

Anderson Correia Leite

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE
ALIMENTAÇÃO DO ARAME NA SOLDAGEM DE
REVESTIMENTO ANTICORROSIVO PELO
PROCESSO TIG PULSADO COM CONSUMÍVEL DE
INCONEL 625® EM FORJADO BAIXA LIGA 2 1/4CR
1MO.**

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
2014

Anderson Correia Leite

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE
ALIMENTAÇÃO DO ARAME NA SOLDAGEM DE
REVESTIMENTO ANTICORROSIVO PELO
PROCESSO TIG PULSADO COM CONSUMÍVEL DE
INCONEL 625® EM FORJADO BAIXA LIGA 2 1/4CR
1MO.**

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:
Prof. Dr. Sergio Duarte Brandi

São Paulo
2014

"Deus não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos. Fazer ou não fazer algo só depende da nossa vontade e perseverança."

ALBERT EINSTEIN

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho

*À Adriana (esposa), à Ana Clara (filha), à Maria Dalva (mãe) e
especialmente a André Correia Leite (pai "in memorian").*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de continuar o meu desenvolvimento pessoal e profissional ao longo da jornada da vida.

Agradeço ao meu pai André Correia Leite *"in memoriam"* que sempre me orientou e incentivou a buscar o conhecimento e o aperfeiçoamento cultural, profissional e pessoal.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Sérgio Duarte Brandi pelos ensinamentos, os quais me levaram a chegar ao final desta etapa com uma ampla visão e conhecimentos científicos da ciência de soldagem.

Agradeço a Antonio do Nascimento do grupo de pesquisa de soldagem e junção da Escola politécnica da USP por toda ajuda fornecida do desenvolvimento do trabalho de monografia.

Agradeço a todos os orientadores do curso de engenharia e especialização de soldagem pelo conhecimento compartilhado durante o período de dois anos de curso.

Agradeço a minha esposa Adriana e a minha filha Ana Clara, por toda compreensão, apoio e motivação fornecida ao longo do curso.

Agradeço a minha mãe Maria Dalva e a meus irmãos que sempre me incentivaram ao longo dos dois anos de curso.

Agradeço ao suporte dos meus colegas de trabalho Walter Diniz (inspetor de soldagem nível II), Vicente Ortega (engenheiro de soldagem), Cláudio Santos (inspetor de soldagem nível I), José Carlos (Líder de soldagem), Rafael Mendes (operador de soldagem GTAW-P), Geraldino Gomes (operador de soldagem GTAW-P) e Aurélio Cavalcante (Gerente da qualidade de Fornecedores), pois sem eles não conseguiria executar o estudo proposto neste trabalho.

Agradeço as empresas GE Oil & Gás do Brasil Ltda, Tecnotrat Tratamento Térmico de Metais Ltda e Proaqt Empreendimentos Tecnológicos Ltda, por toda a ajuda fornecida no trabalho.

CURRICULUM VITAE

ESCOLARIDADE

- Engenheiro de Materiais

OUTROS CURSOS

- Técnico em Instrumentação e Controle de Processos / Escola SENAI – Santos / SP 1998
- Inspetor de Soldagem Nível 1, FBTS IS 0832 N1 / Fundação Brasileira de Tecnologia de Soldagem / SP 2000.
- Inspeção Dimensional de Caldeiraria e Tubulação nível 2 / Associação Brasileira de Ensaios não destrutivos / SP 2004
- Green Belt Lean Six Sigma – Ge Oil & Gas / SP 2008
- Supplier Quality Engineer – Certification Training / Ge O&G / Houston 2008
- Processos e Equipamentos de Petróleo Subsea / Ge Oil & Gas / SP 2009.
- Auditor Líder ISO 9001:2008 / Bureau Veritas / SP 2010
- BELS – Building Essential Leadership Skills / Ge Oil & Gas / SP 2010
- Project Management Fundamentals at Ge / Ge Oil & Gas / SP 2010
- Root Cause Analyze Leader Apollo Methodology / Ge Oil & Gas / SP 2013
- Change Acceleration Process CAP / Ge Oil & Gas / SP 2014

EXPERIÊNCIA PROFISSIONAL

Lead Supplier Quality Engineer – Engenheiro de Desenvolvimento de Fornecedores
2008 – até o momento - Ge Oil &Gas

Responsável por

- Coordenar qualificação de processos especiais em fornecedores de Caldeiraria (Soldagem), matéria prima (Forjados e Laminados) e processos especiais através de robusto processo de qualificação (Plano de Processo de Manufatura, FMEA, Plano de Qualidade, Primeira peça ou lote de qualificação, Procedimentos de Soldagem).
- Melhorar desempenho de qualidade de fornecedores através de gestão de indicadores
- Trabalhar em conjunto com time de compras estratégico, manufatura e engenharia desenvolvendo novos fornecedores para o mercado de óleo e gás.
- Coordenar processos de “design reviews” com fornecedores em novos produtos de engenharia.
- Desenvolver requisitos de Qualidade de fornecedores incorporados ao produto atendendo a expectativas dos clientes.
- Realizar auditoria de sistema da qualidade, processos especiais, saúde, segurança e meio ambiente em fornecedores.

RESUMO

A exploração do petróleo em águas cada vez mais profundas no Brasil, como as localizadas no pré-sal tem requerido um avanço na tecnologia devido às condições severas exigidas pelo meio como altas pressões, corrosão e baixas temperaturas. Uma das principais características dos componentes utilizados na indústria de exploração e produção do petróleo está relacionada com as propriedades mecânicas e a resistência a corrosão. Os componentes do setor petrolífero normalmente são fabricados a partir de aços baixa liga de alta resistência, submetidos a um revestimento com elevada resistência à corrosão na parte interna que entra em contato com o petróleo. Neste trabalho utilizou-se um aço ASTM A182 Gr. F22, temperado e revenido que foi revestido por soldagem pelo processo TIG (Tungsten Inert Gas) pulsado, empregando-se um consumível de Inconel 625® (UNS N06625) avaliando-se a influência da velocidade de alimentação do arame nas propriedades mecânicas e na obtenção da composição química do metal depositado em função da diluição inerente do processo. Observou-se através da análise química que o teor de ferro em fração de massa no metal de solda depositado sofre influência direta da velocidade de alimentação do consumível de soldagem e que para maiores valores de alimentação do arame, temos uma menor diluição, comprovando que para uma mesma energia de soldagem, quanto maior o volume de metal depositado, menos calor é transferido para o metal de base. O estudo também demonstrou que o teor de ferro no metal depositado sofre influência direta da realização de uma ou duas camadas de revestimento para os mesmos parâmetros de soldagem utilizados em função da maior da diluição da primeira camada com o metal de base. Os resultados encontrados para os valores de dureza Vickers realizados na zona afetada pelo calor (ZAC) a meio milímetro e a um milímetro da linha de fusão indicam que houve um endurecimento na região próxima a zona de ligação em consequência da velocidade de resfriamento ocasionando uma tempera nesta região.

Palavras chave: Aço ASTM A182 Gr. F22, Inconel 625®, diluição, velocidade de alimentação do arame, análise química, teor de ferro.

ABSTRACT

Oil exploration in deeper and deeper waters in Brazil, such as those located in the pre-salt layer has required an advance in technology due to severe conditions required by the environmental as high pressures, corrosion and low temperatures. One of the main features of the components used in the exploration and production industry of petroleum is related to the mechanical properties and corrosion resistance. The components used in the subsea industry typically are manufactured from high-strength low alloy steels, subjected to an overlay high corrosion resistance on the inside diameter that have contact with oil. In this work it was used the steel ASTM A182 Gr. F22, quenched and tempered that has been overlayed by TIG welding process (Tungsten Inert Gas) pulsed, using a welding consumable of Inconel 625® (UNS N06625) in order to evaluate the influence of the wire feeding speed on mechanical properties and in obtaining the chemical composition of the deposited metal based on the inherent dilution process. It has been observed through chemical analysis that the iron content in mass fraction in the weld metal deposited suffers direct influence of feeding speed of welding consumable and for higher values of wire feed, have a smaller dilution, proving that for a same welding energy, the higher the amount of metal deposited, less heat is transferred to the base metal. The study also showed that the iron content in deposited metal suffers direct influence of one or two layers of overlay for the same welding parameters used due to for greater dilution of the first layer with the base metal. The results for the vickers hardness values achieved in the heat-affected zone (ZAC) to half a millimeter and one millimeter of the fusion line indicate that there has been a hardening in the region near the fusion line as a result of cooling speed occurring a quench in this region.

Key words: Steel ASTM A182 Gr. F22, Inconel 625®, dilution, wire feeding speed, chemical analysis, iron content.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva TTT do aço carbono (a) e curva TTT do aço ligado (b) que apresenta maior temperabilidade [7].....	10
Figura 2.2 - Representação Esquemática de uma soldagem de revestimento para o cálculo da diluição [13,14].....	14
Figura 2.3 - Representação Esquemática do Processo de Soldagem TIG: (a) Visão Geral do Processo; (b) Zona de Soldagem ampliada [19].....	17
Figura 2.4 - Representação Esquemática do Processo de Soldagem TIG: (a) Corrente Contínua Polaridade Direta; (b) Corrente Contínua Polaridade Reversa [20].....	19
Figura 2.5 - Representação Gráfica da Corrente Pulsada e seus respectivos parâmetros de controle [24].....	21
Figura 2.6 - Soldagem de revestimento pelo processo TIG pulsado.....	22
Figura 2.7 - Esquema elétrico para o processo TIG, sistema arame quente [28].....	25
Figura 2.8 - Relação da taxa de deposição dos processos TIG arame quente e frio [24].....	26
Figura 4.1 - Corpo de Prova em Aço Forjado ASTM A182 Gr.F22 Classe 3.....	33
Figura 4.2 - Máquina de Soldagem TIG Automática Fronius FPA 9000-ETR [34]	38
Figura 4.3 - Detalhe do sistema e interface de controle, programação e registro FPA 9000 [34]	38
Figura 4.4 - Alinhamento do corpo de prova para ínicio do processo de soldagem..	39
Figura 4.5 - Pré-Aquecimento realizado por maçarico no corpo de prova.	40
Figura 4.6 - Esquema da distribuição de soldagem realizada no corpo de prova.	41
Figura 4.7 - Soldagem de revestimento com 1 e 2 camadas realizados nos corpos de prova na velocidade de soldagem de 360, 380 e 400 cm/min.	43
Figura 4.8 - Posicionamento dos termopares.....	44
Figura 4.9 - Montagem das Resistências Elétrica para realização do alívio de tensões pós soldagem.	45
Figura 4.10 - Gráfico de Alívio de Tensões pós soldagem do corpo de prova.	46
Figura 4.11 - Localização da remoção dos corpos de prova para ensaio de dobramento, macrografia e dureza para as amostras com duas camadas de revestimento e tração no metal de base.	48

Figura 4.12 - Localização da remoção dos corpos de prova para ensaio de dobramento, macrografia e dureza para as amostras com uma camada de revestimento e ensaio de impacto no metal de base.	49
Figura 4.13 - Mapeamento para medição de dureza em soldagem de revestimento anticorrosivo conforme norma NACE MR0175 [3].....	53
Figura 4.14 - Preparação para remoção de amostra para análise química do revestimento conforme ASME IX Figura QW-462.5(a) [34].....	54
Figura 5.1 - Corpo de prova de tração conforme ASTM A370 [36].	57
Figura 5.2 – Corpo de prova de impacto conforme ASTM A370 [36].	59
Figura 5.3 – Mapeamento para medição de dureza na soldagem de revestimento com duas camadas conforme norma NACE MR0175 [3].....	60
Figura 5.4 – Mapeamento para medição de dureza na soldagem de revestimento com uma camada conforme norma NACE MR0175 [3].	62
Figura 5.5 – Gráfico comparativo com as médias dos valores de dureza das amostras A, B, C com 2 camadas de revestimento nas regiões a 0,5mm e 1,0mm da linha de fusão na zona afetada pelo calor e no metal de base.	64
Figura 5.6 – Gráfico comparativo com as médias dos valores de dureza das amostras D, E, F com 1 camada de revestimento nas regiões a 0,5mm e 1,0mm da linha de fusão na zona afetada pelo calor e no metal de base.	65
Figura 5.7 – Macrografia dos revestimentos A, B, C com duas camadas de revestimento.....	66
Figura 5.8 – Macrografia dos revestimentos D, E, F com uma camada de revestimento.....	67
Figura 5.9 – Gráfico da variação da altura do reforço e da penetração de soldagem com a velocidade de alimentação do arame. Em verde são apresentados os resultados de altura da camada e em laranja da penetração das amostras A, B, C. 68	
Figura 5.10 – Gráfico comparativo com a análise química das amostras A, B, C com duas camadas de revestimento e das amostras D, E, F com uma camada de revestimento.....	71
Figura 5.11 – Gráfico da variação do teor de ferro com a velocidade de alimentação do arame para soldagem de revestimento de ligas de níquel 625 em aço forjado 2 1/4 Cr 1 Mo temperado e revenido. Em verde são apresentados os resultados das amostras A, B, C.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição Química em peso porcentual do metal de Adição da Liga UNS N06625 conforme ASME II Part C [32].....	28
Tabela 4.1 - Composição Química do corpo de prova em aço ASTM A182 Gr F22 classe 3 modificado, comparado com o especificado pela norma [4].....	34
Tabela 4.2 - Requisitos do ensaio de Tração do corpo de prova em aço ASTM A182 Gr F22.....	34
Tabela 4.3 - Requisito de Impacto transversal para o corpo de prova em aço ASTM A182 Gr F22.	35
Tabela 4.4 - Composição Química em peso porcentual do metal de Adição do arame ERNiCrMo-3 utilizado no revestimento do forjado ASTM A182 Gr F22 [32].....	36
Tabela 4.5 - Propriedades Mecânicas do metal de Adição do arame ERNiCrMo-3 utilizado no revestimento do forjado ASTM A182 Gr F22 [32].....	37
Tabela 4.6 - Condições de soldagem realizadas para avaliação.	41
Tabela 4.7 - Parâmetros de Soldagem do corpo de prova.....	42
Tabela 4.8 – Especificação para Alívio de Tensões após a Soldagem.....	46
Tabela 4.9 - Relação de Ensaios Realizados nas Amostras de soldagem de revestimento.....	50
Tabela 5.1– Resultado do ensaio de dobramento lateral.....	56
Tabela 5.2– Resultado do ensaio de tração do metal de base ASTM A182 Gr F22 após soldagem e alívio de tensões.	58
Tabela 5.3 – Resultado do ensaio de Impacto do metal base aço ASTM A182 Gr F22 após soldagem e alívio de tensões.	59
Tabela 5.4 – Resultado do ensaio de Dureza Vickers da amostra A com velocidade de alimentação do arame de 360 cm / min e duas camadas de revestimento.	61
Tabela 5.5 – Resultado do ensaio de Dureza da amostra B com velocidade de alimentação do arame de 380 cm / min e duas camadas de revestimento.	61
Tabela 5.6 – Resultado do ensaio de Dureza da amostra C com velocidade de alimentação do arame de 400 cm / min e duas camadas de revestimento.	62
Tabela 5.7 – Resultado do ensaio de Dureza da amostra D com velocidade de alimentação do arame de 360 cm / min e uma camada de revestimento.	63

Tabela 5.8 – Resultado do ensaio de Dureza da amostra E com velocidade de alimentação do arame de 380 cm / min e uma camada de revestimento.	63
Tabela 5.9 – Resultado do ensaio de Dureza da amostra F com velocidade de alimentação do arame de 400 cm / min e uma camada de revestimento.	63
Tabela 5.10 – Avaliação da altura, penetração e do revestimento por soldagem das amostras A, B e C com duas camadas.	66
Tabela 5.11 – Avaliação da altura, penetração e do revestimento por soldagem das amostras D, E, F com uma camada.	67
Tabela 5.12 – Resultado da análise química do revestimento a três milímetros da linha de fusão para as amostras com duas camadas de revestimento A, B, C e para as amostras com uma camada de revestimento D, E, F.....	70

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS.

