

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**DANILLO BRAGA CALLEGARI
IGOR TRANCOSO DADALTO**

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DOS PROCESSOS DE
SOLDAGEM NA REFORMA DO ALTO FORNO I DA ARCELOR
MITTAL TUBARÃO**

**VITÓRIA
2011**

**DANILLO BRAGA CALLEGARI
IGOR TRANCOSO DADALTO**

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DOS PROCESSOS DE
SOLDAGEM NA REFORMA DO ALTO FORNO I DA ARCELOR
MITTAL TUBARÃO**

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Osvaldo Guilherme Comineli, Dr.

VITÓRIA
2011

CALLEGARI, Danillo Braga; DADALTO, Igor Trancoso.

Análise técnico – econômica dos processos de soldagem na reforma do alto forno I da Arcelor Mittal Tubarão / Danillo Braga Callegari; Igor Trancoso Dadalto - 2011
69f.

Orientador: Osvaldo Guilherme Comineli

Projeto de graduação – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico,
Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Soldabilidade. 2 .Processos de soldagem . 3. Arame tubular. 4. Ensaios mecânicos. 5. Custos. 6. Alto forno. 7. Qualidade. I. CALLEGARI, Danillo Braga. II. DADALTO, Igor Trancoso. III. Universidade Federal Do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Análise técnico– econômica dos processos de soldagem na reforma do alto forno I da Arcelor Mittal Tubarão

DANILLO BRAGA CALLEGARI

IGOR TRANCOSO DADALTO

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DOS PROCESSOS DE
SOLDAGEM NA REFORMA DO ALTO FORNO I DA ARCELOR
MITTAL TUBARÃO**

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 15 de dezembro de 2011.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr., Eng Osvaldo Guilherme Comineli
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Orientador

Prof. Dr., Eng Flávio José da Silva
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Examinador

Msc.Eng Gabriel Haddad Souza Gava
Examinador

DEDICATÓRIA

Aos colegas do curso de Engenharia
Mecânica.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Rogério Alcântara pelo fornecimento de informações e material de apoio necessário para realização do trabalho, além de incentivo e conselhos.

RESUMO

O Alto forno I da Arcelor Mittal Tubarão (AMT) detém o recorde mundial de tempo de produção sem interrupções, operando desde 1983. Visando manter seus excelentes resultados, atualmente a empresa prepara a sua reforma para 2012, o que inclui a troca de sua carcaça de aço. A nova carcaça será constituída de chapas de aço unidas por soldagem. Foi indicado para tal, o processo de soldagem com Arame Tubular, sendo também indicado o processo de soldagem com Eletrodo Revestido para eventuais reparos nas juntas soldadas. O presente trabalho faz uma análise técnico-econômica destes processos, a fim de se assegurar que os resultados fiquem dentro das especificações requeridas pela empresa. Ensaio mecânicos e um modelo teórico para avaliação de custos na soldagem foram utilizados para determinar as conclusões. Após análise dos mesmos verificou-se uma melhor relação custo benefício no processo de arame tubular, e ambos os processos tiveram resultados aprovados no testes requeridos para reforma.

Palavras-Chave: Alto Forno. Soldagem. Arame Tubular. Eletrodo Revestido. Ensaio Mecânicos. Custos.

ABSTRACT

The blast furnace # 1 of Arcelor Mittal Tubarão holds the world record for uninterrupted production time, operating since 1983. In order to maintain its excellent results, the company currently prepares its reform in 2012, which includes the exchange of its steel frame. The new frame will consist of steel plates joined by welding. Two different processes will be used, Flux-cored arc welding (FCAW) for the general reform and Shielded Metal Arc Welding (SMAW) for possible repairs in welded joints. This work is a technical and economic analysis of these processes in order to ensure that the results are within the specifications required by the company. Mechanical tests and a theoretical model for evaluating costs in welding were used to determine conclusions. After their examination there was a better cost benefit in the process Flux-cored arc welding (FCAW), and both processes have passed the test results required to reform.

.

