma taxa de deposição metálica para ambas as amostras. O primeiro corpo de prova soldado foi com a amostra de arame sólido, escolhendo uma corrente de 360 A, a qual apresentou bom comportamento de soldagem e cujo aporte térmico resultante está abaixo do indicado pela norma Petrobrás N-133. Para manter a mesma taxa de deposição metálica na soldagem com a amostra 625+Mg, consultamos a Figura 5-1 para descobrir a corrente equivalente, cujo valor encontrado foi de aproximadamente 310 A. A Figura 5-2 mostra o método utilizado para a determinação da corrente equivalente, onde as linhas pretas indicam o sentido de leitura do gráfico.

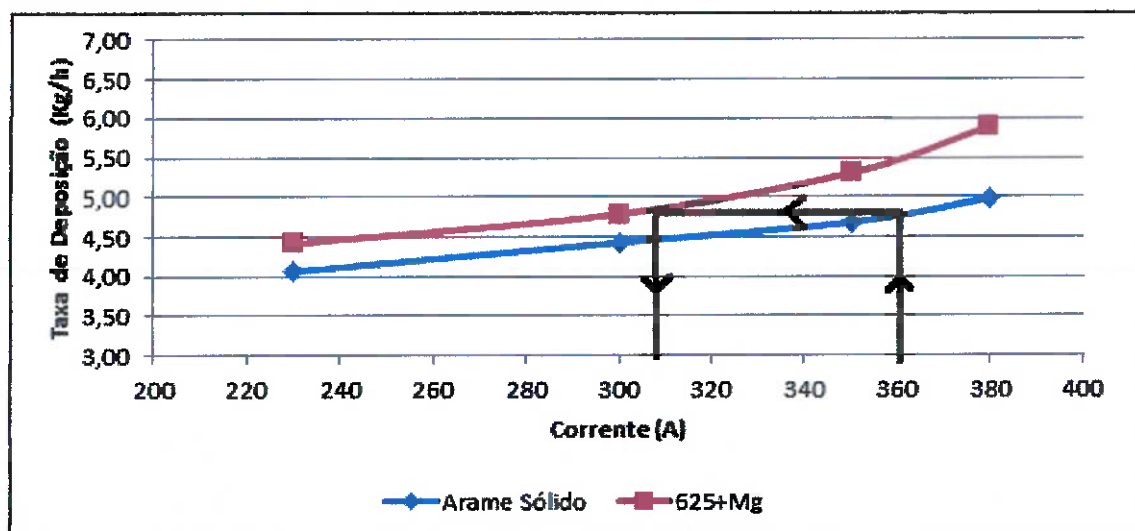


Figura 5-2: Determinação da corrente equivalente para soldagem dos corpos de prova para determinação de susceptibilidade de corrosão sob tensão conforme NACE 0175

A Figura 5-3 mostra o mapa de dureza para as amostras analisadas. Os resultados das medições encontram-se na Tabela 5-12.