AL	Alongamento
AISI	American Iron and Steel Institute
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing Materials
AWS	American Welding Society
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CC-	Corrente Contínua com Polaridade Direta
CC+	Corrente Contínua com Polaridade Reversa
CP	Corpo de Prova
CRA	Corrosion Resistance Alloy
DL	Dobramento Lateral
ETR	Endless Torch Rotation
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
ISO	International Organization for Standardization
LE	Limite de Escoamento
LF	Linha de Fusão
LR	Limite de Resistência
MB	Metal de Base
MIG	Metal Inert Gas

MAG	Metal Active Gas
GMAW	Gas Metal Arc Welding
NACE	National Association of Corrosion Engineers
PSL	Product Specification Level
R1	Primeira Camada de Revestimento
R2	Segunda Camada de Revestimento
RA	Redução de Área
TIG	Tungsten Inert Gas
TTT	Transformação- Tempo – Temperatura
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iv
CURRICULUM VITAE	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS.	xii
1 Introdução e Justificativa.....	3
1.1 Indústria de Óleo & Gás.....	3
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Aços Ligados.....	5
2.2 Tratamento Térmico.....	7
2.2.1 Normalização.....	8
2.2.2 Têmpera e Revenido dos Aços	8
2.3 Revestimento anticorrosivo por soldagem	12
2.4 Diluição	13
2.5 Processo de Soldagem TIG	16
2.5.1 Tipo de Corrente.....	17
2.5.2 Energia de Soldagem	22
2.5.3 Alimentação do Metal de Adição.....	24
2.6 Metal de Adição - Liga de Níquel, Cromo e Molibdênio UNS N06625 (Inconel 625®).....	26
2.7 Alívio de TENSÕES PÓS-SOLDAGEM	29
3 Objetivos.....	31
4 Materiais e Métodos	32
4.1 Material Base	32

4.2	Metal de Adição	35
4.3	Processo de Soldagem.....	37
4.4	Execução da Soldagem	39
4.4.1	Preparação	39
4.4.2	Parâmetros de soldagem	40
4.5	Alívio de Tensões	43
4.6	Ensaios Realizados	47
4.6.1	Ensaios Mecânicos	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
5.1	ENSAIOS MECÂNICOS	55
5.1.1	Ensaio de dobramento Lateral	55
5.1.2	Ensaio de tração (metal de base).....	57
5.1.3	Ensaio de impacto Charpy (metal de base)	58
5.1.4	Ensaio de dureza Vickers (hv10)	59
5.1.5	Macrografia	65
5.1.6	Análise química.....	68
6	CONCLUSÕES	73
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
8	REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

1.1 INDÚSTRIA DE ÓLEO & GÁS

A atual situação do Brasil em explorar petróleo em águas cada vez mais profundas, requer um avanço na tecnologia tanto dos equipamentos e técnicas utilizadas quanto no desenvolvimento de materiais que suportem as condições severas exigidas pelo meio, como altas pressões e baixas temperaturas encontradas no fundo do oceano. O material para ser utilizado na indústria petrolífera necessita de boa resistência mecânica, elevada tenacidade aliada a uma boa soldabilidade, boa resistência à corrosão e ao desgaste [1].

Para a seleção dos materiais a serem utilizados na fabricação dos componentes para exploração de petróleo em águas profundas, é necessária uma análise do projeto de forma a verificar parâmetros do meio como a pressão do poço, risco ambiental e humano, agressividade do meio (H₂S, CO₂ e Cloretos) e requisitos da qualidade.

Conforme normas API 6A / ISO10423 referente a equipamentos de cabeça de poço e árvore de natal e NACE MR0175 / ISO15156 referente à seleção de materiais para uso em ambientes que contenham H₂S no setor de óleo e gás, devemos selecionar a classe da matéria prima em função do risco ao ser humano, ao meio ambiente e agressividade do meio. Esta seleção tem como base uma tabela que define a classe do material em função da aplicação do componente, sendo este requisito definido na norma API 6A, como nível PSL (*Product Specification Level*) do

equipamento, sendo que quanto maior este nível, maior são os requisitos necessários, principalmente da matéria-prima e da soldagem e na norma NACE MR0175/ ISO15156, são definidos em função da agressividade do meio baseado nos teores de H2S e CO2 [2-3].

Com base na atual condição de exploração em águas profundas, a classe de material exigida conforme norma API 6A / ISO10423 e NACE MR0175 / ISO15156 normalmente é definida como FF (Aço Inox) ou maior CRA (Ligas resistentes à corrosão) [2-3].

Um dos materiais candidatos a esta aplicação é o aço micro ligado ao cromo, molibdênio liga ASTM A182 grau F22, devido à sua média resistência mecânica aliada a uma boa soldabilidade e elevada tenacidade, condições favorecidas pela modificação imposta ao aço através dos elementos de liga e pelo controle dos teores de fósforo e enxofre [4].

Os aços micro ligados ASTM A182 F22 modificados são normalmente fabricados em fornos elétricos ou básico a oxigênio com posterior processo de desgaseificação a vácuo, sofrendo conformação mecânica por forjamento e posteriormente, submetidos aos tratamentos térmicos de normalização, têmpera e revenimento, onde apresentam em função da temperatura do revenimento seu limite de escoamento variando da ordem de 75 a 80 kSI [4].

Aços ASTM A182 F22 tratados termicamente e soldados normalmente com revestimentos anticorrosivos utilizados para aplicação em equipamentos para exploração de petróleo em águas profundas, necessitam ter sua soldagem de revestimento qualificada e suas propriedades mecânicas determinadas para atender as condições de projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS LIGADOS

Atualmente as opções para seleção do tipo de aço são elevadas, pois além de aços com teores variáveis de carbono, é grande a utilização de aços ligados.

O aço carbono é composto de uma liga Fe-C que contém geralmente 0.008% até 2.11% de carbono, além de apresentar manganês, silício, fósforo e enxofre como elementos residuais, em função do processo de fabricação do gusa e do aço. O carbono na composição do aço é o responsável direto pela dureza do material no estado normalizado e recozido e pela sua temperabilidade. Sem a presença do carbono, o ferro não poderia ser endurecido por têmpera, pois não haveria formação de martensita. Assim o carbono em maior ou menor quantidade torna o aço mais ou menos temperável [5].

Para algumas aplicações, principalmente na indústria de óleo e gás para exploração de petróleo em águas profundas o aço carbono apresenta limitação de aplicação em função de espessuras, propriedades mecânicas, tenacidade, resistência à corrosão, e, portanto neste segmento de indústria é utilizado uma grande proporção de aços baixa liga de alta resistência.

Geralmente esse aumento de resistência é conseguido pela adição de um ou vários elementos de liga em teores relativamente baixos, não ultrapassando sua soma o valor de 5%. Estes elementos de liga nos aços-carbono em função da aplicação visam obter um aumento de dureza e resistência mecânica, melhorar a

temperabilidade (profundidade de têmpera) do aço ou em alguns casos aumentar a resistência ao calor e ao desgaste [6].

Os elementos de liga no aço afetam as propriedades dos aços e devido a grande quantidade de aços baixa liga de alta resistência, será apresentada a influência dos principais elementos presentes no aço ASTM A182 Gr.F22 modificado que são o carbono, cromo, manganês, molibdênio, níquel e silício.

Os elementos de liga nos aços para construção mecânica visam obter ótimas condições de resistência e tenacidade através de um aço de maior temperabilidade e obtenção da microestrutura martensita revenida. A maioria dos elementos químicos aumenta a temperabilidade do aço, porém o carbono é o principal elemento na influência deste efeito, porém altas concentrações do mesmo são limitadas em virtude de trincas, distorções e influência na soldabilidade dos materiais. Em virtude deste efeito, nos aços baixa liga para construção mecânica, utilizaram-se outros elementos de liga como o manganês, o cromo, o níquel, o silício e o molibdênio que também provocam o deslocamento para a direita das curvas de início e fim de transformação da martensita, no diagrama TTT, e influenciam no diâmetro crítico para liga ferro-carbono como demonstrado na equação (1) [7].

$$D_c = D_c(\text{base}) \times 3,275 (\% \text{Mo}) + 2,21(\% \text{Mn}) \times 2,13(\% \text{Cr}) \times 1,47 (\% \text{Ni}) \times 1,40 (\% \text{Si}) \quad (1)$$

D_c (base) = Diâmetro crítico para liga ferro-carbono

% = Porcentagens em peso [7].

Este efeito torna possível a têmpera de secções mais espessas e utilização de meios de resfriamento mais brandos, garantindo uma estrutura temperada com maior quantidade de martensita. Outro efeito relaciona-se com a temperatura do revenido, que é mais elevada que nos aços carbono, facilitando a remoção de tensões internas e apresentando para o mesmo nível de dureza maior tenacidade [7-8].

2.2 TRATAMENTO TÉRMICO

Tratamento térmico são operações de aquecimento e resfriamento controlados que visam afetar as características dos aços baixa liga visando obter microestruturas específicas que estão relacionadas com as propriedades dos materiais.

O aço baixa liga ASTM A182 Gr. F22 modificado é normalizado, temperado e revenido, onde o F indica a condição do método de conformação do material que é forjado. O método de conformação, seguido do tratamento térmico de normalização, tempera e revenimento resulta em uma estrutura com tamanho de grão fina e com capacidade de atingir alta resistência e alta tenacidade no material.

A principal característica do aço é a sua flexibilidade onde a partir da decomposição da austenita em aços baixa liga podemos obter diversos produtos como perlita, bainita e martensita dependendo da composição química e do tratamento térmico [9].

2.2.1 NORMALIZAÇÃO

A normalização tem por objetivo refinar e homogeneizar a estrutura do aço, após o forjamento conferindo-lhe melhores propriedades. O tratamento consiste em austenitizar o aço a uma determinada temperatura específica que depende do teor em carbono, manter esta temperatura por um determinado tempo, vinculado com a espessura do material seguido do resfriamento geralmente, ao ar [10].

A normalização também melhora as características de usinagem, modifica e refina estruturas dendríticas fundidas, e promove o refino de grão por meio da recristalização e homogeneíza a estrutura visando conferir ao aço melhores condições para têmpera posterior [7].

Os aços-liga são geralmente normalizados antes da têmpera e as temperaturas empregadas situam-se entre 35 a 40°C acima das linhas superiores de transformação A3 ou Acm3 dependendo do teor de carbono [6].

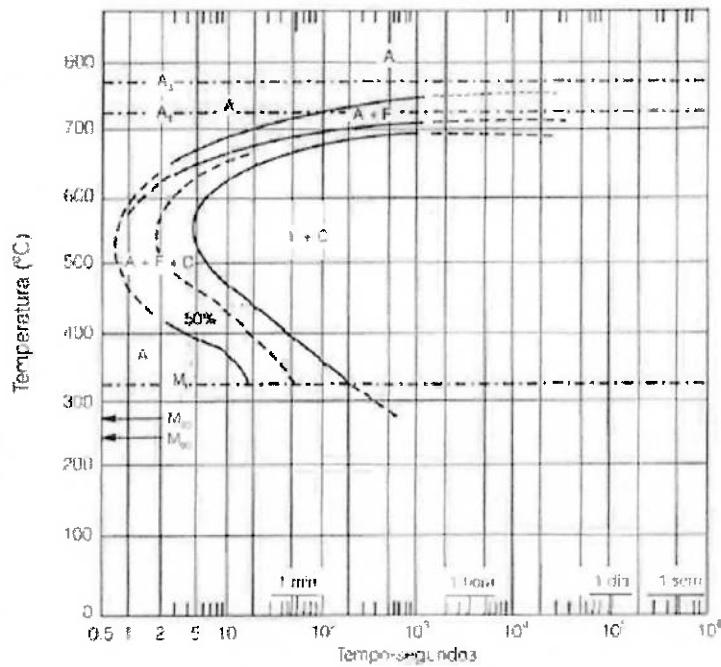
2.2.2 TÊMPERA E REVENIDO DOS AÇOS

A Têmpera é o tratamento térmico mais importante, porque é por intermédio dele, acompanhado pelo revenido, que se obtém as estruturas e as propriedades que permitem o emprego do aço em peças de maior responsabilidade e em aplicações mais críticas, como as que se encontram na indústria petrolífera.

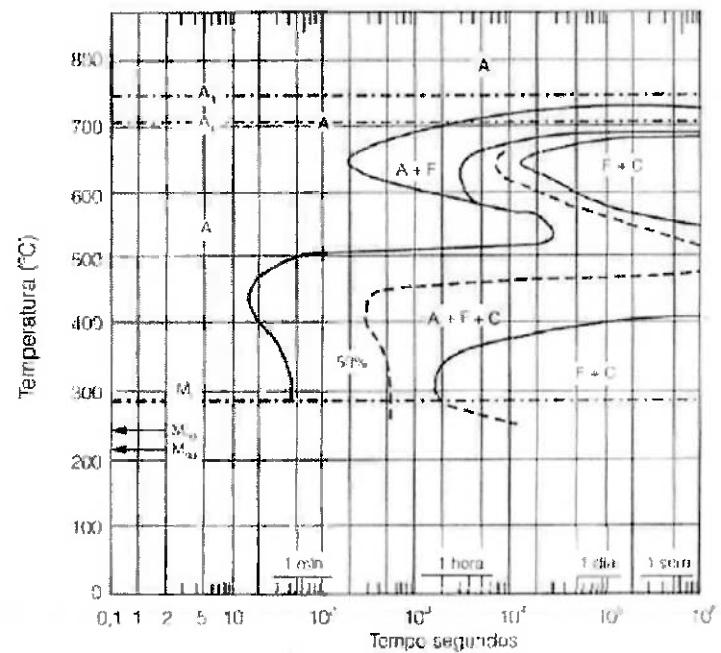
A operação de têmpera visa à obtenção do constituinte “martensita”, através de uma velocidade de resfriamento rápido, a partir da temperatura de

austenitização, em meio de grande capacidade de resfriamento, como água, salmoura, óleo e, eventualmente ar [10].

O meio de resfriamento utilizado depende do teor de carbono e dos elementos de liga presente no aço, da forma e das dimensões da peça, pois a velocidade de resfriamento deve ser tal que a curva de resfriamento pelo menos tangencie o cotovelo ou joelho da curva de início de transformação da austenita (de modo a evitar que esta se transforme nos constituintes normais) e atinja as linhas horizontais correspondentes à formação de martensita, conforme esquematizado na figura 2.1. De acordo com as dimensões das peças, podem-se obter estruturas mistas, pois no núcleo das peças a velocidade de resfriamento é menor se comparada com a superfície da peça [7].



(a) Curva ITT do aço AISI/ABNT 1050.



(b) Curva ITT do aço A/SI/ABNT 4340.

Figura 2.1 - Curva TTT do aço carbono (a) e curva TTT do aço ligado (b) que apresenta maior temperabilidade [7].

Sob o ponto de vista de propriedade mecânica, a martensita resulta no aumento da dureza, redução da ductilidade, da tenacidade e aparecimento de tensões internas [7].

Em função de a martensita ser um microconstituente muito resistente supersaturado de carbono, porém frágil, é necessário modificar as propriedades dos aços temperados por meio do tratamento térmico de revenimento normalmente realizado em uma faixa de temperatura de 200-700°C [8].

Em função da temperatura é possível obter uma grande variedade de propriedades mecânicas nos aços baixa liga. Quanto mais baixa for à temperatura do revenido maior será a resistência mecânica obtida, porém tem-se uma diminuição na tenacidade. Para materiais com limite de resistência semelhantes é observado que os aços alta resistência e baixa liga possuem melhor tenacidade se comparado com o aço carbono comum [8].

Após etapa de forjamento, o aço ASTM A182 Gr. F22 modificado é submetido ao tratamento térmico de normalização para refino e homogeneização da microestrutura, têmpera para obtenção da microestrutura martensítica e revenimento a altas temperaturas (aproximadamente 650°C) para obtenção da microestrutura martensita revenida.

A microestrutura do aço ASTM A182 Gr. F22 modificado deve consistir de ripas de martensita revenida, onde cementita ou carbonetos de molibdênio ou cromo tenham precipitado e esferiodizado. Caso o processo de revenimento seja realizado em temperaturas de aproximadamente 700°C, recristalização de ripas de martensita pode ocorrer.

2.3 REVESTIMENTO ANTICORROSIVO POR SOLDAGEM

De uma maneira geral, o revestimento por soldagem visa minimizar o deslocamento indesejável de material de uma determinada superfície ou degradação de suas propriedades mecânicas pela interação química ou eletroquímica entre a superfície de contato metálica e de líquidos em movimento que resultam em danos a superfície de um sólido através da perda progressiva de material por fenômenos relativos à corrosão [11].

O petróleo apresenta um elevado grau de corrosividade, devido à presença de diversas impurezas (enxofre, oxigênio, nitrogênio, metais pesados, água, sais minerais e areia). Este aspecto faz com que grande parte dos materiais utilizados na fabricação de equipamentos empregados na exploração e produção de petróleo, possua dentre outras características, uma elevada resistência à corrosão [12].

A grande quantidade e variedade de ligas vêm tornando cada vez mais árdua a seleção do metal de adição a ser utilizado no processo de soldagem. A classificação pode ser baseada em vários fatores como composição química e condições de serviço em testes específicos, sendo que sempre se deve analisar a compatibilidade da liga de revestimento com o metal de base, levando em consideração as tensões térmicas e possível tendência à propagação de trincas. Selecionar uma boa liga para revestimento considerando custo e vida em serviço e selecionar o processo mais adequado para revestimento considerando razões como a diluição e eficiência de deposição é um dos desafios encontrados pela engenharia de soldagem.

Como uma minoria das ligas de revestimento à base de ferro possui resistência à corrosão em meios aquosos, nestes casos revestimento por soldagem utilizando ligas a base de níquel geralmente é recomendada quando a resistência à corrosão é requerida.