Keywords: Blast furnace, Welding, Flux-cored arc welding, Shielded Metal Arc Welding, Mechanical tests, Costs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção transversal típica de um alto forno (fonte: http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Biblimat/siderurgia2.pdf)....	13
Figura 2 - Processo de soldagem com eletrodo revestido (fonte: apostila Eletrodo Revestido do fabricante ESAB).....	22
Figura 3 - Processo de soldagem com arame tubular (fonte: apostila Arame Tubular fabricante ESAB)	29
Figura 4 - Volume do cordão de solda (fonte: [1])	40
Figura 5 - Croqui da junta soldada (fonte: EPS ESAB).....	44
Figura 6 - Área transversal aproximada da junta soldada	44
Figura 7 - Chapa soldada para extração de corpo de prova transversal	51
Figura 8 - Equipamentos para realização de ensaio de tração (fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Ensaio_de_tração).....	52
Figura 9 - Equipamento para realização de ensaio de impacto (fonte: http://www.mspsc.eng.br/ciemat/ensaio130.pdf)	53
Figura 10 - Corpo de prova após ensaio de tração	57
Figura 11 - Corpo de prova após ensaio de dobramento, evidenciando a inexistência de trincas	58
Figura 12 - Perfil de energia absorvida nas diferentes zonas da região soldada	60
Figura 13 - Corpo de prova após ensaio de impacto	60
Figura 14 - Perfil de dureza segundo norma Petrobras – N133 [10]	61
Figura 15 - Perfil de dureza Vickers no plano superior	62
Figura 16 - Perfil de dureza Vickers no plano inferior	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do Alto Forno I na Arcelor Mittal Tubarão	14
Tabela 2 - Composição química (%) do aço DIN 17155 15 Mo3.....	15
Tabela 3 – Temperatura de pré aquecimento X carbono equivalente	19
Tabela 4 - Parâmetros elétricos do processo	35
Tabela 5 - Faixa de valores do fator de ocupação segundo modo de operação	42
Tabela 6 - Faixa de valores de eficiência prática segundo processo de soldagem ..	42
Tabela 7 - Custo teórico dos processos de soldagem em R\$/kg.....	49
Tabela 8 - Composição química (%) e propriedades mecânicas do aço	56
Tabela 9 - Composição química (%) e propriedades mecânicas do arame tubular..	56
Tabela 10 - Resultados de ensaios de tração(MPa).....	57
Tabela 11 - Resultados do ensaio de dobramento	58
Tabela 12 - Composição química (%) Aços ASTM A36 e ASTM A516 70	59
Tabela 13 - Resultados do ensaio de impacto Charpy	59
Tabela 14 - Resultado do ensaio de dureza Vickers	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 ALTO FORNO	13
2.1.1 Alto forno I – Arcelor Mittal Tubarão	14
2.2 AÇOS BAIXA LIGA	15
2.3 METALURGIA DA SOLDAGEM.....	16
2.3.1 Pré Aquecimento	17
2.3.1.1 Como determinar o pré aquecimento	18
2.3.2 Pós Aquecimento	20
2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO	20
2.4.1 Função dos revestimentos dos eletrodos.	22
2.4.2 Classificação dos revestimentos dos eletrodos	24
2.4.3 Tipos de revestimento	26
2.4.4 Vantagens e desvantagens do processo.....	27
2.5 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR	27
2.5.1 Componentes do fluxo em arames tubulares	29
2.5.2 Funções dos componentes dos fluxos	30
2.5.3 Vantagens e desvantagens do processo.....	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 ESCOLHA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	32
3.2 ESCOPO DOS SERVIÇOS DE SOLDAGEM.....	35
3.3 QUALIFICAÇÕES REQUERIDAS.....	36
3.4 PROCEDIMENTOS PRÉ - SOLDAGEM.....	37
3.4.1 Limpeza.....	37
3.4.2 Amanteigamento	37
3.4.3 Ponteamento	37
3.5 PROCEDIMENTOS DURANTE E PÓS - SOLDAGEM.....	38
4 COMPARATIVO ECONÔMICO	39
4.1 ESTIMATIVA E COMPARAÇÃO DE CUSTOS	39

4.2 METODOLOGIA.....	40
4.3 RESULTADOS	43
5 ENSAIOS DESTRUTIVOS	50
5.1 ENSAIO DE TRAÇÃO	51
5.2 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY	52
5.3 ENSAIO DE DOBRAMENTO	53
5.4 ENSAIO DE DUREZA	54
5.4.1 Ensaio de dureza Vickers.....	55
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
6.1 TESTE DE TRAÇÃO	56
6.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO	57
6.3 ENSAIO DE IMPACTO.....	58
6.4 ENSAIO DE DUREZA	60
7 CONCLUSÕES	65
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXO A - ESPECIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM	68
ANEXO B - CONSUMÍVEIS – ARAME E ELETRODO	70
ANEXO C - PARÂMETROS DE SOLDAGEM	71