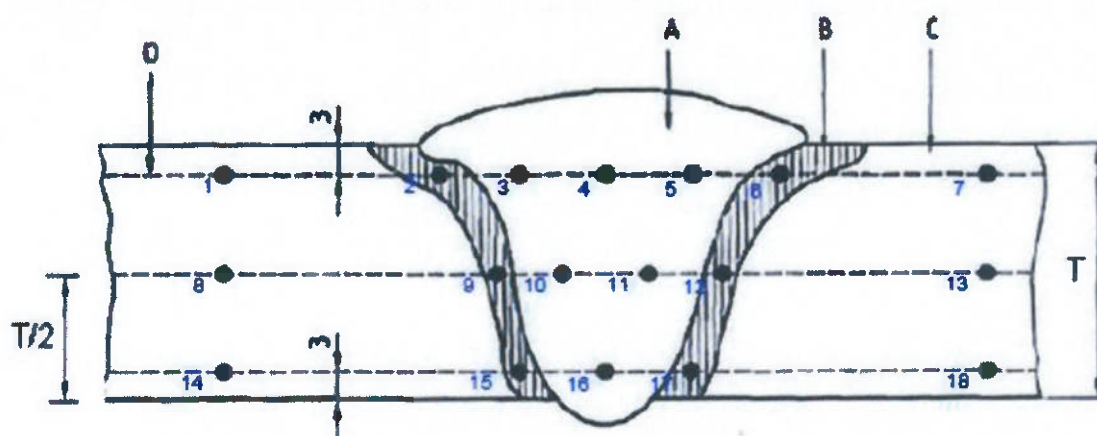


Figura 5-3: Mapa de dureza para pontos ensaiados

Tabela 5-12: Resultado do ensaio de dureza conforme NACE 0175

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Arame Sólido	20	33	<20	<20	<20	32	<20	20	24
625+Mg	<20	21	<20	<20	<20	22	<20	<20	21
Amostra	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Arame Sólido	<20	<20	24	20	<20	23	<20	23	<20
625+Mg	<20	<20	22	<20	<20	21	<20	22	<20

Como pode-se verificar na tabela acima, o corpo de prova soldado com o arame sólido não atendeu ao requisito máximo de dureza para os pontos ensaiados (22 HRC máximo) em todas as regiões da ZAC. Já o corpo de prova soldado com a amostra 625+Mg, mantendo a mesma taxa de deposição metálica e, portando, soldado no mesmo tempo que o arame sólido, apresentou todas as medições de dureza abaixo dos 22 HRC. Isso mostra que o arame metal cored possui aplicação válida para atendimento à norma NACE 0175.

Outra análise realizada com esses corpos de prova foi a medição da ZAC, para certificar se não houve aumento expressivo da região afetada pelo calor durante a soldagem as figuras Figura 5-4 e Figura 5-5 mostram a macrografia dos corpos de prova, evidenciando a ZAC. Como pode-se observar na Tabela 5-13, não houve diferença significativa da extensão da ZAC para os corpos de prova soldados com arame sólido e com a amostra 625+Mg. A ZAC foi revelada usando o reagente químico Nital 10%.

Tabela 5-13: Espessura da ZTA

Amostra	Face da Solda (mm)	Centro da Solda (mm)	Raiz da Solda (mm)
Arame Sólido	4,5	4,5	5,5
625+Mg	4,0	4,0	5,0