Os depósitos de revestimento efetuados por soldagem são caracterizados pela composição variável e por uma cinética de solidificação que influenciam na microestrutura do depósito, portanto as propriedades do revestimento soldagem dependam do processo e da técnica de soldagem [11].

Os aços baixa-liga são geralmente metais de base apropriados para revestimento por soldagem, porém devido os mesmos serem susceptíveis a propagação de trincas durante o processo de soldagem, torna-se necessário um pré-aquecimento para minimizar ou suprimir a ocorrência de martensita na zona afetada pelo calor [11].

2.4 DILUIÇÃO

A diluição expressa à porcentagem do metal de base que participa da zona fundida e metalurgicamente a composição e as propriedades do revestimento são fortemente influenciadas pela diluição, portanto a escolha adequada da combinação metal de solda, processo e parâmetros de soldagem são de fundamental importância para a qualidade do revestimento desejado [11].

A principal diferença da soldagem de revestimento em relação às aplicações convencionais de soldagem de junta topo a topo estão relacionadas com a geometria do cordão de solda. Ao contrário das aplicações de soldagem de junta

topo a topo, em que é desejável alta penetração (P) para garantir a resistência da junta soldada, na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado se resume a grandes larguras do cordão (W), altos reforços (R), baixas penetrações (P) e baixos percentuais de diluição (D) conforme representação esquemática apresentada na figura 2.2 e equação (2) [13, 14]. A obtenção deste perfil geométrico característico é importante para que o processo de revestimento permita recobrir a maior área possível com o menor número de passes, resultando em economias significativas de materiais e tempo.

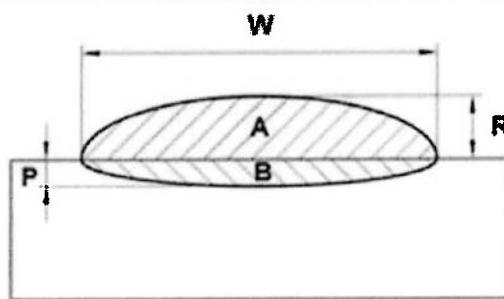


Figura 2.2 - Representação Esquemática de uma soldagem de revestimento para o cálculo da diluição [13,14].

$$D = [B / (A+B)] * 100 \quad (2)$$

Onde:

D = Diluição

B = Volume do Metal de Base Fundido

A = Volume do Metal de Adição Depositado

W = Largura do Cordão de Soldagem

P = Penetração

R = Altura do Reforço.

Um dos aspectos de maior importância a ser controlado no processo de soldagem de revestimento é o controle da diluição. Este controle é uma das principais características para assegurar a qualidade final dos revestimentos [14-15].

A composição e as propriedades dos componentes revestidos são fortemente influenciadas pela diluição [16]. Para o processo de revestimento de aços carbono baixa liga com aços inoxidáveis, o aumento da diluição reduz os elementos de liga e aumenta o conteúdo de ferro na camada revestida, reduzindo as propriedades de resistência à corrosão além de causar outros problemas metalúrgicos. Portanto, o controle do processo e o desenvolvimento de procedimentos capazes de oferecer uma diluição adequada são de fundamental importância para a qualidade final da solda de revestimento.

Em função da alta demanda do mercado de óleo & gás, os resultados não se limitam apenas ao controle da diluição e à obtenção do perfil geométrico desejado e sim de processos capazes de combinar requisitos mínimos de qualidade com elevados índices de produtividade, permitindo a deposição de cordões com altas taxas de produção e máximo rendimento, isento de defeitos e com bom aspecto visual.

A seguir descritivo sobre o processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) muito utilizado nos processos de revestimento.

2.5 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

A Soldagem a arco gás-tungstênio (*Gas Tungsten Arc Welding - GTAW*) ou, como é mais conhecida no Brasil, TIG (*Tungsten Inert Gas*) é um processo no qual a união é obtida pelo aquecimento dos materiais por um arco estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça. A proteção do eletrodo e da zona da solda é feita por um gás inerte, normalmente o argônio, ou mistura de gases inertes (Ar e He). O processo de soldagem pode ser realizado com ou sem metal de adição, podendo ser realizado manualmente ou através de processos automáticos [17].

A figura 2.3 mostra esquematicamente o processo TIG que é considerado um dos processos de soldagem a arco de melhor controle. A soldagem TIG é mais utilizada para aços ligados, aços inoxidáveis e ligas não ferrosas. O seu equipamento básico consiste de uma fonte de energia (CC e/ou CA), tocha com eletrodo de tungstênio, fonte de gás de proteção (Ar ou He) e um sistema para a abertura do arco (geralmente um ignitor de alta frequência). Este ignitor ioniza o meio gasoso, dispensando a necessidade de tocar o eletrodo na peça para a abertura do arco. A fonte de energia é similar à utilizada no processo de soldagem eletrodo revestido, porém devido às características do processo TIG, deve apresentar uma melhor precisão no ajuste da corrente [18].

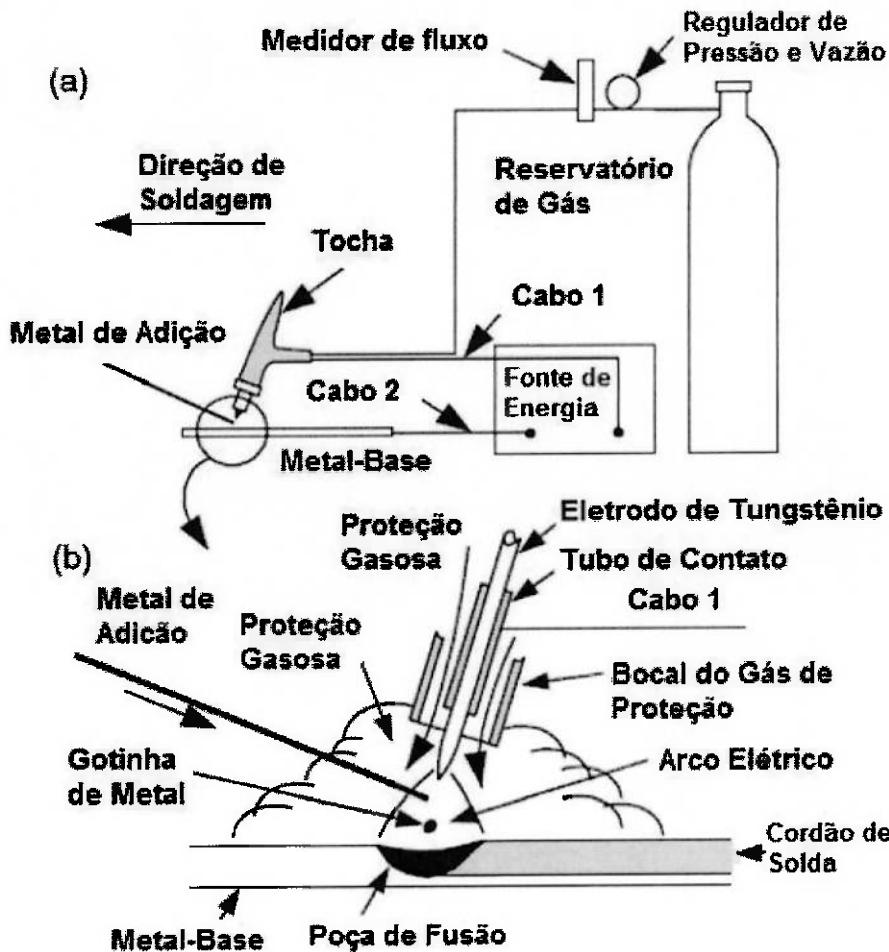


Figura 2.3 - Representação Esquemática do Processo de Soldagem TIG: (a) Visão Geral do Processo; (b) Zona de Soldagem ampliada [19].

2.5.1 TIPO DE CORRENTE

No processo de soldagem TIG, pode-se utilizar tanto a corrente contínua como a corrente alternada, sendo que a seleção do tipo de corrente e da polaridade se dá em função do material a ser soldado.

2.5.1.1 Corrente Contínua com Polaridade Direta e Reversa

Na Soldagem com corrente contínua, o eletrodo não consumível de tungstênio pode ser conectado tanto no polo positivo quanto no polo negativo da fonte. A utilização da corrente contínua com eletrodo ligado no positivo da máquina é denominada polaridade reversa (CC+) e quanto o eletrodo é conectado a polaridade negativa da máquina temos a polaridade direta (CC+) [17].

O fluxo de elétrons na corrente contínua polaridade direta (CC-) é direcionado para o metal de base e o fluxo de íons positivos para o eletrodo, este fluxo de elétrons incidido no metal de base promove um maior aquecimento do mesmo resultando em maiores penetrações. Na corrente contínua polaridade reversa (CC+) o fluxo de elétrons é direcionado para o eletrodo e o fluxo de íons positivos para o metal base, este fluxo de íons promove uma ação de limpeza através da remoção da camada de óxido na superfície do metal de base e neste caso temos uma penetração pequena e larga [17]. Na figura 2.4 é apresentada a polaridade direta e reversa.

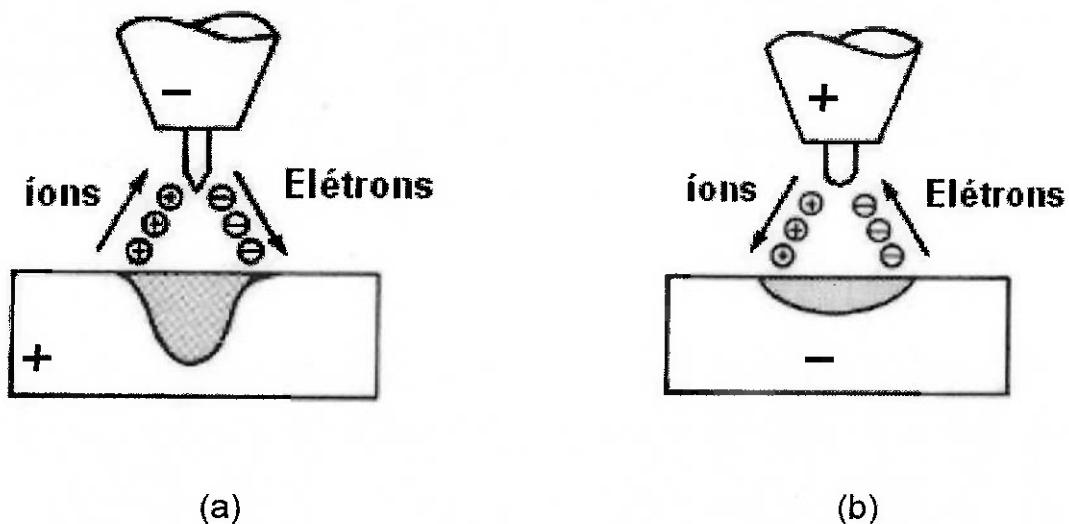


Figura 2.4 - Representação Esquemática do Processo de Soldagem TIG: (a) Corrente Contínua Polaridade Direta; (b) Corrente Contínua Polaridade Reversa [20].

2.5.1.2 Corrente Contínua Pulsada

O processo de soldagem TIG com corrente continua pulsada, desenvolvida da década de 1950, buscou objetivar durante o pulso de corrente de pico uma adequada penetração e largura de cordão enquanto que durante o pulso de corrente de base manter o arco estável [21].

No processo TIG com corrente pulsada, o calor necessário para fundir o metal base é fornecido somente durante a corrente de pico sendo que o tempo de pico controla o tamanho da poça de fusão e a profundidade da penetração. Durante a corrente de base temos a dissipação do calor no metal de base, pois o tempo de base controla a taxa de solidificação do cordão de solda. Este aspecto resulta se

comparado com o processo TIG convencional de corrente constante, em uma menor zona afetada pelo calor (ZAC), para soldagens de revestimentos em menores teores de diluição, além de menores distorções em soldagem de espessuras finas [22].

Esta técnica desenvolvida também permitiu o aumento da velocidade de soldagem pelo processo TIG, tornando o mesmo, além de um processo de alta qualidade, um processo produtivo [23].

Na figura 2.5 pode-se observar uma representação de um gráfico da corrente pulsada. No gráfico a corrente de pico é representada pelos valores máximos de corrente enquanto que a corrente de base indica os valores mínimos, também se observa os tempos de pico e base, além do tempo de ciclo de um pulso. A variação entre a corrente de base e de pico se mantém durante todo o processo e o ciclo pode variar de um range de um pulso a casa dois segundos até vinte pulsos por segundo [24].

Sob o ponto de vista metalúrgico, os pulsos de corrente resultam em variações do aporte de calor na poça de fusão que além dos efeitos térmicos causam um movimento adicional do fluido aumentando as forças de convecção já existente na poça de fusão, esta variação do fluxo também reduz a interface sólido/líquido gerando mudanças na forma e no tamanho da poça de fusão. Estes processos influenciam na solidificação do metal de solda e por sua vez a resistência da solda [25].

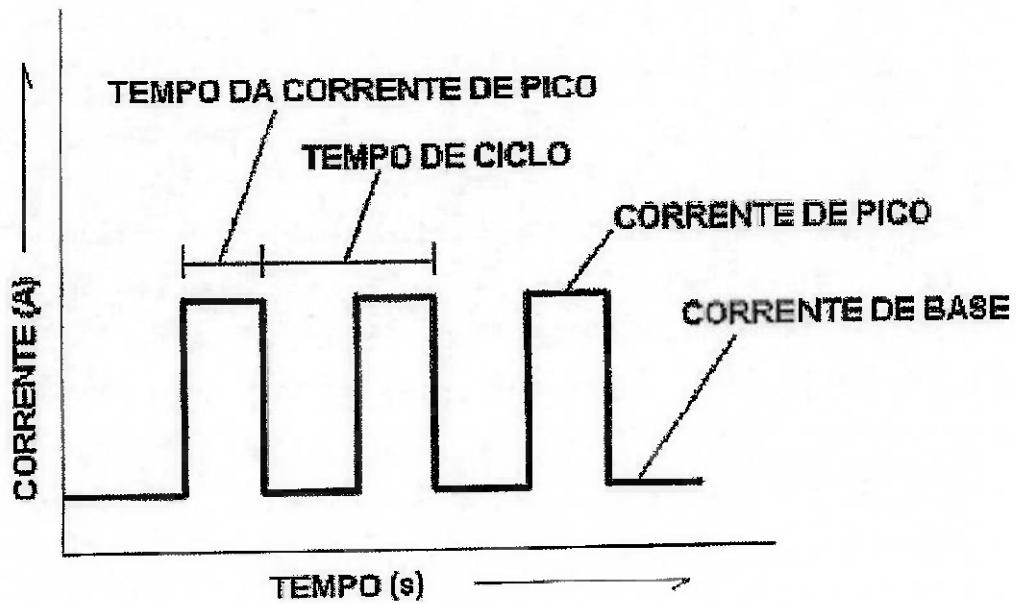


Figura 2.5 - Representação Gráfica da Corrente Pulsada e seus respectivos parâmetros de controle [24].

Na figura 2.6 podemos verificar uma soldagem de revestimento interno em uma sede de um bloco de válvulas executada pelo processo TIG pulsado com metal de adição UNS N06625.

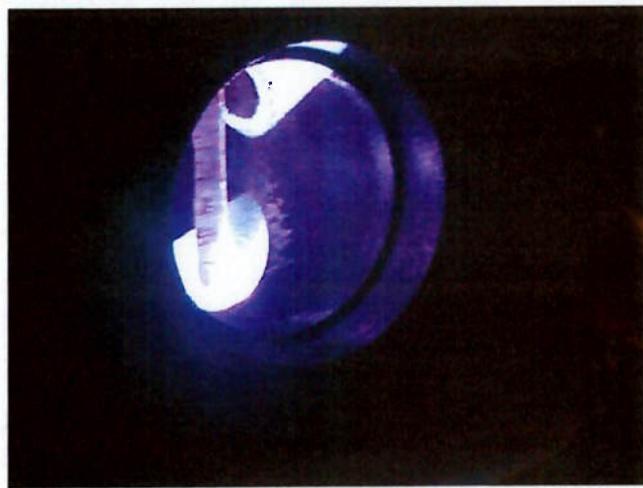


Figura 2.6 - Soldagem de revestimento pelo processo TIG pulsado.

2.5.2 ENERGIA DE SOLDAGEM

A energia de soldagem influencia diretamente no processo de formação microestrutural da zona afetada pelo calor (ZAC), pois quanto maior a energia de soldagem maior será a quantidade de calor transferida para o material o que resultará em baixa velocidade de resfriamento do metal base e da poça de fusão em contrapartida para menor energia de soldagem, temos menor quantidade de calor transferida e, portanto mais elevadas velocidades de resfriamento [26].