1 INTRODUÇÃO

A Arcelor Mittal Tubarão irá promover em 2012 a reforma de seu Alto Forno I, que está em campanha há mais de 28 anos de forma ininterrupta. Apesar de excelentes resultados obtidos, todo este tempo de atividade ininterrupta gera algumas avarias em sua estrutura e com objetivo de garantir o prolongamento da vida útil do alto forno tornou-se necessário a parada do mesmo para manutenção e reparos. Destacam-se os procedimentos de soldagem que serão aplicados na reforma, sendo eles de extrema importância, e devem ser analisados e estudados de forma a garantir a qualidade requerida nas juntas soldadas, para atender as especificações de seu projeto.

O presente trabalho busca, em parceria com a empresa ENGESOLDA, fornecedora dos consumíveis que serão utilizados nos procedimentos de soldagem, fazer uma análise técnico econômica dos processos de soldagem das chapas de aço que constituem a nova carcaça do alto forno. Foram analisados os processos de soldagem com Eletrodo Revestido e soldagem com Arame Tubular.

O estudo é fundamentado na norma AWS A5.29 que prescreve os requerimentos para classificação de arames tubulares para soldagem de aço carbono baixa liga, e norma específica AWS A5.5 que prescreve os requerimentos para classificação de eletrodos revestidos usados no processo de soldagem de aço carbono baixa liga, além de procedimentos metodológicos (revisão bibliográfica, análise de modelos de custo, coleta de dados e análise de resultados).

Para análise econômica comparativa entre os processos será adotando um modelo proposto por [1], considerado simplificado, porém adequado ao propósito de comparação econômica dos processos indicados. Serão coletadas as informações suficientes ao estudo tanto do mercado como em laboratório prático.

Com o propósito da avaliação técnica da junta soldada, corpos de prova foram testados através de ensaios destrutíveis, ensaio de tração, impacto, dureza,

dobramento, no laboratório da fabricante de consumíveis ESAB, avaliando-se assim as características encontradas na respectiva junta e a qualidade do material combinado (de base e adição).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ALTO FORNO

O alto forno é “coração” de uma grande siderúrgica, pois nele o minério de ferro sofre o processo de redução e se produz o ferro gusa, matéria prima principal da fabricação do aço. Neste reator metalúrgico são carregados o sinter, pelotas, minérios, coque e outras adições (fundentes) quando necessário. Ar quente é insuflado pelas ventaneiras na parte inferior do forno em contra corrente com a carga, promovendo no interior do mesmo uma série de reações químicas de redução e fusão produzindo gusa e escória [2]. A representação de uma seção transversal típica de um alto forno é mostrada na figura 1.