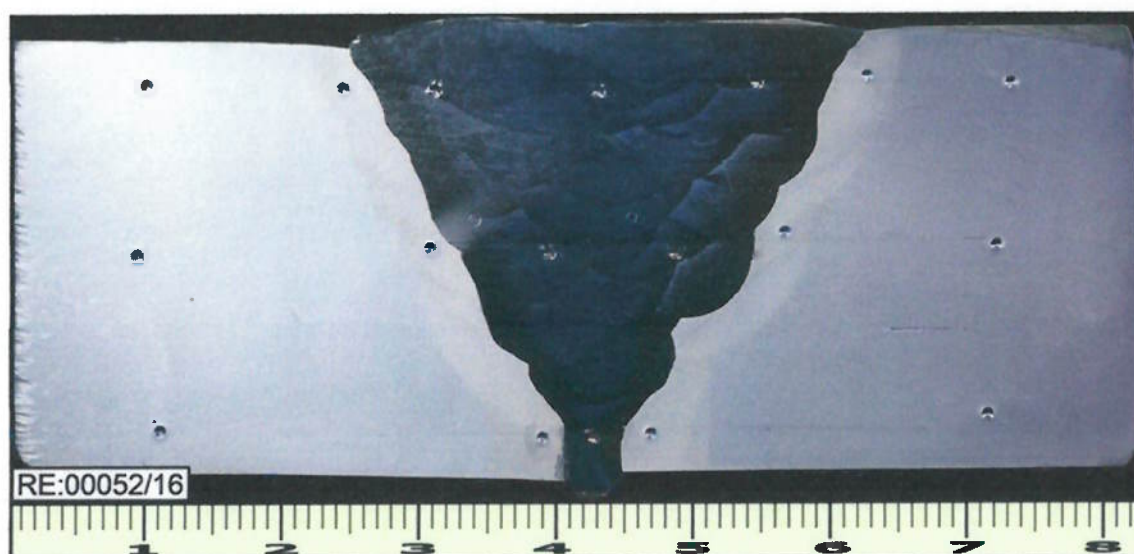


Figura 5-4: Macrografia da seção transversal do corpo de prova soldado com arame sólido

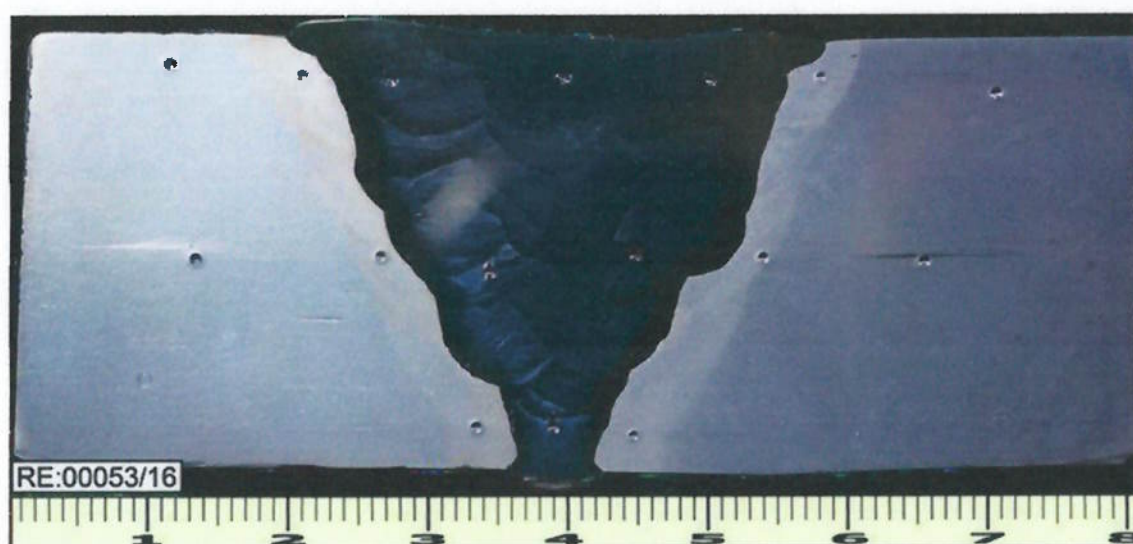


Figura 5-5: Macrografia da secção transversal do corpo de prova soldado com a amostra 625+Mg

5.8 Determinação do Potencial de Pite Através da Curva de Polarização Cíclica para regiões do Metal de Adição

Os próximos gráficos mostram o resultado do ensaio de polarização cíclica efetuado para os corpos de prova soldados com o arame sólido e com a amostra 625+Mg, conforme especificado no capítulo 4.11.1. Tabela 5-14 mostra o potencial de pite para cada ensaio.