O aporte térmico ou energia de soldagem também está relacionado com a diluição, portanto o controle da energia de soldagem é de fundamental importância na soldagem de revestimento. A corrente e a velocidade de soldagem são as variáveis mais importantes que influenciam neste processo, sendo que a corrente de soldagem tem relação diretamente proporcional com a energia de soldagem enquanto que a velocidade apresenta influencia inversamente proporcional. [27]

No caso de corrente contínua a energia de soldagem é calculada conforme equação (3) [28]:

$$H = \frac{60 \cdot V \cdot I}{v} \quad (3)$$

Onde:

H = energia de soldagem (J/cm)

V = tensão de soldagem (V)

I = corrente de soldagem (A)

v = velocidade de soldagem (cm/min)

Em contrapartida o cálculo da energia de soldagem para corrente contínua pulsada é calculada conforme equação (4) [28]:

$$H = \frac{60 \cdot V \cdot (I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b)}{v \cdot (t_p + t_b)} \quad (4)$$

Onde:

I_p = corrente de pico (A)

t_p = tempo na corrente de pico (s)

I_b = corrente de base (A)

t_b = tempo na corrente de base (s)

2.5.3 ALIMENTAÇÃO DO METAL DE ADIÇÃO

Como demonstrado na equação (3) e (4), a energia de soldagem é influenciada pela corrente, tensão e velocidade de soldagem. No processo de soldagem de revestimento, outros fatores como a velocidade de alimentação do metal de adição e sobreposição dos cordões de solda também apresentam influência direta no resultado da diluição e taxa de deposição [29].

Os alimentadores de arame são dispositivos para introdução do metal de adição na poça de fusão para soldagens automatizadas. O processo de alimentação pode ser realizado a temperatura ambiente conhecido como arame frio (cold wire) ou realizado após o pré-aquecimento do metal de adição, técnica conhecida como arame quente (hot wire) [24].

No sistema arame quente (hot wire), o metal de adição é aquecido a uma temperatura próxima à temperatura de fusão logo antes de entrar em contato com a poça de fusão. O processo de aquecimento é por efeito joule e realizado através de uma fonte independente de corrente alternada que minimiza os efeitos de interferência por campos magnéticos com o arco de soldagem. Conforme demonstrado na figura 2.7, o sistema é basicamente composto de três componentes: dispositivo de alimentação do arame, controlador de velocidade e guia para introdução do arame a poça de fusão [24].

O processo de soldagem TIG apresenta uma excelente qualidade para soldagem de revestimento, porém se comparado com outros processos apresenta uma baixa taxa de deposição. O desenvolvimento do processo de soldagem TIG

Automático Arame Quente permitiu o aumento da taxa de deposição de metal de adição nas soldagens de revestimento [30].

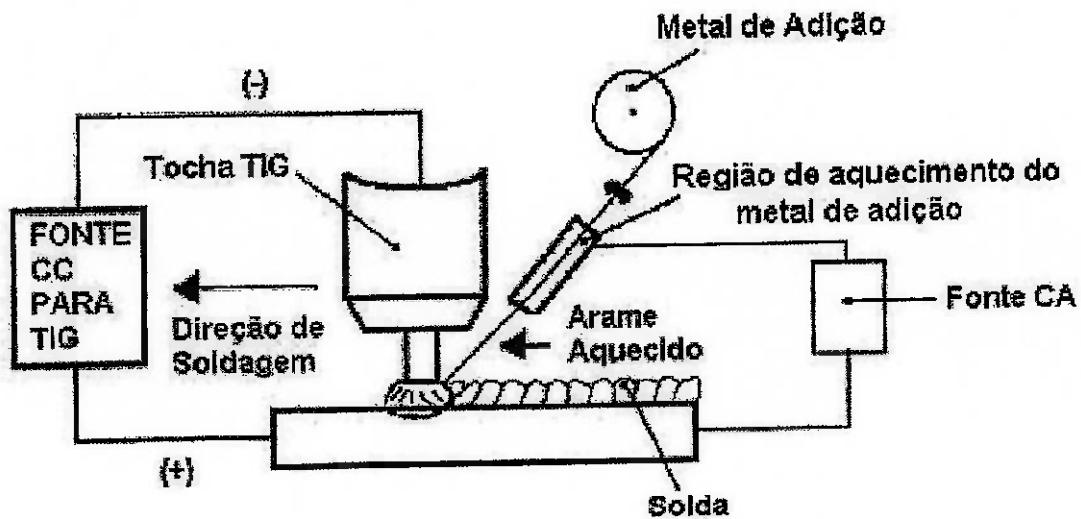


Figura 2.7 - Esquema elétrico para o processo TIG, sistema arame quente [28].

Através do diagrama apresentado na figura 2.8, o processo de alimentação com arame quente apresenta para uma mesma energia de arco, uma taxa de deposição superior se comparado ao processo de alimentação com arame frio [24].

Os sistemas de alimentação com arame quente são utilizados com sucesso em soldagens de revestimento e também são aplicáveis para soldar aços inoxidáveis, aços carbono, aços baixa-liga, ligas de cobre, ligas de níquel e metais reativos como titânio. A taxa de deposição do processo TIG automático com o processo de alimentação com arame quente se equipara as taxas encontradas para o processo de grande produtividade MIG/MAG (GMAW) [24].

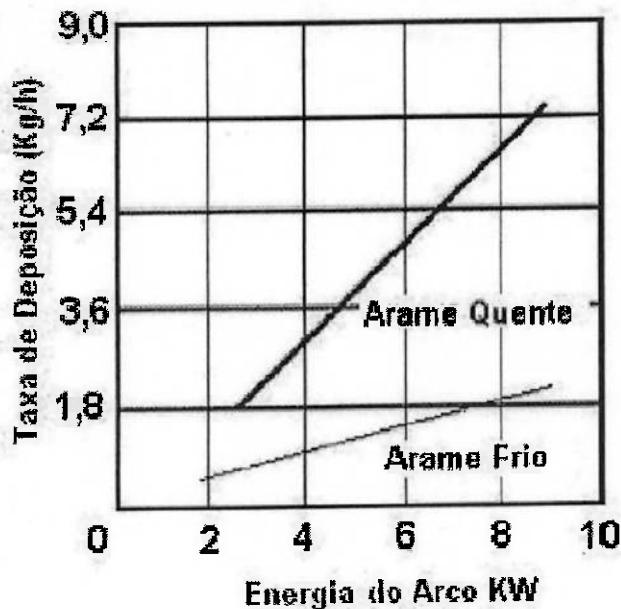


Figura 2.8 - Relação da taxa de deposição dos processos TIG arame quente e frio

[24].

2.6 METAL DE ADIÇÃO - LIGA DE NÍQUEL, CROMO E MOLIBDÊNIO UNS N06625 (INCONEL 625®).

A superliga de níquel, cromo e molibdênio 625 é muito utilizada em revestimentos por soldagem em equipamentos para prospecção de petróleo devido sua alta resistência à corrosão em diversos meios. Esta liga é comumente conhecida na indústria como Inconel 625®, sendo um dos nomes comerciais da Liga UNS N06625 [29].

A liga UNS N06625 apresenta boa resistência em temperaturas elevadas, alta resistência à corrosão em exposição a ambientes agressivos, além de apresentar na combinação de limite de escoamento, limite de resistência à tração e tensão de fluência boa condição de fabricação e processo de soldagem [31].

A composição química nominal do arame para soldagem a base de níquel UNS N06625, classificada como ERNiCrMo-3 conforme ASME II (SFA-5.14) apresenta em peso percentual 61% de níquel, além de 22% de cromo, 9% de molibdênio, 3,5% de Nióbio mais Tântalo. Este material é utilizado para soldagem de ligas níquel-cromo-molibdênio contra ela mesma e ligas de níquel contra aços. Este metal de adição é recomendado para aplicações onde o range da temperatura de operação varia de criogênica a 540°C. A Tabela 2.1 apresenta a composição química do metal depositado do ERNiCrMo-3. Os valores individuais apresentados são máximos exceto quando indicado na tabela [32].

Tabela 2.1 – Composição Química em peso porcentual do metal de Adição da Liga UNS N06625 conforme ASME II Part C [32].

ELEMENTOS	% EM PESO
CARBONO (C)	0,10 %
MANGANÊS (Mn)	0,50 %
FERRO (Fe)	5,00 %
FÓSFORO (P)	0,02 %
ENXOFRE (S)	0,015 %
SILÍCIO (Si)	0,50 %
COBRE (Cu)	0,50 %
NÍQUEL (Ni)	58,0 % (Mínimo)
ALUMINIO (Al)	0,40 %
TITÂNIO (Ti)	0,40%
CROMO (Cr)	20,0 a 23,0 %
NIÓBIO + TÂNTALO (Nb +Ta)	3,15 a 4,15 %
MOLIBDÊNIO (Mo)	8,0 a 10,0 %
OUTROS ELEMENTOS	0,50 %

2.7 ALÍVIO DE TENSÕES PÓS-SOLDAGEM

A poça de fusão e a fonte de calor provocam um aquecimento localizado na região submetida à soldagem. Este calor tende a expandir a massa e como o metal quente é relativamente dúctil, as tensões de compressão causam deformação local neste metal. As adjacências do metal base resistem à expansão do material e impede que a secção se expanda e à medida que a poça de fusão se esfria, o metal quente se contrai, as tensões de compressão são anuladas e em seguidas se transforma em tensões de tração no metal frio [11].

Durante o processo de soldagem são geradas tensões de tração e de compressão nas adjacências da junta ou da área revestida devido ao aquecimento localizado na região. Com o intuito de reduzir estas tensões provocadas pelas contrações do metal depositado realiza-se após a soldagem o tratamento térmico de alívio de tensões [11].

O Tratamento térmico de alívio de tensões é o mais empregado método de redução das tensões prejudiciais provocadas pelas operações de soldagem. O alívio de tensões consiste no aquecimento uniforme da estrutura ou porção desta que contém a região soldada, a uma temperatura abaixo da temperatura crítica de transformação (AC1 para aços ferríticos) e envolve o aquecimento controlado, permanência na temperatura por um determinado intervalo de tempo, normalmente proporcional à espessura do material e posteriormente seguido de um resfriamento controlado. O resfriamento controlado deve ser uniforme, principalmente quando o componente apresenta espessuras diferentes de forma a evitar a formação de novas tensões residuais [33].

Os objetivos do tratamento térmico de alívio de tensões são aumentar a ductilidade, diminuir a dureza e melhorar as propriedades metalúrgicas da zona afetada pelo calor. O alívio de tensões reduz possíveis distorções dos componentes devido às operações de soldagem, além de aliviar as tensões que podem afetar a desempenho em serviço do componente como a corrosão sobre tensão [33].

A soldagem dos aços de baixa liga requer cuidados especiais uma vez que esses materiais são temperáveis devido à adição de elementos de liga como cromo, molibdênio, níquel e vanádio, além do carbono. Estes materiais têm suas zonas afetadas pelo calor suscetíveis ao endurecimento e conforme a norma ASME VIII o alívio de tensões é obrigatório de preferência imediatamente após as operações de soldagem [11].

3 OBJETIVOS.

Estudo da influência da velocidade de alimentação do arame em uma soldagem de revestimento pelo processo TIG pulsado, utilizando consumível de Inconel 625® em forjados baixa liga 2 1/4 Cr 1 Mo normalizado, temperado e revenido aplicado em equipamentos novos ou recuperação de equipamentos em serviço na indústria de óleo e gás que estão sujeitos a contato com fluídos corrosivos, fornecendo orientações na escolha dos parâmetros críticos de controle de velocidade do arame na obtenção da composição química do revestimento em função da diluição inerente do processo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta etapa do trabalho será demonstrada a descrição dos materiais e amostras utilizadas e os métodos utilizados para estudar a influência da velocidade de alimentação do arame na soldagem de revestimento anticorrosivo pelo processo TIG pulsado com consumível de Inconel 625® em aço forjado baixa liga 2 1/4 Cr 1Mo temperado e revenido.

4.1 MATERIAL BASE

O processo de soldagem será realizado em um corpo de prova, proveniente de uma barra em aço ASTM A182 Gr F22 classe 3 modificado, com diâmetro externo de 254mm (10"), trepanada com espessura de 25,4mm (1") sendo produzida em forno elétrico e desgasificada a vácuo, conformada por forjamento com um grau de redução de redução 4,2:1 e submetida ao tratamento térmico de normalização, têmpera e revenimento. O material apresenta um limite de escoamento de 88kSI de escoamento e dureza de 237HBW na superfície. A figura 4.1, apresenta o corpo de prova sendo preparado para inicio do processo de soldagem.



Figura 4.1 - Corpo de Prova em Aço Forjado ASTM A182 Gr.F22 Classe 3.

A tabela 4.1 apresenta a composição química do corpo de prova utilizado e na tabela 4.2 e 4.3 temos as propriedades mecânicas do corpo de prova soldado, sendo LE o limite de escoamento, LR o limite de resistência, AL o alongamento e RA a redução de área.

Tabela 4.1 - Composição Química do corpo de prova em aço ASTM A182 Gr F22 classe 3 modificado, comparado com o especificado pela norma [4].

ELEMENTOS QUÍMICOS	ESPECIFICADO ASTM A182 Gr F22 Classe 3	CORPO DE PROVA UTILIZADO
C	0,05 - 0,15 %	0,128 %
Mn	0,30 - 0,60 %	0,570 %
P	0,040 Máx	0,011 %
S	0,040 Máx	0,010 %
Si	0,50 Máx	0,280 %
Ni	---	0,250 %
Cr	2,00 - 2,50%	2,434 %
Mo	0,87 – 1,13%	1,000 %
Cu	---	0,150 %
V	---	0,060%
Carbono Equivalente	---	0,938

Tabela 4.2 - Requisitos do ensaio de Tração do corpo de prova em aço ASTM A182 Gr F22.

PROPRIEDADES	LE, ksi (MPa)	LR, ksi (MPa)	AL (%)	RA (%)
ESPECIFICADO (Mínimo)	80 (552)	100 (689)	18	35
ENCONTRADO (Corpo de Prova)	88	107	23	67

Tabela 4.3 - Requisito de Impacto transversal para o corpo de prova em aço ASTM A182 Gr F22.

PROPRIEDADES	Temperatura (°C)	Energia Média (J)	Energia Individual
ESPECIFICADO (Mínimo)	- 46 °C	42 J	34 J
ENCONTRADO (Corpo de Prova)	- 46 °C	110 J	95 J

4.2 METAL DE ADIÇÃO

O metal de adição utilizado no revestimento será o arame de Inconel 625® ERNiCrMo-3, também conhecido como Inconel, classificado pela AWS A5.14 "Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods", com requisitos mecânicos determinados pelo fabricante [32].

Na tabela 4.4 é apresentada a composição química do metal de solda utilizado na soldagem do corpo de prova. Na tabela 4.5 pode-se verificar as propriedades mecânicas do consumível ERNiCrMo-3.

Tabela 4.4 - Composição Química em peso porcentual do metal de Adição do arame ERNiCrMo-3 utilizado no revestimento do forjado ASTM A182 Gr F22 [32].

ELEMENTOS QUÍMICOS	ESPECIFICADO (ASME II PARTE C - SFA 5.14)	CERTIFICADO DO FABRICANTE
C	0,10 %	0,020 %
Mn	0,50 %	0,010 %
Fe	5,00 %	0,070 %
P	0,02 %	0,005 %
S	0,015 %	0,001 %
Si	0,50 %	0,020 %
Cu	0,50 %	0,010 %
Ni	58,0 % (Mínimo)	65,30 %
Al	0,40 %	0,277 %
Ti	0,40%	0,186 %
Cr	20,0 a 23,0 %	21,70 %
Nb +Ta	3,15 a 4,15 %	3,640 %
Mo	8,0 a 10,0 %	8,700 %
OUTROS ELEMENTOS	0,50 %	Não declarado

Tabela 4.5 - Propriedades Mecânicas do metal de Adição do arame ERNiCrMo-3 utilizado no revestimento do forjado ASTM A182 Gr F22 [32].

PROPRIEDADES	LE (MPA)	LR (MPA)	AL (%)
ESPECIFICADO (Mínimo)	Não Especificado	690 MPa	Não Especificado
CERTIFICADO DO FABRICANTE	Não Especificado	1460 MPa	Não Especificado

4.3 PROCESSO DE SOLDAGEM

O processo de soldagem utilizado foi o TIG Automático processo arame quente, com corrente pulsada utilizando o arame ERNiCrMo-3 como metal de adição. O equipamento utilizado foi uma máquina da fronius modelo FPA 9000 ETR.

O sistema ETR "*Endless Torch Rotation*" possui um "módulo de transferência", que conduz todos os meios necessários para a soldagem (gás de proteção, líquido de arrefecimento da tocha), a corrente de soldagem e os sinais elétricos através de uma execução rotativa para a cabeça da tocha. Também é garantida uma alimentação ideal do arame, enquanto tanto a bobina de arame como o alimentador "giram juntos". Na figura 4.2, é apresentada a máquina de soldagem FPA 9000 ETR, apresentando o sistema de controle, metal de adição e a tocha utilizada no processo de soldagem do corpo de prova. Na figura 4.3, pode-se verificar os detalhes do sistema e interface de controle, programação e registro do equipamento de soldagem TIG Automático fronius FPA 9000ETR.