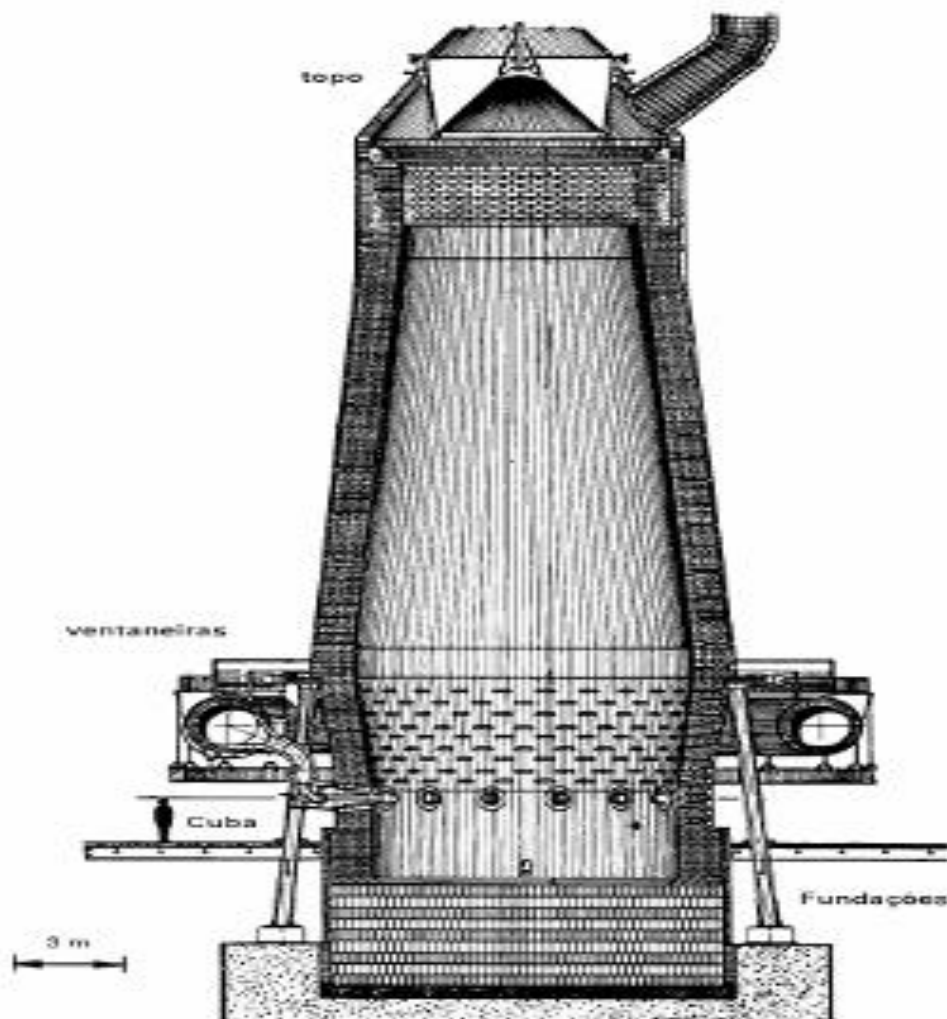


Figura 1 - Seção transversal típica de um alto forno
(fonte: <http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Biblimat/siderurgia2.pdf>)

2.1.1 Alto forno I – Arcelor Mittal Tubarão

Com 28 anos de operação ininterrupta, o Alto-Forno I da Arcelor Mittal Tubarão atingiu a marca recorde de 90 milhões de toneladas de ferro-gusa no mês de janeiro de 2011. Este equipamento tem a maior produção acumulada do mundo, mantendo um ritmo operacional de 10.200 mil toneladas diárias. A estabilidade da produção e a gestão eficiente permitiram alcançar este resultado, gerando economia no consumo de combustível e redução do custo produtivo. A tabela 1 traz as características do alto forno.

Tabela 1 - Características do Alto Forno I na Arcelor Mittal Tubarão

Fornecedor	Ishikawagina Harima Heavy Industries
Start-up	Novembro / 1983
Capacidade Anual	3.600.000 mt
ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO	
Volume interno	4415 m ³
Volume efetivo	3707 m ³
Diâmetro do cadinho	14 m
Ventaneiras (unidades)	38
Canais de corrida	4
Resfriamento	Stave Cooler
CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS	
Produção média diária	10.000 mt/dia
Consumo de coque	330 kg/mt
Volume de sopro	6.800 nm ³ /min
Pressão de sopro	4,4 kg/cm ²
Temperatura de sopro	1.250 °C
Pressão de topo	2,5 Kg/cm ²
Injeção de oxigênio	40 nm ³ /mt

Gás de alto forno	1.420 nm ³ /mt
Cargas por dia	222
Altura	110 m
Regeneradores	4
Sistema de carregamento	1
Carga metálica	65 % sinter/ 25 % pelotas/ 10% minério
Produção de escória	250 kg/mt
Basicidade de escória	CaO/SiO ₂ = 1,25
Produtividade	12.500 t/m ³ volume interno

Dentre as atividades desenvolvidas durante o reparo do alto forno, destaca-se a substituição da sua carcaça de aço, composta por chapas de aço resistentes ao calor segundo norma DIN 17155 15Mo3, composição química segundo a tabela 2, usados em equipamentos em que o aço deveria suportar esforços a alta temperatura (necessidade do aço de manter o limite de escoamento a alta temperatura). Os processos de soldagem envolvidos na reforma são de extrema importância, já que escolha correta é uma das formas de atender as propriedades mecânicas exigidas no projeto.

Tabela 2 - Composição química (%) do aço DIN 17155 15 Mo3

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
DIN 17155 15 Mo3	0,17	0,5	0,35	0,25	0,01	0,3	0,3	0,3	0,3

2.2 AÇOS BAIXA LIGA

Os aços de baixa liga contêm pequenas quantidades de elementos de liga que produzem consideráveis melhorias em suas propriedades. Os elementos de liga são

adicionados para melhorar a resistência mecânica e a tenacidade, e para retardar o processo corrosão [3].