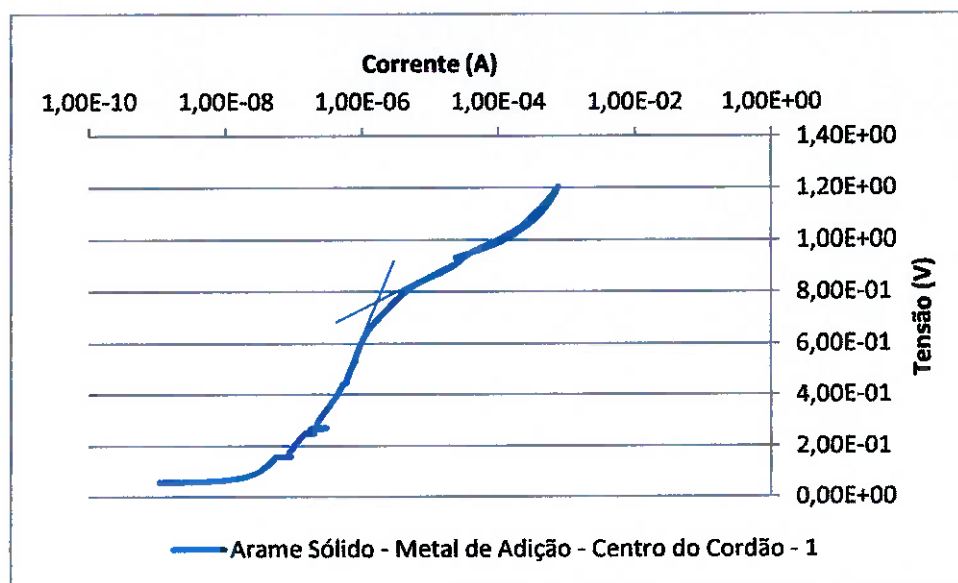


Figura 5-6: Polarização cíclica para ensaio S-A-C-1