Figura 4.2 - Máquina de Soldagem TIG Automática Fronius FPA 9000-ETR [34].



Figura 4.3 - Detalhe do sistema e interface de controle, programação e registro FPA 9000 [34].

4.4 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM

4.4.1 PREPARAÇÃO

O corpo de prova após preparação da superfície foi alinhado e centralizado conforme figura 4.4, para ser submetido ao processo de soldagem na máquina TIG Automática Fronius FPA 9000-ETR. Foi realizado o pré-aquecimento da junta por maçarico no diâmetro interno a uma temperatura mínima de 150°C, conforme demonstrado na figura 4.5.



Figura 4.4 - Alinhamento do corpo de prova para ínicio do processo de soldagem.



Figura 4.5 - Pré-Aquecimento realizado por maçarico no corpo de prova.

4.4.2 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

O experimento de soldagem foi realizado conforme figura 4.6, onde se realizou a soldagem de três cordões de solda variando a velocidade de alimentação do arame, sendo que em meio perímetro do corpo de prova foram realizadas duas camadas de revestimento, desta forma busca-se avaliar seis condições de soldagem, conforme descrito na tabela 4.6.

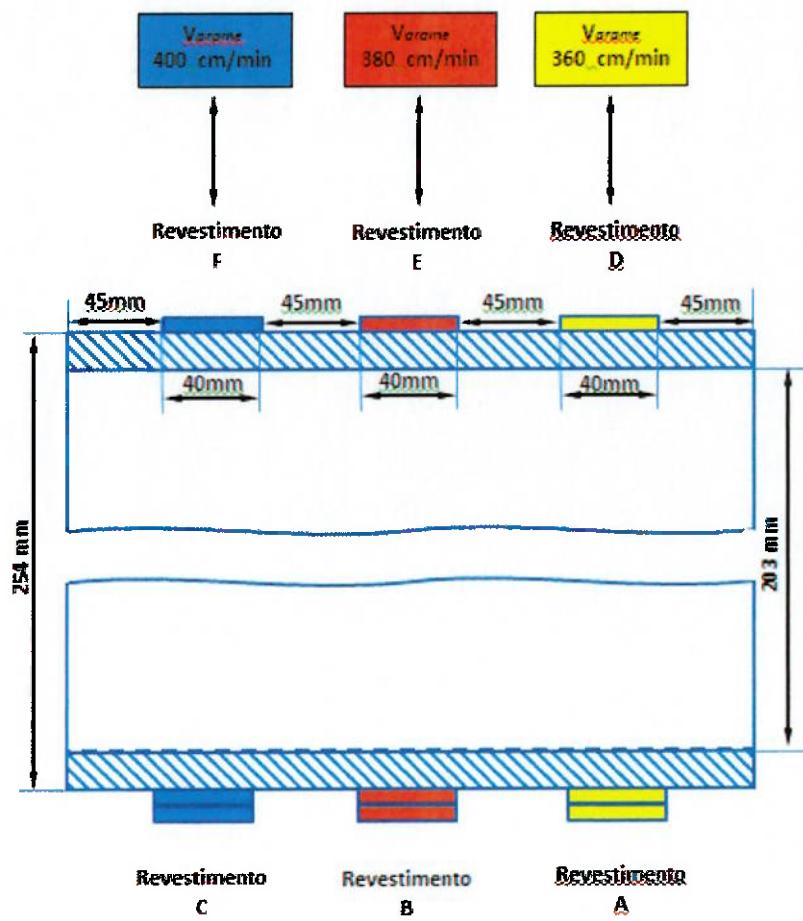


Figura 4.6 - Esquema da distribuição de soldagem realizada no corpo de prova.

Tabela 4.6 - Condições de soldagem realizadas para avaliação.

Soldagem	Velocidade Arame	Nº Camadas	Número de Passes
Revestimento A	360 cm / min	2	14 + 14
Revestimento B	380 cm / min	2	14 + 14
Revestimento C	400 cm / min	2	14 + 14
Revestimento D	360 cm / min	1	14
Revestimento E	380 cm / min	1	14
Revestimento F	400 cm / min	1	14

Os parâmetros utilizados para soldagem do corpo de prova foram mantidos constantes com exceção da velocidade de alimentação do arame, conforme detalhado na tabela 4.7, onde temos I_p sendo a corrente de pico, t_p o tempo de pico da corrente, I_b a corrente de base, t_b o tempo de base da corrente, V_t a tensão, V_s a velocidade de soldagem, ES a energia de soldagem, $Varame$ a velocidade de alimentação do arame, I_{dp} a Corrente de pico para pré-aquecimento do arame e a I_{dg} a corrente de base para pré-aquecimento do arame. Como gás de proteção, foi utilizado o argônio puro, sendo a vazão verificada na saída da tocha TIG através de um fluxômetro calibrado, sendo a vazão indicada na tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Parâmetros de Soldagem do corpo de prova.

Mapeamento da Soldagem		Parâmetros de Soldagem TIG Automático Pulsado							Arame ERNiCrMo-3 Ø1,2mm			Gás Argônio
Amostra	Camada	I_p (A)	t_p (s)	I_b (A)	t_b (s)	V_t (V)	V_s (cm/min)	ES (J/cm)	$Varame$ (cm/min)	I_{dp} (A)	I_{dg} (A)	Vazão (l/min)
A	1º	250	0,2	199	0,2	13,9	40,3	4646	360	60	40	16
D	1º	250	0,2	199	0,2	13,9	40,3	4646	360	60	40	16
B	1º	250	0,2	199	0,2	13,3	40,2	4457	380	60	40	16
E	1º	250	0,2	199	0,2	13,3	40,2	4457	380	60	40	16
C	1º	250	0,2	199	0,2	13,3	40,4	4434	400	60	40	16
F	1º	250	0,2	199	0,2	13,3	40,4	4434	400	60	40	16
A	2º	250	0,2	199	0,2	12,6	40,9	4150	360	60	40	16
B	2º	250	0,2	199	0,2	13,1	41,3	4273	380	60	40	16
C	2º	249	0,2	199	0,2	13,9	40,9	4568	400	60	40	16

Na figura 4.7, pode-se verificar a soldagem de revestimento realizada no corpo de prova em aço ASTM A182 Gr F22. Na figura encontra-se identificado às amostras A, B e C que se encontra com duas camadas de revestimento em meio perímetro do corpo de prova, bem como os revestimentos D, E e F que encontra-se com apenas uma camada de revestimento depositada em meio perímetro do corpo de prova.

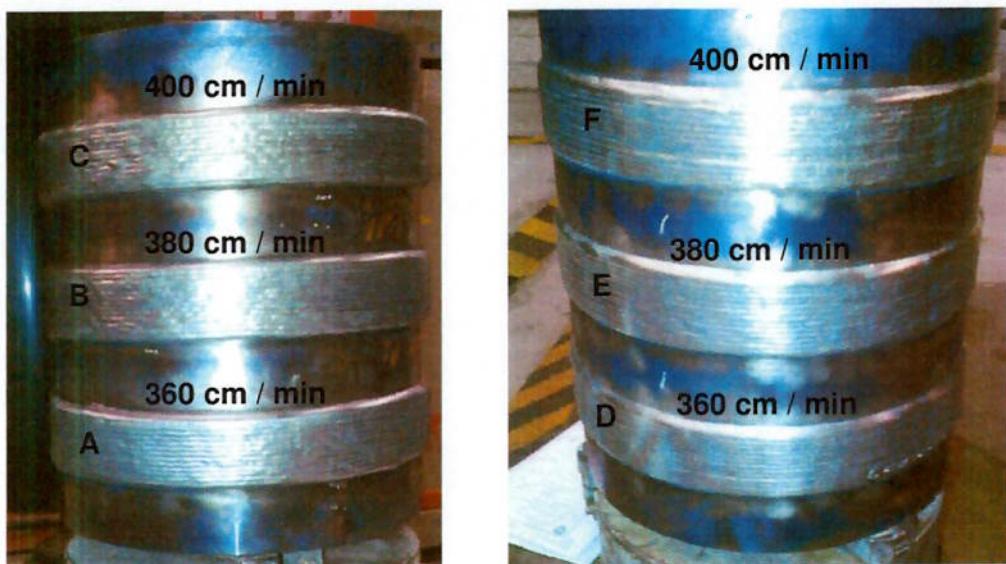


Figura 4.7 - Soldagem de revestimento com 1 e 2 camadas realizados nos corpos de prova na velocidade de soldagem de 360, 380 e 400 cm/min.

4.5 ALÍVIO DE TENSÕES

Após o processo de soldagem, foi realizado o processo de alívio de tensões. Na região das soldas foi fixado por soldagem de descarga capacitiva, três termopares tipo K, sendo o termopar número um posicionado na extremidade solda

realizado com uma velocidade de alimentação do arame de 400 centímetros por minuto, o termopar número dois na extremidade da solda de 380 centímetros por minuto e o termopar número três na extremidade da solda realizada com 360 centímetros por minuto, conforme apresentado na figura 4.8. O método de aquecimento foi realizado por resistências elétricas, foram utilizados dois grupos de resistência para realização do alívio de tensões na solda, conforme apresentado na figura 4.9.



Figura 4.8 - Posicionamento dos termopares.



Figura 4.9 - Montagem das Resistências Elétrica para realização do alívio de tensões pós soldagem.

O alívio de tensões após soldagem do corpo de prova foi realizado conforme parâmetros definidos na tabela 4.8, sendo gerado um registro gráfico conforme figura 4.10

Tabela 4.8– Especificação para Alívio de Tensões após a Soldagem

Alívio de Tensões pós Soldagem	
Parâmetros de Controle	Especificação
Temperatura Início de Controle	A partir de 300 °C
Taxa de Aquecimento	≤ 150 °C / h
Temperatura de Patamar	650 ± 5 °C
Tempo de Patamar	2h a 2h30 min
Taxa de Resfriamento	≤ 150 °C / h
Temperatura final de Controle	Até 300 °C
Número de Termopares	3 Mínimo



Figura 4.10 - Gráfico de Alívio de Tensões pós soldagem do corpo de prova.

4.6 ENSAIOS REALIZADOS

4.6.1 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos serão realizados baseados na qualificação exigidas pelas normas API 6A, NACE MR 0175 e ASME IX [2], [3], [35]. Os ensaios realizados serão: dobramento lateral, ensaio de tração, ensaio de impacto Charpy, macrografia, ensaio de micro dureza HV10 e análise química.

O ensaio de dobramento lateral será realizado em quatro amostras para cada revestimento e removido conforme localização da figura 4.11 para as amostras A, B e C com duas camadas e conforme figura 4.12 para as amostras D, E e F com uma camada.

A localização da remoção do ensaio de tração, impacto, macrografia e dureza também se encontram esquematizadas nas figuras 4.11 e 4.12.

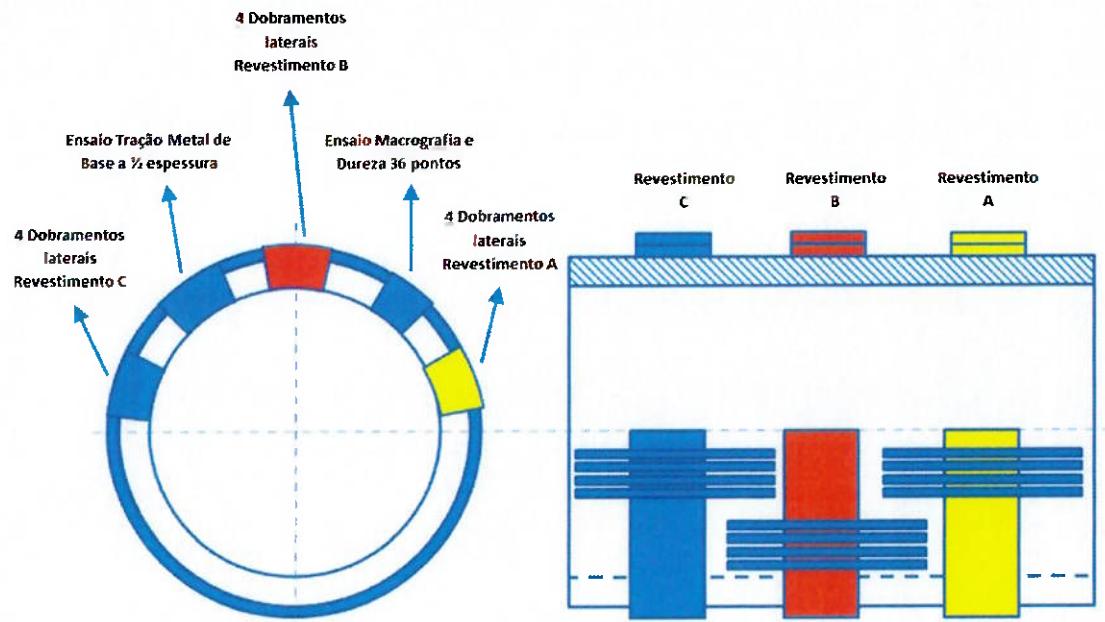


Figura 4.11 - Localização da remoção dos corpos de prova para ensaio de dobramento, macrografia e dureza para as amostras com duas camadas de revestimento e tração no metal de base.

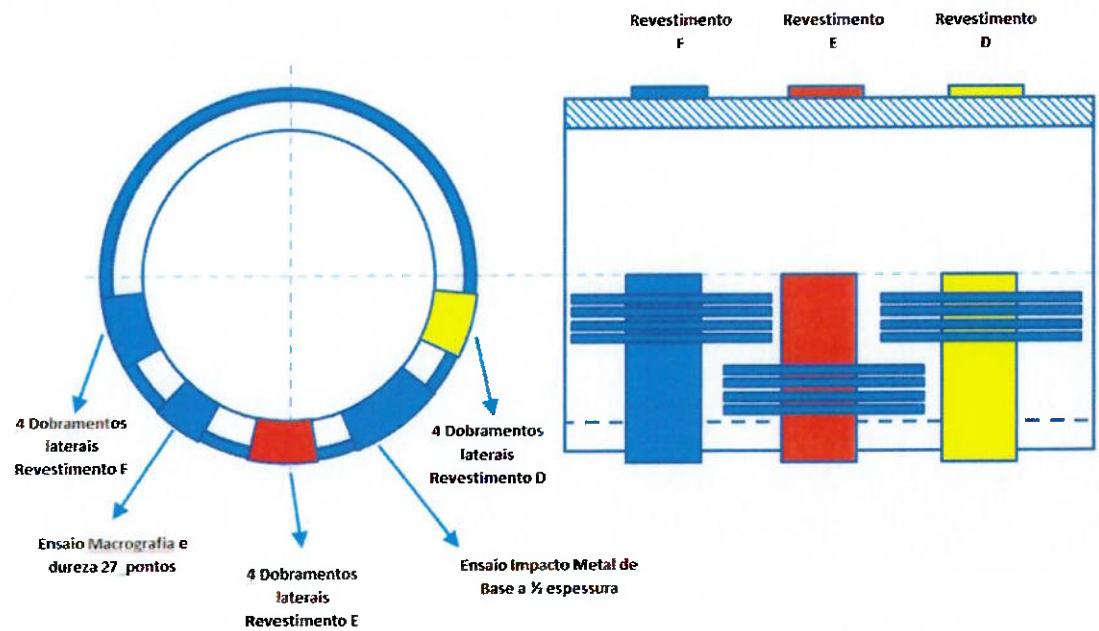


Figura 4.12 - Localização da remoção dos corpos de prova para ensaio de dobramento, macrografia e dureza para as amostras com uma camada de revestimento e ensaio de impacto no metal de base.

Na tabela 4.9 é apresentada a relação dos ensaios a ser realizada com o detalhamento da remoção, preparação, método de ensaio e critério de aceitação adotado para o estudo das amostras A, B, C, D, E, F com revestimento de soldagem de Inconel 625®.

O detalhamento como os descritos dos ensaios realizados encontra-se apresentadas nos tópicos subsequentes.

Tabela 4.9 - Relação de Ensaios Realizados nas Amostras de soldagem de revestimento.