Aços de baixa liga são geralmente definidos como aqueles que possuem um total de 1,5% a 5,0% de elementos de liga. As adições mais comuns são o manganês, silício, cromo, níquel, molibdênio e vanádio. Aços de baixa liga podem conter quatro ou cinco desses elementos de liga em diversos teores.

Estes aços de baixa liga possuem maior limite de escoamento e de resistência que aços doces ou aços carbono estruturais. Por causa desta maior resistência, permitem uma redução de peso das estruturas que os utilizam e são especificados para automóveis, caminhões, equipamentos pesados, e estruturas metálicas diversas “on shore e off shore”.

Aços carbono comuns, de baixa tenacidade a fratura a baixas temperaturas, não são confiáveis em aplicações críticas. Por isso, aços de baixa liga com adição de níquel são frequentemente empregados em situações de baixa temperatura. Os aços perdem muito de sua resistência a altas temperaturas. Para evitar essa situação, são adicionadas pequenas quantidades de cromo ou de molibdênio.

2.3 METALURGIA DA SOLDAGEM

Operações de aquecimento e resfriamento controladas aplicadas aos aços influenciam na microestrutura dos aços e determinam suas propriedades. Não há dúvida que um processo de soldagem é uma operação metalúrgica idêntica a que ocorre numa siderúrgica, em escala nanoscópica. Portanto, os conceitos metalúrgicos de termodinâmica, físico-química, solidificação, reações de óxi-redução e metalurgia física são plenamente aplicáveis ao processo de soldagem. Assim, uma junta soldada possui uma região que fundiu e solidificou, da mesma forma que um lingote; e uma Zona Termicamente Afetada (ZTA) que sofre operações equivalentes a um tratamento térmico.

Pelo simples fato de aços baixo carbono não responderem a tratamentos térmicos de têmpera, as operações de pré e pós aquecimento em soldagem raramente são

necessárias em aços de baixo carbono ou estruturais, embora sejam ocasionalmente empregados para evitar empenamento ou para garantir baixa dureza e facilitar a usinagem.

2.3.1 Pré Aquecimento

Os metais em sua maioria são bons condutores de calor, conseqüentemente o calor na região de soldagem é rapidamente escoado por toda a massa envolvida no processo, acarretando um resfriamento relativamente rápido. Em alguns metais esse resfriamento rápido pode contribuir para a formação de microestruturas prejudiciais na região de soldagem. O pré-aquecimento da junta a ser soldada é uma maneira de reduzir a taxa de resfriamento do metal. A temperatura de pré-aquecimento pode variar de 50°C a 540°C, sendo mais comumente aplicada na faixa de 150°C a 200°C [3].

Durante a soldagem de aços de alto carbono ou de alta liga existe o perigo de que o depósito de solda e a zona termicamente afetada contenham altos percentuais de martensita, um constituinte duro e frágil do aço. Tais soldas possuem alta dureza e baixa tenacidade e podem mesmo vir a trincar durante o resfriamento. O objetivo do preaquecimento (e também do pós-aquecimento) é manter o teor de martensita da solda a um nível mínimo. Basicamente estas operações reduzem a taxa de resfriamento da junta soldada, evitam a formação da martensita e reduzem a probabilidade de fissuração [3].

A possibilidade de trincas causadas pela formação da martensita é agravada pela presença de hidrogênio. Portanto o controle das fontes de hidrogênio (umidade, graxas óleo, ferrugem, contaminação de revestimento e gases) são também extremamente importantes na prevenção da trincas.

Em resumo, o pré-aquecimento combinado com o controle de hidrogênio reduz:

- O risco de trincas por hidrogênio(ou trincas a frio);
- As tensões de contração;
- A dureza na zona termicamente afetada (ZTA).