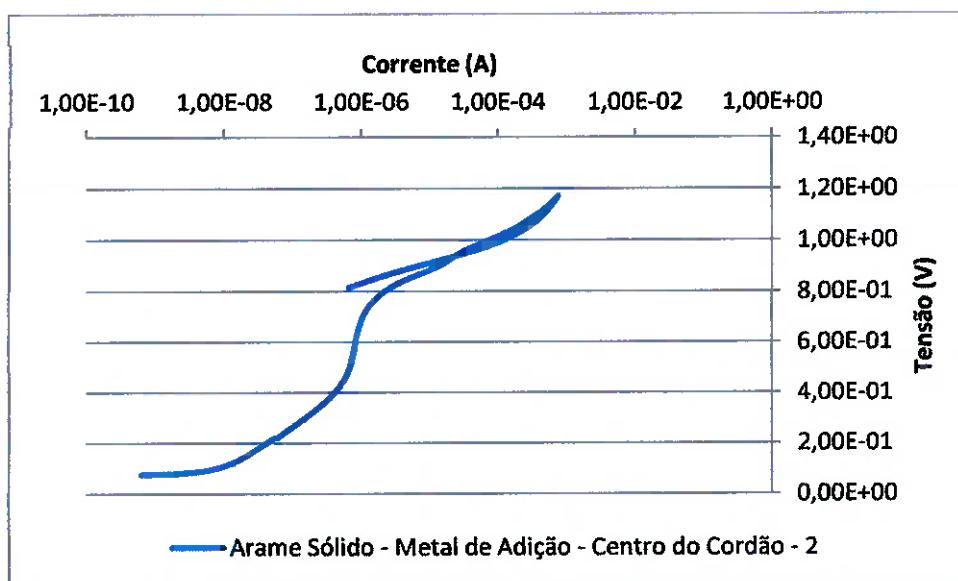
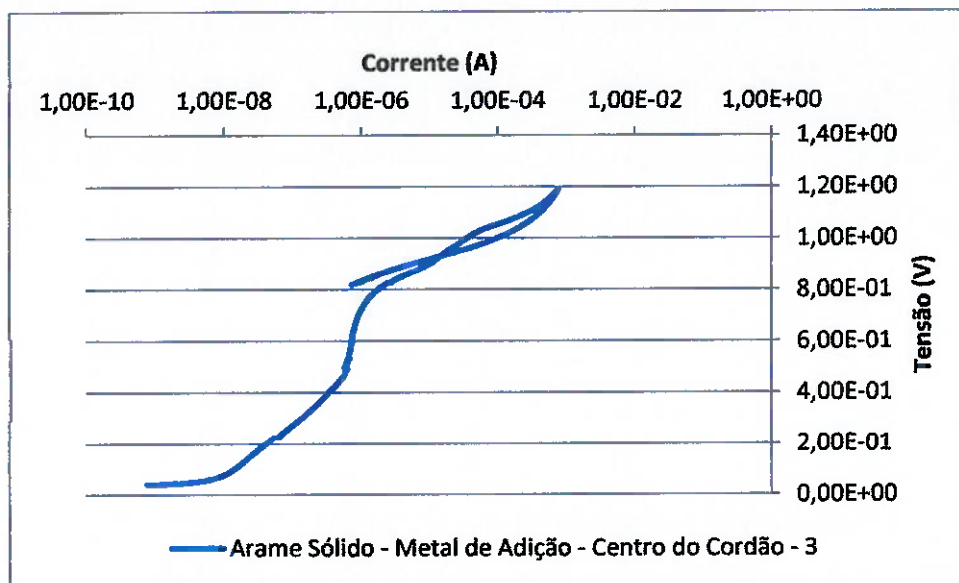
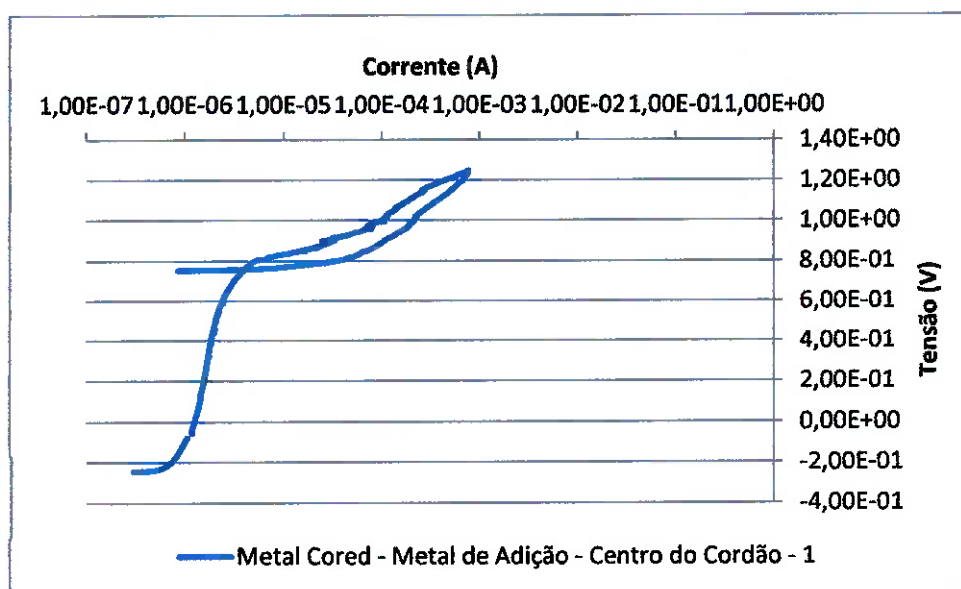