Ensaios	Temperatura (°C)	Remoção	Preparação	Método de Ensaios	Critério de Aceitação
Dobramento Lateral	Ambiente	ASME IX - Figura QW-462.5(c)	ASME IX - Figura QW-462.2 Dimensões: 10 x 25,4 x 150 mm	ASME IX - QW -162 Ø do cutelo: 40 mm Distância entre roletes: 63 mm	ASME IX - QW-163
Tração Cilíndrica	Ambiente	A ½ espessura do metal de base	ASTM A370 – 14 Figura 4 Ø 12,7 x 60 mm	ASTM A370 – 14	Metal de Base
Ensaios de Impacto Charpy	- 46°C	ASME IX - QW - 171.3	ASTM A370 – 14 Figura 11 (b) 10,0 x 10,0 x 55 mm	ASTM A370-14	Metal de Base
Macrografia	Ambiente	Corte Transversal	ASME IX - QW 470 / 471	ASME IX - QW 470 / 471 Ataque Nital 10% Inspeção Lupa 10X	ASME IX - QW 470 / 471
Ensaios de Dureza	Ambiente	-	NACE MR0175 ISO 15156-2:2009 Figura 6	ASTM E384/2011 - E1	NACE MR0175 ISO15156-2:2009 Tabela A1
Análise Química	Ambiente	-	ASME IX Figura QW-462.5(a) 3,0 mm da linha de fusão	ASTM E-415:2008 ou ASTM E 1086-2008	API 6A 20th ED ISO 10423:2009 MOD., Tabela 15

4.6.1.1 Ensaio de Dobramento

Os corpos de prova de dobramento foram preparados conforme QW-462.2 com dimensões de 10 x 25,4x 200 mm. O método do ensaio foi realizado conforme norma ASME IX QW162, utilizando um diâmetro do cutelo de 40 mm e distância entre roletes de 63 mm.

Conforme especificado na norma ASME IX, QW-163, o corpo de prova ensaiado deve ser preparado e posicionado de forma que a solda e a zona afetada pelo calor encontrem-se contidas na parte submetida ao dobramento do corpo de prova. Para que o dobramento seja aprovado, os corpos de prova dobrados com revestimento de soldagem contra corrosão, não devem apresentar defeitos visíveis no revestimento com dimensão maior do que 1,5mm em qualquer direção ou maiores do que 3,0mm em qualquer região da interface entre o metal de base e o revestimento. [35].

4.6.1.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração será realizado conforme norma ASTM A370 figura 4 com dimensões de 12,7 mm de diâmetro de 60 mm de comprimento. Os ensaios serão efetuados em uma máquina universal de ensaio de materiais e será utilizado um extensômetro para verificação do escoamento. Os resultados obtidos no ensaio, em termos de carga e alongamento, serão registrados visando à comparação com os limites pré-estabelecidos para especificação do metal de base.

As propriedades que se visa obter neste ensaio serão: limite de escoamento, limite de resistência, alongamento total e redução de área. Para que o ensaio de tração seja considerado aprovado, os valores obtidos devem atender o mínimo especificado para o metal de base, que se encontram definidos conforme tabela 4.2.

4.6.1.3 Ensaio de Impacto Charpy V

Conforme norma API 6A, é requerido o ensaio de impacto para materiais que possuem requisito de tenacidade controlada [2]. O ensaio de impacto deve ser realizado em 3 corpos de prova conforme norma ASTM A370 figura 11 (b) com dimensões de 10 x 10 x 55 mm, utilizando a técnica do Charpy com entalhe em V. Para que o ensaio de impacto seja considerado aprovado, a média dos três corpos de prova testada deve possuir uma média de energia igual ou superior à média de energia especificada para o metal de base. Não mais do que um dos corpos de prova deve apresentar valor individual de energia abaixo da média e nenhum deve apresentar valor abaixo do mínimo individual especificado na tabela 4.3.

4.6.1.4 Ensaio Macrográfico e Ensaio de Dureza Vickers

O exame macrográfico foi realizado para dimensionar a espessura do metal depositado na soldagem com uma e duas camadas para as velocidades de alimentação do arame de 360, 380 e 400 centímetros por minuto, além de identificar

as regiões e extensão da ZAC, assim como a ocorrência de descontinuidades no revestimento soldado.

As amostras foram cortadas na transversal, lixadas e atacadas com Nital 10% (HNO_3 10% em álcool etílico) por cerca de 20 segundos. O ensaio de dureza Vickers foi realizado com carga de 10 kgf nos corpos de prova de macrografia e conduzido conforme a norma ASTM E 384. Foram feitas medições de dureza em 12 pontos em cada amostra do revestimento submetido com duas camadas e 9 pontos em cada amostra do revestimento submetido a uma camada, como mostra a Figura 4.13. No total, foram 63 medições de dureza realizada no metal de base, no metal de solda e na Zona afetada pelo calor das amostras de revestimento.

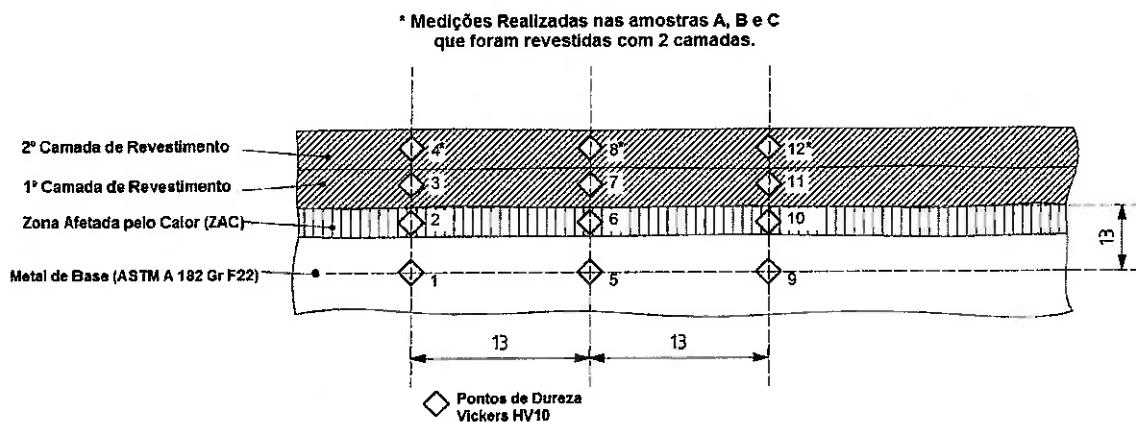


Figura 4.13 - Mapeamento para medição de dureza em soldagem de revestimento anticorrosivo conforme norma NACE MR0175 [3].

Para que o ensaio de dureza seja considerado aprovado, os valores obtidos devem atender o mínimo especificado conforme ANSI / NACE MR0175 /

ISO15156-2:2009 de 250 Vickers no metal de base e zona afetada pelo calor conforme figura 4.13.

4.6.1.5 Análise Química

Serão removidas amostras para realização da análise química de cada revestimento realizado conforme norma ASME IX figura QW-462.5(a) [34]. As análises químicas serão realizadas conforme norma ASTM E-415:2008 a 3,0 mm da linha de fusão conforme figura 4.14.

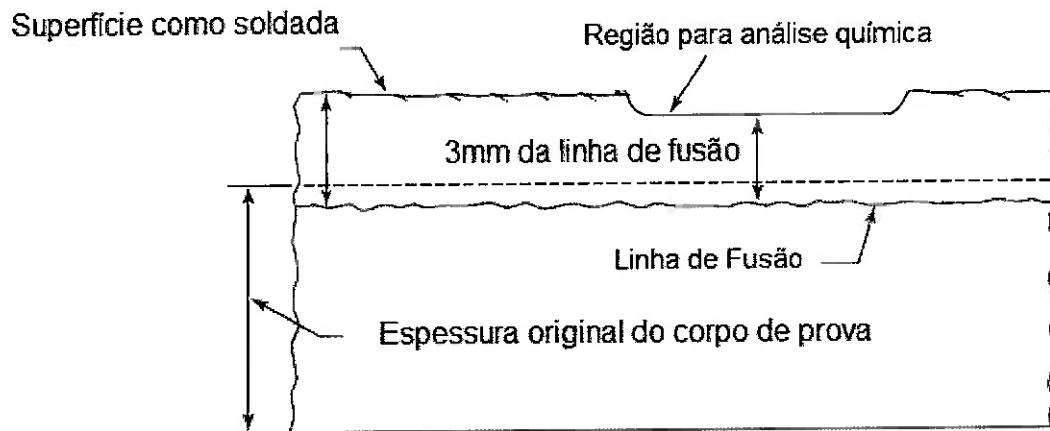


Figura 4.14 - Preparação para remoção de amostra para análise química do revestimento conforme ASME IX Figura QW-462.5(a) [34].

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ENSAIOS MECÂNICOS

Os resultados dos ensaios mecânicos realizados na soldagem de revestimento das amostras A, B, C com duas camadas e para as amostras D, E, F com uma camada são descritos a seguir:

5.1.1 ENSAIO DE DOBRAMENTO LATERAL

A remoção dos corpos de prova foi realizada conforme norma ASME IX QW 462.5(c), a preparação foi baseada na norma ASME IX QW 462.2, o método de ensaio seguiu como referência o ASME IX QW 162 e o critério de aceitação foi baseado na norma ASME IX QW 163 [35]. Foram realizados quatro ensaios de dobramento lateral (DL) para cada uma das amostras revestidas e os respectivos resultados são apresentados na tabela 5.1.

Todas as amostras testadas foram aprovadas e não apresentaram descontinuidades na região tracionada do revestimento da liga a base de níquel ERNiCrMo-3 com o metal base em aço ASTM A182 Gr F22.

Tabela 5.1– Resultado do ensaio de dobramento lateral

CP	Dobramento	Dimensões	Cutelo	Distância	Ângulo de	Resultados Obtidos
		(mm)	(mm)	(mm)	graus	
A	DL-01	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
A	DL-02	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
A	DL-03	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
A	DL-04	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
B	DL-05	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
B	DL-06	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
B	DL-07	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
B	DL-08	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
C	DL-09	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
C	DL-10	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
C	DL-11	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
C	DL-12	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
D	DL-13	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
D	DL-14	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
D	DL-15	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
D	DL-16	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
E	DL-17	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
E	DL-18	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
E	DL-19	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
E	DL-20	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
F	DL-21	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
F	DL-22	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
F	DL-23	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado
F	DL-24	10 x 28 x 150	40	63	180°	Aprovado

5.1.2 ENSAIO DE TRAÇÃO (METAL DE BASE)

A remoção dos corpos de prova foi realizada na metade da espessura do corpo de prova, ou seja, a 12,7mm, a preparação e o método de ensaio foi baseado na norma ASTM A370 [36] conforme figura 5.1. O resultado do ensaio de tração está apresentando na tabela 5.2.

O corpo de prova testado apresentou os valores de limite de escoamento, limite de resistência à tração, alongamento e redução de área dentro do especificado para o aço ASTM A182 Gr F22 conforme tabela 4.2.

Os valores encontrados no ensaio de tração é um indicativo que o processo de soldagem, bem como o alívio de tensões pós-soldagem realizado não interferiu nas propriedades mecânicas do aço temperado e revenido ASTM A182 Gr.F22.



Figura 5.1 - Corpo de prova de tração conforme ASTM A370 [36].

Tabela 5.2– Resultado do ensaio de tração do metal de base ASTM A182 Gr F22 após soldagem e alívio de tensões.

PROPRIEDADES	LE, ksi (MPA)	LR, ksi (MPA)	AL (%)	RA (%)
ESPECIFICADO (Mínimo)	80 (552)	100 (689)	18	35
ENCONTRADO (Corpo de Prova)	88 (607)	107 (738)	26	76

5.1.3 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY (METAL DE BASE)

O ensaio de impacto foi realizado em três corpos de prova, removidos a 12,7mm de espessura conforme norma ASTM A370 figura 11 (b) com dimensões de 10 x 10 x 55 mm, utilizando a técnica Charpy com entalhe em V. Na figura 5.2, é apresentado o corpo de prova de impacto, submetido à temperatura de teste de menos quarenta e seis graus Celsius.

O corpo de prova testado apresentou os valores de energia absorvida acima do critério de aceitação especificado para o metal base, sendo considerado aprovado conforme tabela 5.3.

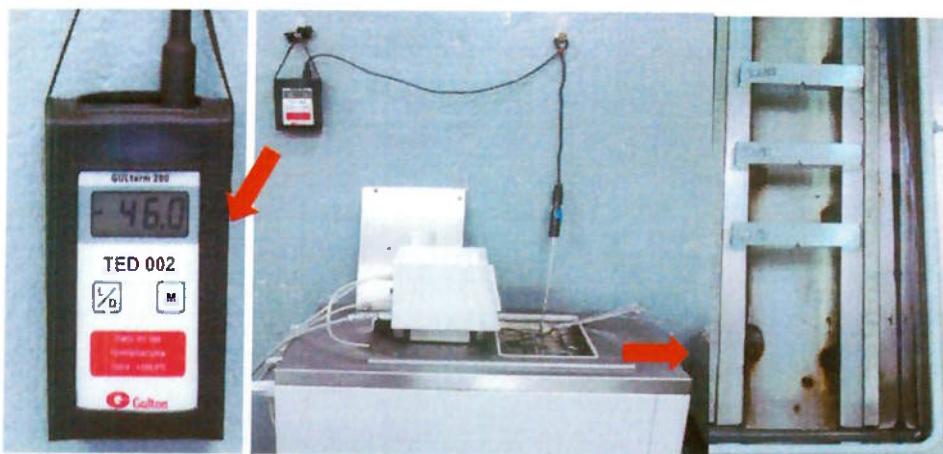


Figura 5.2 – Corpo de prova de impacto conforme ASTM A370 [36].

Tabela 5.3 – Resultado do ensaio de Impacto do metal base aço ASTM A182 Gr F22 após soldagem e alívio de tensões.

PROPRIEDADES	Temperatura (°C)	Energia Média (J)	Energia Individual
ESPECIFICADO (Mínimo)	- 46 °C	42 J	34 J
ENCONTRADO (Corpo de Prova)	- 46 °C	221 J	216/218/228 J

5.1.4 ENSAIO DE DUREZA VICKERS (HV10)

O ensaio de dureza Vickers foi realizado em cada amostra após corte na secção transversal, preparação em fresa, polimento e ataque químico com Nital 10% (HNO₃ 10% em álcool etílico) por cerca de 20 segundos. O ensaio de dureza vickers

foi realizado com carga de 10 kgf nos corpos de prova de macrografia. Foram feitas medições de dureza em 12 pontos em cada amostra do revestimento submetido com duas camadas conforme figura 5.3 e 9 pontos em cada amostra do revestimento submetido a uma camada como mostra a figura 5.4. Os resultados dos ensaios de dureza encontram-se reportados na tabela 5.4, 5.5 e 5.6 para a soldagem com duas camadas de revestimento e na tabela 5.7, 5.8 e 5.9 para os revestimentos com apenas uma camada.

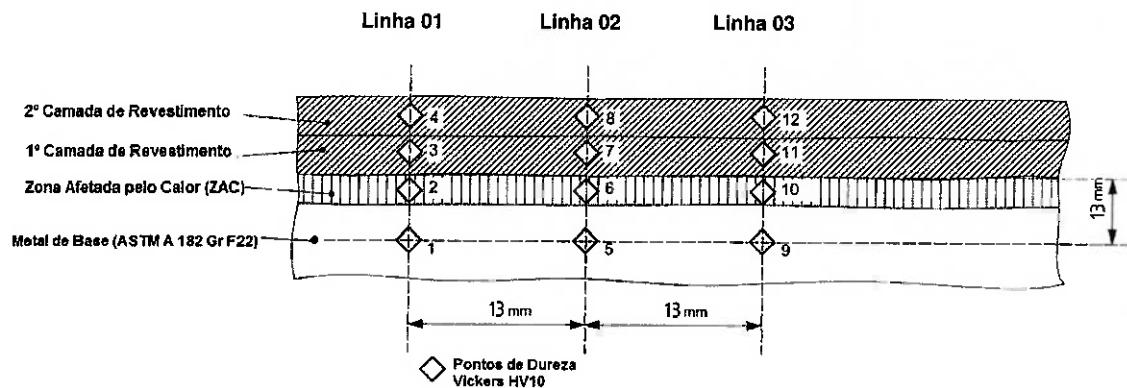


Figura 5.3 – Mapeamento para medição de dureza na soldagem de revestimento com duas camadas conforme norma NACE MR0175 [3].

Tabela 5.4 – Resultado do ensaio de Dureza Vickers da amostra A com velocidade de alimentação do arame de 360 cm / min e duas camadas de revestimento.

Amostra A (2 camadas)	Pontos	Linha 01	Linha 02	Linha 03
Metal Base	1 / 5 / 9	232 HV10	234 HV10	233 HV10
ZAC a 0,5 mm da LF	2' / 6' / 10'	261 HV10	261 HV10	271 HV10
ZAC a 1,0 mm da LF	2 / 6 / 10	250 HV10	239 HV 10	240 HV10
1º Camada	3 / 7 / 11	252 HV10	251 HV10	249 HV10
2º Camada	4 / 8 / 12	241 HV10	244 HV10	238 HV10

Tabela 5.5 – Resultado do ensaio de Dureza da amostra B com velocidade de alimentação do arame de 380 cm / min e duas camadas de revestimento.