Se estas ações devem ou não ser aplicados depende do teor de carbono e de outros elementos de liga no metal sendo soldado, ou seja, o carbono equivalente do aço. Se nos ensaios de tração e impacto dos aços soldados sem pré ou pós aquecimento apresentarem baixa ductilidade ou dureza muito alta, é indicativo da necessidade dos mesmos. Além da composição química, a rigidez da junta a ser soldada e o processo de soldagem também influenciam a necessidade de se realizar um pré aquecimento. A necessidade do pré-aquecimento aumenta com os seguintes fatores:

- Teor de carbono do material de base;
- Teor de ligas do material de base;
- Tamanho da peça;
- Temperatura inicial;
- Velocidade de soldagem;
- Diâmetro do consumível

2.3.1.1 Como determinar o pré aquecimento

A composição do material de base deve ser conhecida para se escolher a temperatura de pré-aquecimento correta, pois ela é controlada pelo carbono equivalente do aço, que é um fator afetado pelo [3]:

- O teor de carbono do material de base;
- O teor de ligas do material de base;

Basicamente quanto maior for o teor de carbono do material de base, maior será a temperatura de pré-aquecimento requerida. Esse raciocínio se aplica também ao teor de ligas, mas num grau levemente menor.

Um método simples para determinar a necessidade de preaquecimento de uma solda é o do carbono equivalente (C_{eq}). A temperabilidade de um aço está relacionada ao seu teor de carbono acrescido dos teores de certos elementos de

liga. Quanto maior for o carbono equivalente maior será a temperatura de pré-aquecimento requerida.

O carbono equivalente pode ser obtido na seguinte relação:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Outros fatores importantes para se determinar a temperatura de pré-aquecimento são a espessura e o dimensões do componente. A temperatura de pré-aquecimento aumenta com o tamanho e a espessura do componente.

A Tabela 3 fornece valores sugeridos de temperaturas de preaquecimento para diferentes valores de carbono equivalente:

Tabela 3 – Temperatura de pré aquecimento X carbono equivalente

Carbono Equivalente %	Temperatura recomendada
< 30	Opcional
31 – 45	100°C - 200°C
45 – 60	200°C - 250°C
> 60	250°C - 300°C

O pré-aquecimento a 120 - 150°C é geralmente empregado na soldagem multipasse em seções de espessura maior que 25 mm para reduzir a susceptibilidade da solda à fissuração.

Quando a temperatura de pré-aquecimento correta for determinada é essencial que esta temperatura seja medida e mantida durante a operação de soldagem.

Normalmente todas as aplicações que requerem pré-aquecimento requerem também resfriamento lento.

2.3.2 Pós Aquecimento

O pós-aquecimento consiste em reduzir a taxa de resfriamento da junta soldada pela manutenção de uma fonte de aquecimento na peça imediatamente após a solda ter sido realizada. É bem diferente de outros tratamentos executados após o resfriamento da solda tais como alívio de tensões, revenimento e recozimento [3].

Assim como no pré-aquecimento, o resultado é uma microestrutura mais próxima do equilíbrio, de forma a evitar a formação de fases duras como martensita ou bainita, aumentando-se a tenacidade e ductilidade na região da solda. O pós-aquecimento raramente é aplicado de forma isolada; é quase sempre conjugado com o pré-aquecimento.

O pós-aquecimento é mais frequentemente empregado em aços altamente temperáveis, mas algumas vezes é utilizado em aços menos temperáveis se for difícil a aplicação de um pré-aquecimento adequado devido à dimensão das peças sendo soldadas [3].

Em certos casos, utilização de processos de soldagem com maior volume de escória pode ser uma saída alternativa para reduzir a velocidade de resfriamento e dispensar o pré e pós aquecimento.

2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO

No processo de soldagem com eletrodo revestido, também conhecido como soldagem manual a arco elétrico, a união de metais se processa pelo aquecimento proveniente de um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo revestido e o metal de base (peça a ser soldada). O eletrodo é formado por um núcleo metálico ("alma"), com 250 a 500 mm de comprimento, revestido por uma camada de minerais (argila, fluoretos, carbonatos, etc) e/ou outros materiais (celulose, ferro ligas, etc), com um diâmetro total típico entre 2 e 8mm. O metal fundido do eletrodo é continuamente

transferido através do arco elétrico até a poça de fusão, formando assim, o metal de solda. A poça de fusão é protegida da atmosfera (O_2 e N_2) pelos gases de combustão do revestimento, que em função da sua constituição química se apresentam como revestimentos ácidos, celulósicos, rútilicos ou básicos. O metal depositado e as gotas do metal fundido que são ejetadas recebem uma proteção adicional através do banho de escória, que é formado pela queima de alguns componentes do revestimento. Outras funções do revestimento são proporcionar a estabilidade do arco, controlar a forma do cordão de solda e adicionalmente, pode ainda conter elementos que são incorporados à solda, influenciando sua composição química e características metalúrgicas [4].