Figura 5-7: Polarização cíclica para ensaio S-A-C-2

**Figura 5-8: Polarização cíclica para ensaio S-A-C-3****Figura 5-9: Polarização cíclica para ensaio M-A-C-1**

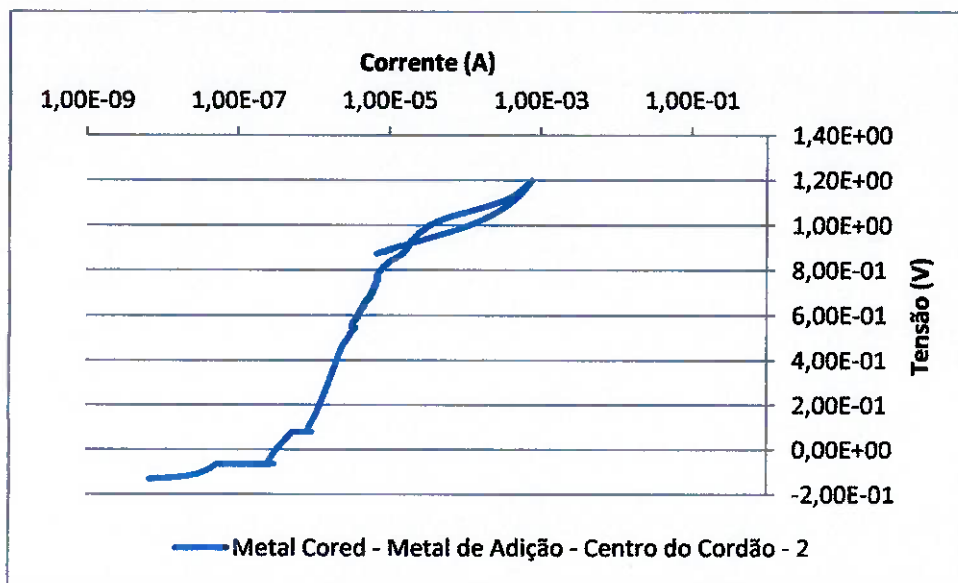
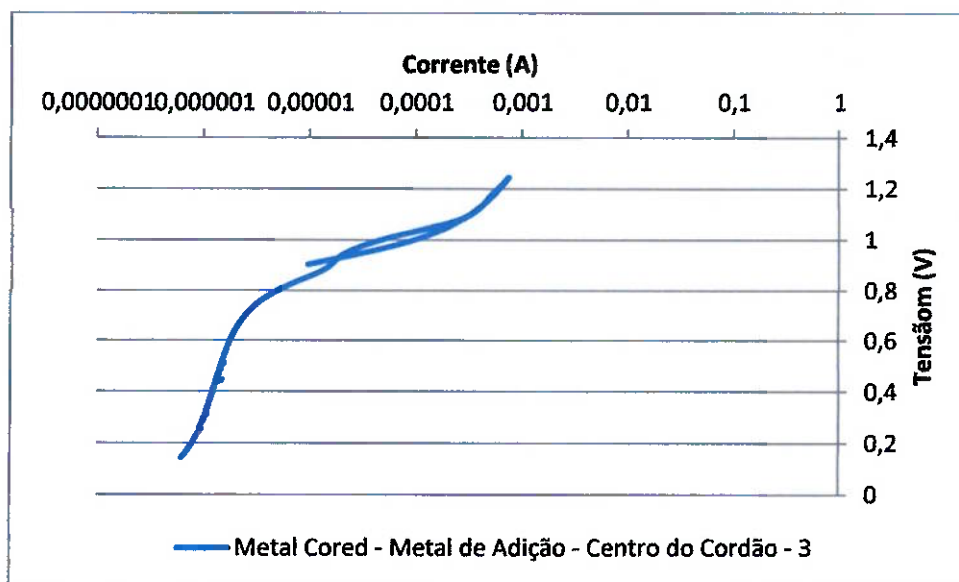
**Figura 5-10: Polarização cíclica para ensaio M-A-C-2****Figura 5-11: Polarização cíclica para ensaio M-A-C-3**

Tabela 5-14: Potencial de pite par as amostras ensaiadas

Corpo de Prova	Potencia de Pite (mV)
S-A-C-1	794
S-A-C-2	786
S-A-C-3	797
M-A-C-1	801
M-A-C-2	784
M-A-C-3	813
Média Arame Sólido	792 ± 6
Média 625+Mg	799 ± 15

Como pode-se observar, não houve alteração significativa do potencial de pite entre os ensaios, evidenciando que ambas as amostras possuem a mesma resistência à corrosão por pite.

6 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nesse trabalho indicam que é possível o desenvolvimento de um arame tubular de núcleo metálico de liga INCONEL 625 apresentando as mesmas propriedades de um arame sólido de mesma composição química.