Amostra B (2 camadas)	Pontos	Linha 01	Linha 02	Linha 03
Metal Base	1 / 5 / 9	228 HV10	231 HV10	233 HV10
ZAC a 0,5 mm da LF	2' / 6' / 10'	274 HV10	277 HV10	275 HV10
ZAC a 1,0 mm da LF	2 / 6 / 10	246 HV10	238 HV10	247 HV10
1º Camada	3 / 7 / 11	254 HV10	260 HV10	258 HV10
2º Camada	4 / 8 / 12	251 HV10	245 HV10	247 HV10

Tabela 5.6 – Resultado do ensaio de Dureza da amostra C com velocidade de alimentação do arame de 400 cm / min e duas camadas de revestimento.

Amostra C (2 camadas)	Pontos	Linha 01	Linha 02	Linha 03
Metal Base	1 / 5 / 9	232 HV10	234 HV10	238 HV10
ZAC a 0,5 mm da LF	2' / 6' / 10'	264 HV10	276 HV10	259 HV10
ZAC a 1,0 mm da LF	2 / 6 / 10	243 HV10	238 HV10	249 HV10
1º Camada	3 / 7 / 11	248 HV10	253 HV10	253 HV10
2º Camada	4 / 8 / 12	234 HV10	235 HV10	232 HV10

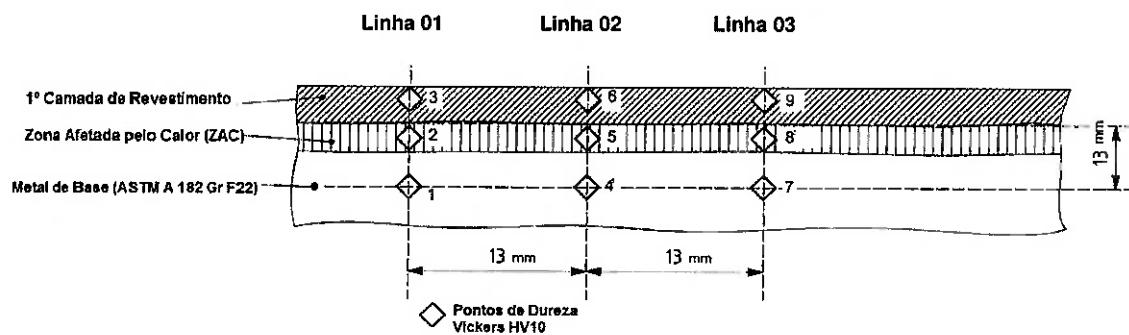


Figura 5.4 – Mapeamento para medição de dureza na soldagem de revestimento com uma camada conforme norma NACE MR0175 [3].

Tabela 5.7 – Resultado do ensaio de Dureza da amostra D com velocidade de alimentação do arame de 360 cm / min e uma camada de revestimento.

Amostra D (1 camada)	Pontos	Linha 01	Linha 02	Linha 03
Metal Base	1 / 5 / 9	237 HV10	233 HV10	232 HV10
ZAC a 0,5 mm da LF	2' / 6' / 10'	288 HV10	283 HV10	285 HV10
ZAC a 1,0 mm da LF	2 / 6 / 10	245 HV10	243 HV10	236 HV10
1° Camada	3 / 7 / 11	229 HV10	228 HV10	222 HV10

Tabela 5.8 – Resultado do ensaio de Dureza da amostra E com velocidade de alimentação do arame de 380 cm / min e uma camada de revestimento.

Amostra E (1 camada)	Pontos	Linha 01	Linha 02	Linha 03
Metal Base	1 / 5 / 9	234 HV10	238 HV10	237 HV10
ZAC a 0,5 mm da LF	2' / 6' / 10'	278 HV10	272 HV10	278 HV10
ZAC a 1,0 mm da LF	2 / 6 / 10	250 HV10	236 HV10	248 HV10
1° Camada	3 / 7 / 11	227 HV10	233 HV10	234 HV10

Tabela 5.9 – Resultado do ensaio de Dureza da amostra F com velocidade de alimentação do arame de 400 cm / min e uma camada de revestimento.

Amostra F (1 camada)	Pontos	Linha 01	Linha 02	Linha 03
Metal Base	1 / 5 / 9	235 HV10	235 HV10	234 HV10
ZAC a 0,5 mm da LF	2' / 6' / 10'	273 HV10	252 HV10	255 HV10
ZAC a 1,0 mm da LF	2 / 6 / 10	245 HV10	244 HV10	250 HV10
1° Camada	3 / 7 / 11	242 HV10	236 HV10	236 HV10

Na figura 5.5 é apresentado um gráfico comparativo dos resultados das durezas médias apresentadas para as amostras A, B e C com duas camadas e na figura 5.6 para as amostras D, E e F com uma camada para as velocidades de alimentação do arame de 360, 380 e 400 centímetros por minuto.

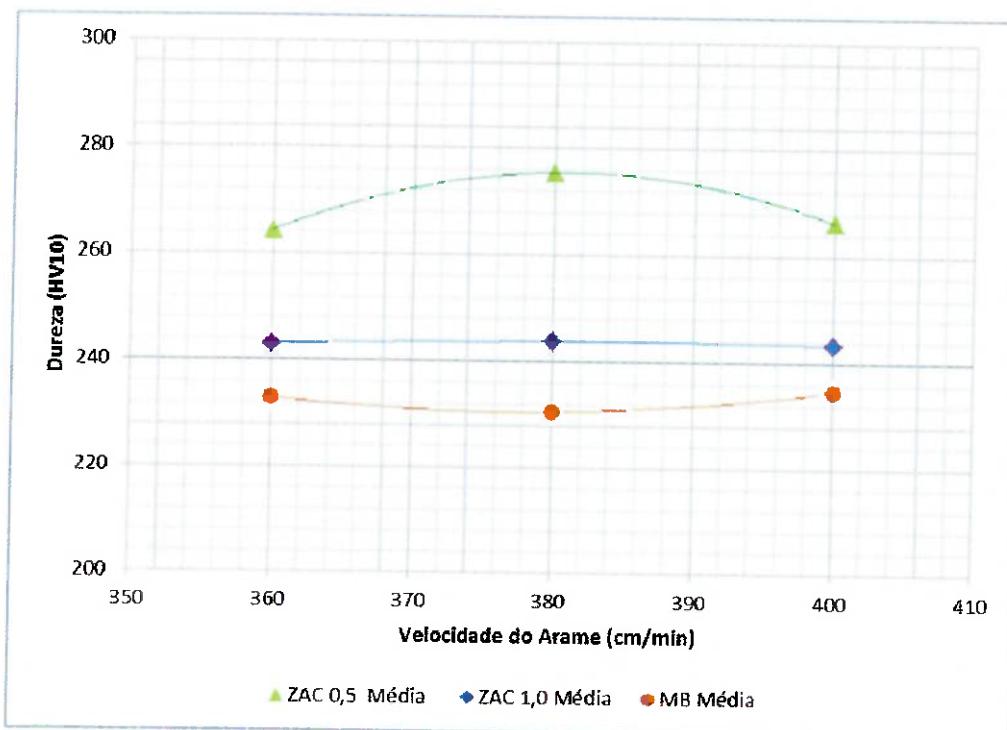


Figura 5.5 – Gráfico comparativo com as médias dos valores de dureza das amostras A, B, C com 2 camadas de revestimento nas regiões a 0,5mm e 1,0mm da linha de fusão na zona afetada pelo calor e no metal de base.

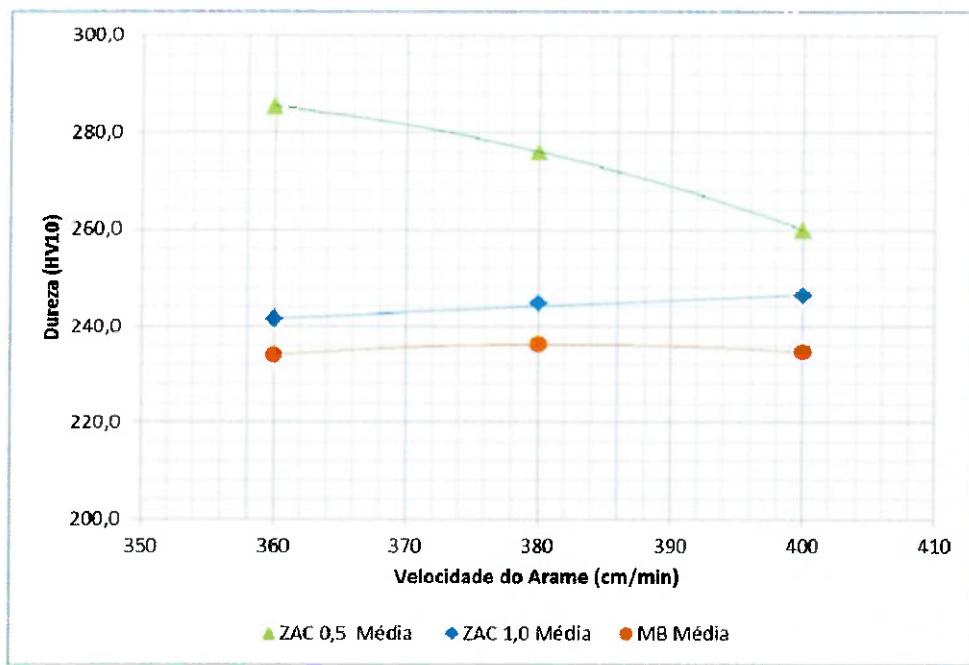


Figura 5.6 – Gráfico comparativo com as médias dos valores de dureza das amostras D, E, F com 1 camada de revestimento nas regiões a 0,5mm e 1,0mm da linha de fusão na zona afetada pelo calor e no metal de base.

5.1.5 MACROGRAFIA

O ensaio macrográfico foi realizado nas amostras após corte na secção transversal, lixamento, polimento e ataque químico com água régia, foi utilizado uma lupa com aumento de dez vezes, os corpos de prova foram preparados conforme norma ASME IX QW471 e o critério de aceitação conforme ASME IX QW 183 [35].

Na figura 5.7, pode-se observar a macrografia das amostras A, B, C soldadas com duas camadas de revestimento respectivamente com velocidade de alimentação do arame de 360, 380 e 400 centímetros por minuto. A macrografia apresentada encontra-se aprovada conforme resultados apresentados na tabela 5.10.

Na figura 5.8, pode-se observar a macrografia das amostras D, E, F soldadas com apenas uma camada de revestimento respectivamente com velocidade de alimentação do arame de 360, 380 e 400 centímetros por minuto. A macrografia apresentada encontra-se aprovada conforme resultados apresentados na tabela 5.11.

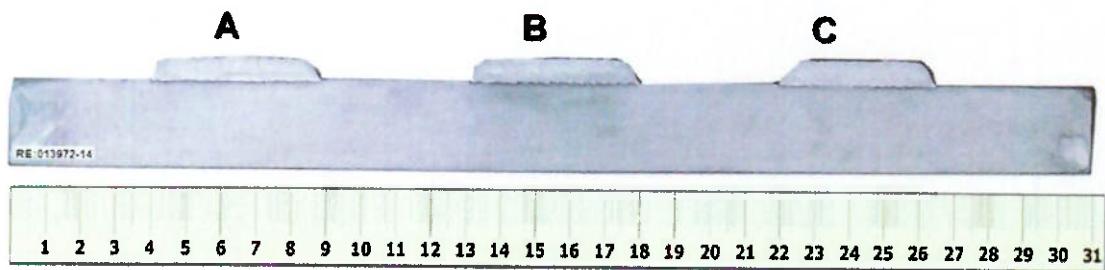


Figura 5.7 – Macrografia dos revestimentos A, B, C com duas camadas de revestimento.

Tabela 5.10 – Avaliação da altura, penetração e do revestimento por soldagem das amostras A, B e C com duas camadas.

CP	ALTURA	PENETRAÇÃO	DILUIÇÃO	RESULTADO
A	6,1 mm	0,5 mm	6,2 %	Fusão completa do metal base, ZAC e livre de trincas
B	6,4 mm	0,5 mm	4,2 %	Fusão completa do metal base, ZAC e livre de trincas
C	6,8 mm	0,7 mm	3,7 %	Fusão completa do metal base, ZAC e livre de trincas

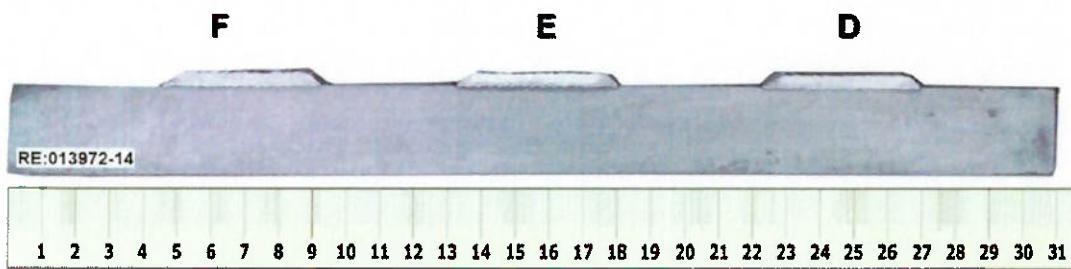


Figura 5.8 – Macrografia dos revestimentos D, E, F com uma camada de revestimento.

Tabela 5.11 – Avaliação da altura, penetração e do revestimento por soldagem das amostras D, E, F com uma camada.

CP	ALTURA	PENETRAÇÃO	DILUIÇÃO	RESULTADO
D	3,2 mm	0,7 mm	6,2 %	Fusão completa do metal base, ZAC e livre de trincas
E	3,3 mm	0,5 mm	5,1 %	Fusão completa do metal base, ZAC e livre de trincas
F	3,7 mm	0,5 mm	5,8 %	Fusão completa do metal base, ZAC e livre de trincas

Na figura 5.9, é apresentado à variação com deposição do revestimento com duas camadas da altura de reforço e da penetração da soldagem para diferentes velocidades de alimentação do arame. Os pontos em verde são referentes aos resultados para altura do reforço e os pontos em laranja são referentes a penetração da soldagem para as amostras A, B, C. Analisando o resultado da altura do reforço podemos verificar que a velocidade de alimentação do arame, influencia diretamente

na altura do depósito de revestimento e por consequência no volume de metal depositado. Analisando a penetração de soldagem, temos uma pequena tendência de diminuição da penetração para maiores velocidades de alimentação do arame.

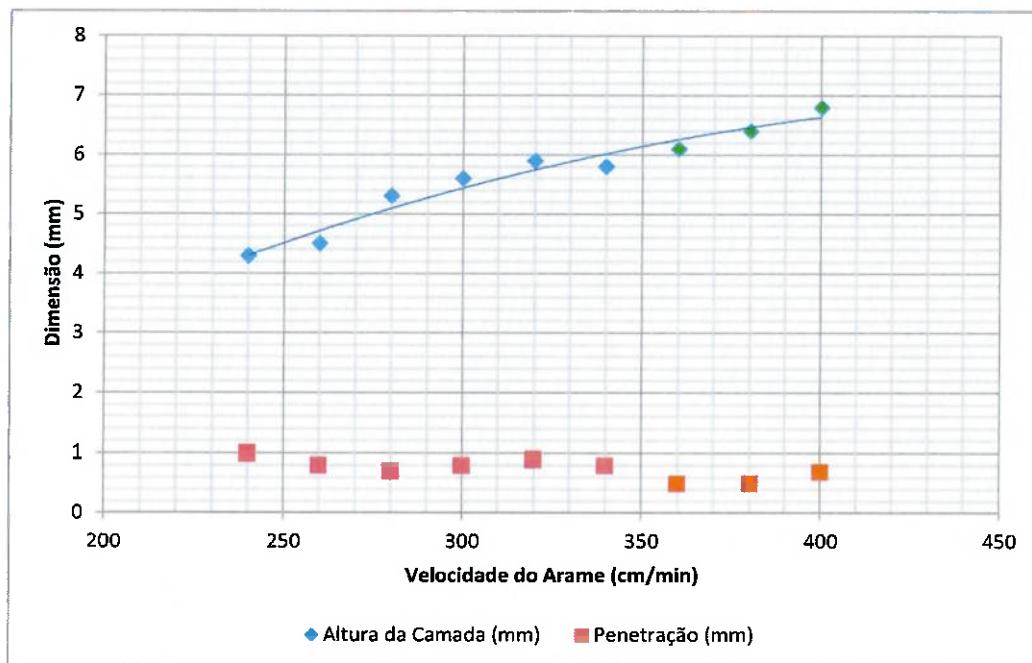


Figura 5.9 – Gráfico da variação da altura do reforço e da penetração de soldagem com a velocidade de alimentação do arame. Em verde são apresentados os resultados de altura da camada e em laranja da penetração das amostras A, B, C.

5.1.6 ANÁLISE QUÍMICA

As amostras para realização da análise química de cada revestimento foram realizadas conforme norma ASTM E-415:2008 a 3,0 mm da linha de fusão conforme figura 4.14 e os resultados das análises químicas encontram-se descritos

na tabela 5.12. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente de 22ºC através do aparelho de espectrômetro de emissão ótica marca ARL Modelo 3460 com certificado de calibração N2014-0731 de 31/07/2014.

O critério de aceitação utilizado foi conforme norma API 6A / ISO10423 Tabela 15, onde para ligas de níquel UNS N06625 temos duas classes de qualificação sendo ferro cinco, com revestimentos com até cinco por cento de ferro e ferro dez com até dez por cento de ferro [2].

O resultado do teor de ferro encontrado nas amostras A, B, C com duas camadas de revestimento atingiram a classe de qualificação ferro 5, apresentando os seus resultados com teores inferiores a cinco por cento de ferro a três milímetros da linha de fusão do metal depositado conforme especificado pela norma API 6A / ISO10423 Tabela 15 [2]. No entanto o teor de ferro encontrado nas amostras D, E, F com apenas uma camada de revestimento apenas atingiram a classe de qualificação ferro 10 conforme especificado pela norma API 6A / ISO10423 Tabela 15 [2].

Analizando o teor de ferro encontrado para as amostras com uma e duas camadas de revestimento, podemos observar uma redução média de 70% do teor de ferro no metal depositado com a aplicação de duas camadas de revestimento.

Na figura 5.10 pode-se observar a tendência dos elementos químicos cromo, níquel e ferro para as amostras com uma e duas camadas de revestimento. Analisando a tendência dos elementos químicos com a velocidade de alimentação do arame, é observada um menor diluição para valores maiores de alimentação do metal de adição, comprovando que para uma mesma energia de soldagem, quanto maior o volume de metal depositado, menos calor é transferido para o metal de base.

Tabela 5.12 – Resultado da análise química do revestimento a três milímetros da linha de fusão para as amostras com duas camadas de revestimento A, B, C e para as amostras com uma camada de revestimento D, E, F.

Amostra	Elementos Obtidos em %													
	C	Si	S	P	Mn	Cr	Mo	W	Ti	Al	Nb	Fe	Ni	
A	0,019	0,023	0,001	0,001	0,019	21,415	8,922	0,018	0,180	0,236	3,659	2,673	62,79	
B	0,018	0,021	0,001	0,001	0,015	21,667	9,127	0,019	0,182	0,235	3,743	1,849	63,08	
C	0,020	0,021	0,001	0,001	0,013	21,660	8,967	0,017	0,179	0,226	3,674	1,438	63,74	
D	0,027	0,037	0,001	0,002	0,051	19,674	8,225	0,013	0,169	0,228	3,393	8,183	59,94	
E	0,026	0,030	0,001	0,002	0,037	20,153	8,525	0,014	0,174	0,227	3,513	5,963	61,29	
F	0,026	0,033	0,001	0,002	0,040	20,132	8,516	0,015	0,174	0,231	3,523	6,448	60,81	

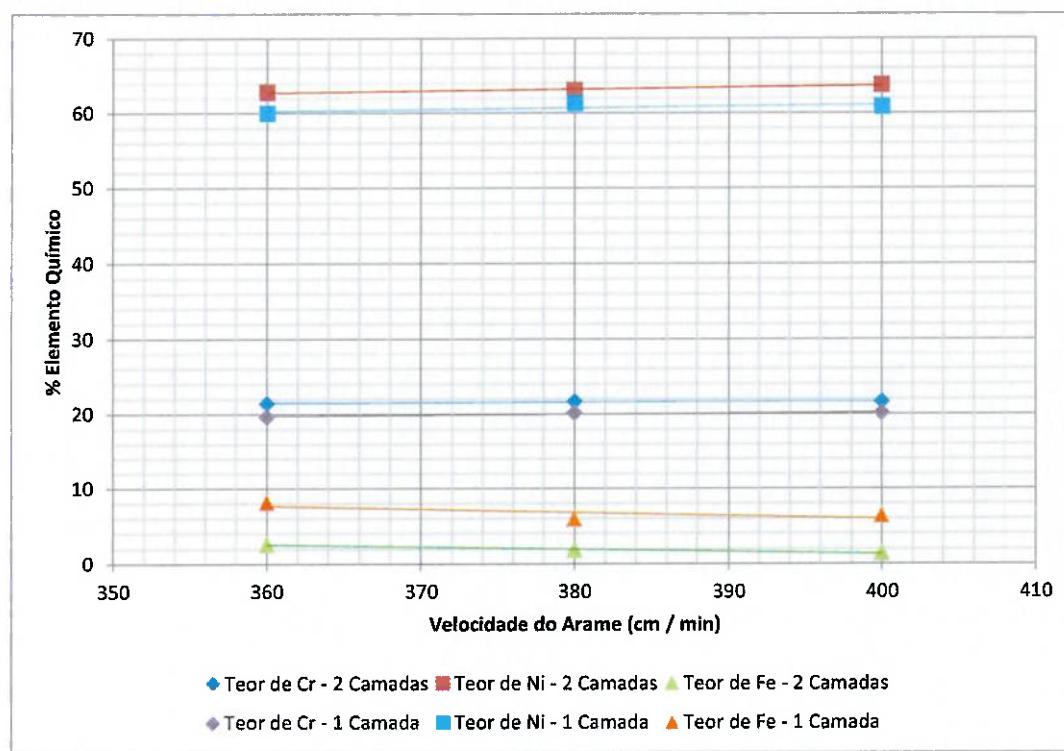


Figura 5.10 – Gráfico comparativo com a análise química das amostras A, B, C com duas camadas de revestimento e das amostras D, E, F com uma camada de revestimento.

Na figura 5.11, é apresentado à variação do teor de ferro para a soldagem de revestimento a 3,0 mm da linha de fusão para soldagem de revestimento anticorrosivo pelo processo TIG pulsado com consumível de Inconel 625® em aço forjado baixa liga 2 1/4 Cr 1Mo temperado e revenido. Os pontos em verde são referentes aos resultados das amostras A, B, C. Analisando o teor de ferro podemos observar que para velocidades de alimentação do arame acima de 300 centímetros por minuto, é atingido o teor de ferro abaixo de cinco por cento de fração de massa.

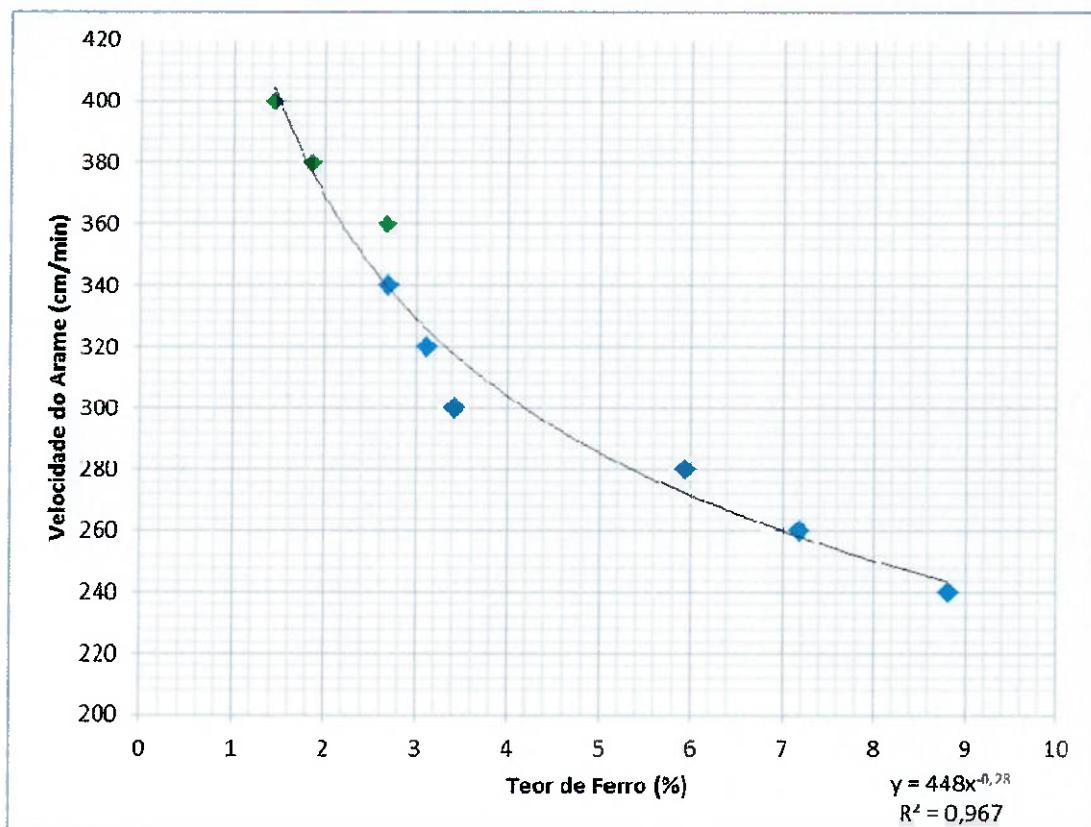


Figura 5.11 – Gráfico da variação do teor de ferro com a velocidade de alimentação do arame para soldagem de revestimento de ligas de níquel 625 em aço forjado 2 1/4 Cr 1 Mo temperado e revenido. Em verde são apresentados os resultados das amostras A, B, C.

6 CONCLUSÕES

Com base nos materiais utilizados, as técnicas de soldagem aplicadas e os resultados obtidos concluir que:

1. O teor de ferro em fração de massa no metal de solda depositado sofre influência direta da velocidade de alimentação do arame de soldagem, e apesar da mesma não ser considerada uma variável essencial de soldagem para o processo de revestimento pelo processo TIG Automático, o código ASME IX determina como variável essencial o heat input ou acréscimo do volume do metal depositado por unidade de comprimento para a primeira camada.
2. É obtida uma menor diluição do metal de base com o metal de adição para valores maiores de alimentação do arame, comprovando que para uma mesma energia de soldagem, quanto maior o volume de metal depositado, menos calor é transferido para o metal de base.
3. A realização de uma ou duas camadas de revestimento por soldagem apresenta uma grande influência no teor de ferro do metal depositado por soldagem, em função da maior da diluição da primeira camada com o metal de base.
4. As propriedades mecânicas e a tenacidade do metal de base não sofreram alterações relevantes após o ciclo térmico de soldagem bem como do alívio de tensões pós-soldagem.
5. A divergência dos resultados encontrados para os valores de dureza Vickers realizados na zona afetada pelo calor (ZAC) a meio milímetro e a um milímetro da linha de fusão indicam que houve um endurecimento na região próxima a zona de ligação em consequência da velocidade de resfriamento ocasionando

uma tempera nesta região e sugere-se que a norma NACE MR0175 estabeleça uma distância padrão como referência a ser utilizada a partir da linha de fusão de forma a padronizar os resultados obtidos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar análise micrográfica da zona afetada pelo calor de forma a verificar a variação de dureza encontrada.
2. Realizar ensaios de corrosão de forma a verificar a influência da velocidade de alimentação do arame com a resistência a corrosão.
3. Ampliar o estudo variando os metais de base de forma a verificar que o comportamento estudado é válido independentemente do metal de base revestido.

8 REFERÊNCIAS

1. NETO, J.B.O; COSTA, A.J.D. A Petrobrás e a exploração de Petróleo Offshore no Brasil: um approach evolucionário. RBE v.61 n.1/p;95-109. Rio de Janeiro, 2007.
2. API 6A / ISO 10423:2009 (Modified), Petroleum and natural gas industries Drilling and production equipment— Wellhead and christmas tree equipment
3. NACE MR0175 / ISO15156:2003 – Petroleum and natural gas industries – Materials for use in H2S environments in oil and gas production
4. ASTM A182 / A182M:2014 Standard Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service1
5. CHIAVERINI, V. Tecnologia mecânica volume II– Materiais de contrução mecânica 1º ed. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil. 1978
6. CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos – Características gerais, tratamentos térmicos e principais tipos 7º ed. São Paulo: Publicação da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 1996
7. SILVA, A.L.V.C; MEI P.R. Aços e ligas especiais. 2º ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2006. Páginas 97, 282-284
8. HONEYCOMBRE, R.W.K. Steels – Microstructure and Properties. London Edward Arnold (Publishers) Ltd, 1981 Páginas 192-194., 230

9. MADELEINE DURAND-CHARRE , Microstructure of Steels and Cast Irons. Paris Ed. Sirpe, 2003 Páginas 297-299.
10. KARL-ERIK THELNING, Steel and its Heat Treatment – Bofors Handbook. The Butterworth Group, 1975 Páginas 191-194, 219-229.
11. ZIEDAS, SELMA E TATINI, IVANISA – Soldagem, São Paulo, 1997 Coleção Tecnologia Senai Páginas 125-128.315-319, 331-333
12. SILVA, C. C.: MACHADO, J. P. S. E., SANTANA, H.B.; e SOBRAL, A. V. C. Estudos dos tipos de corrosão provocadas por petróleos pesados em juntas soldadas de materiais aplicados em revestimentos de torres de destilação. Artigo Científico. 2006. Disponível em: <http://www.engesolda.ufc.br/publicacoes/encontros/encontro19.html>. Acesso em: 11 ago.2014
13. PALANI, P. K. e MURUGAN, N. Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW. Journal of Materials Processing Technology, v. 190, n. 1-3, p. 291-299, 2007.
14. KANNAN, T. e MURUGAN, N. Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality. Journal of Materials Processing Technology, v. 176, n. 1-3, p. 230-239, 2006.
15. BALASUBRAMANIAN, V.; LAKSHMINARAYANAN, A. K.; VARAHAMOORTHY, R. e BABU, S. Application of response surface methodology to prediction of dilution in plasma transferred arc hardfacing of stainless steel on carbon steel. International Journal of Iron and Steel Research, v. 16, n. 1, p. 44-53, 2009.
16. SHAHI, A. S. e PANDEY, S. Modelling of the effects of welding conditions on dilution of stainless steel claddings produced by gas metal arc welding

- procedures. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 196, n. 1-3, p. 339-344, 2008.
17. WAINER, E: BRANDI, S.D.B E MELLO, F.D.H.M. *Soldagem Processos e Metalurgia*, São Paulo, 1992 Páginas 60,64
18. MARQUES, P.V: MODENESI, P.J: e BRACARENSE, A.Q. *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*, Belo Horizonte, 2009. Páginas 205-209.
19. KOU, S. "Welding Metallurgy/", John /wiley & sons;2002. Páginas 145-167
20. *Welding Handbook – Materials Application*, vol. Part 2 Volume 4,8th Edition edn. Miami; 1998;
21. *Acta Metallurgica Sinica* .(English Letters), Vol.23 No.4 Páginas 312-320 August, 2010
22. *The International Journal of Engineering And Science (IJES)*,Volume 1 Issue 1, Páginas 01-05 , Novembro 2012
23. *Practical welding today*, Reprint adapted from a feature article published in July/Aust 1999.
24. *Welding Handbook – Welding Processes*, Part 1 Volume 2, 9th Edition. Miami; 2004 , Página 132, 137;
25. SURESH, M.V.; VAMSI KRISHNA, B.; VENUGOPAL, P.; PRASAD RAO, K. Effect of pulse frequency in gas tungsten arc welding of powder metallurgical preforms. *Science and Technology of Welding and Joining* , v.9, p.362-368, 2004.

26. FEDELE, R.A. Influência da energia de soldagem no desempenho da zona fundida de soldas mulipasse de aços inoxidáveis duplex. Dissertação (Mestrado). Departamento de Eng. Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, 179p, 2001.
27. GUNARAJ, V., MURUGAN, N., Prediciton and optimitzation of weld bead volume for submerged arc process – part1. American Welding Society. P. 286s-294s,2000.
28. WAINER, E.; BRANDI, S.D; MELLO, F.D.H; Soldagem Processos e Metalurgia, 1º ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1992
29. FILHO, I.G.S. Estudo da influência dos parâmetros de soldagem de revestimento resistente à corrosão pelo processo TIG modalidade arame quente na diluição. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná - . Curitiba , 2007
30. SUN, Z.; KUO, M.; PAN, D. Twin-Wire Gas Tungsten Arc Cladding Offers Increased Deposition Rates. Welding Journal. P.61-64. Outubro. 1999.
31. RAMIREZ, A.J.& LIPPOLD, J. C. High temperature behavior of Ni-base weld metal: Part II – Insight into the mechanism for ductility dip cracking. Materials and science and Engineering A, v.380, n.1-2, p. 245-258,2004.
32. ASME, AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEER – Boiler and Pressure Vessel Code – Section II part C. Specification for Welding Rods, Eletrodes and Filler Metals. 2010.
33. Máquina de Soldagem Fronius, disponível em:
http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-518D24BD-CF8784A3/ronius_brasil/hs.xls/40_3148.htm#.VI42B9LF8VI
Acesso em: 02, dez, 2014

34. ASM – Metals Handbook Volume 04 - Heat Treating, 1991.
35. ASME IX – Asme Boiler and pressure vessel code - Welding, Brazing and Fusing Qualifications, 2013.
36. ASTM A370 – Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Product, 2014.