Do ponto de vista de fabricação, não foi observado nenhum problema em desenvolver o arame metal cored a partir de uma liga de níquel. A composição química foi atingida sem maiores dificuldades.

Os resultados de ensaios mecânicos e de resistência à corrosão por pite mostram que o processo de soldagem utilizando o arame tubular de núcleo metálico não se diferiu da soldagem com o arame sólido, apresentando resultados bastante similares.

A maior taxa de deposição metálica do arame metal cored possibilitou a soldagem da tubulação com parâmetros elétricos menores, mantendo o mesmo tempo de soldagem. Com isso, foram observados menores valores de dureza na zona afetada pelo calor, ocasionando na aprovação segundo a norma NACE 0175 do corpo de prova soldado com o arame metal cored e a reprovação do corpo de prova soldado com o arame sólido, evidenciando um campo de aplicação para o arame metal cored.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Uma interessante sugestão de trabalho futuro seria o desenvolvimento de um arame metal cored com composição química similar ao INCONEL 625, porém com teores de molibdênio e nióbio acima do especificado, para que o metal depositado seja de fato uma liga de composição química INCONEL 625 mesmo considerando os efeitos da diluição com o metal base durante a soldagem.

Outra sugestão para a continuação deste trabalho seria a realização dos testes segundo o anexo B da norma NACE 0175, para certificação completa desta norma com o arame desenvolvido neste trabalho.

8 BIBLIOGRAFIA

- API 6A. (2010). *Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment*.
- ASM Handbook: "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials" (Vol. 2). (n.d.).
- ASM Metals Handbook: "Welding, Brazing and Soldering" (10 ed., Vol. 6). (1993).
- ASME SFA-5.14. (2013). *Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods*.
- AWS A5.23. (2013). *Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding*.
- BRANDI, S. D. (2001). Análise da transferência metálica na soldagem a arco elétrico com arame tubular. *Soldagem & Inspeção*, 1-8.
- Buso, S. J. (1999). *Estudos Microestruturais e por Microanálise para Identificação dos Precipitados Presentes em Amostras de Liga de Níquel Tipo 600 (Nacional) Após Processos de Soldagem*. São Paulo.
- Callister, W. D. (2002). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução* (5ª ed.). LTC.
- DONACHIE, M. J. (1984). *Superalloys Source Book*. Ohio: American Society for Metals.
- Dupont, J. N., Lippold, J. C., & Kiser, S. D. (2009). *Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys*. Ohio: Wiley.
- Eiselstein, H. L., & Tillack, D. J. (1991). The Invention and Definition of Alloy 625.
- Gentil, V. (1996). *Corrosão* (3ª ed.). Rio de Janeiro: LTC.

- Moreno, A. M. (2012). *Desenvolvimento de um Arame Tubular de Núcleo Metálico para Soldagem de Aços 1,25-0,5Mo para Soldagem pelo Processo de Arco Submerso // Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia de Soldagem da Escola Politécnica da USP*. São Paulo.
- Myers, D. (2002, Setembro). Metal Cored Wires: Advantages & Disadvantages. *AWS Welding Journal*.
- NACE MR0175. (2009). *Petroleum and Natural Gas Industries - Materials for use in H₂S-Containing Environments in Oil and Gas Production*.
- Okumura, T., & Taniguchi, C. (1982). *Engenharia de Soldagem e Aplicações*. Rio de Janeiro: LTC.
- Paranhas, R. P. (1992). Arco Submerso. In E. Wainer, S. D. Brandi, & F. D. Mello, *Soldagem, Processos e Metalurgia*. São Paulo: Blücher.
- Sedriks, A. J. (1996). *Corrosion of Stainless Steels*.
- The Avesta Welding Manual*. (2007). Västra Aros.
- Zanetic, S. T. (2001). *Determinação do grau de sensitização de aços inoxidáveis austeníticos pelo método DL-EPR // Tese de doutorado apresentada a Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais*. São Paulo.