A soldagem é realizada manualmente, com o soldador manuseando o eletrodo e controlando o comprimento do arco e a poça de fusão conforme desloca o eletrodo ao longo da junta. O maior inconveniente do processo é a baixa produtividade devido à interrupção para troca do eletrodo e remoção de escória.

Apesar do surgimento de novos processos de soldagem, o processo de soldagem por eletrodo revestido ainda é muito empregado graças à sua versatilidade, baixo custo de operação e simplicidade dos equipamentos necessários e a possibilidade de uso em locais de difícil acesso, ou sujeito a ventos. Outras desvantagens do processo são necessidades de cuidados especiais no tratamento e manuseio dos eletrodos revestidos e o grande volume de gases e fumos gerados durante a soldagem [4].

A figura 2 mostra esquematicamente o processo.

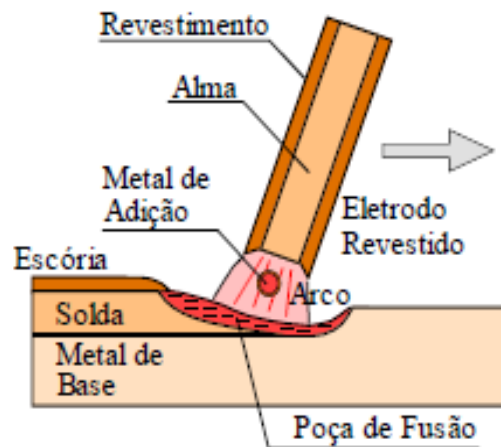


Figura 2 - Processo de soldagem com eletrodo revestido
(fonte: apostila Eletrodo Revestido do fabricante ESAB)

2.4.1 Função dos revestimentos dos eletrodos.

As funções do revestimento são:

- Proteção do metal de solda - a função mais importante do revestimento é proteger o metal de solda do oxigênio e do nitrogênio do ar quando ele está sendo transferido através do arco, e enquanto está no estado líquido. A proteção é necessária para garantir que o metal de solda seja íntegro, livre de bolhas de gás, e tenha a resistência e a ductilidade adequadas. Às altas temperaturas do arco, o nitrogênio e o oxigênio prontamente se combinam com o ferro e formam nitretos de ferro e óxidos de ferro que, se presentes no metal de solda acima de certos valores mínimos, causarão fragilidade e porosidade. O nitrogênio é o mais relevante, visto que é difícil controlar seu efeito uma vez que ele tenha entrado no depósito de solda. O oxigênio pode ser removido com o uso de desoxidantes adequados. Para evitar a contaminação da atmosfera o fluxo de metal fundido precisa ser protegido por gases que expulsem a atmosfera circundante do arco e do metal de solda fundido. Isso é conseguido usando-se no revestimento materiais que gerem gases e que se decomponham durante as atividades de soldagem e produzam a atmosfera protetora [4].

- Estabilização do arco - um arco estabilizado é aquele que abre facilmente, queima suavemente mesmo a baixas correntes e pode ser mantido empregando-se indiferentemente um arco longo ou um curto [4].
- Adições de elementos de liga ao metal de solda - uma variedade de elementos tais como cromo, níquel, molibdênio, vanádio e cobre podem ser adicionados ao metal de solda incluindo-os na composição do revestimento. É freqüentemente necessário adicionar elementos de liga ao revestimento para balancear a perda esperada desses elementos da vareta durante a atividade de soldagem devido à volatilização e às reações químicas. Eletrodos de aço doce requerem pequenas quantidades de carbono, manganês e silício no depósito de solda para resultar em soldas íntegras com o nível desejado de resistência. Uma parte do carbono e do manganês provém da vareta, mas é necessário suplementá-la com ligas ferro-manganês e em alguns casos com adições de ligas ferro-silício no revestimento [4].
- Direcionamento do arco elétrico - o direcionamento do fluxo do arco elétrico é obtido com a cratera que se forma na ponta dos eletrodos. O uso de aglomerantes adequados assegura um revestimento consistente que manterá a cratera e dará uma penetração adicional e melhor direcionamento do arco elétrico [4].
- Função da escória como agente fluxante - a função da escória é (1) fornecer proteção adicional contra os contaminantes atmosféricos, (2) agir como purificadora e absorver impurezas que são levadas à superfície e ficam aprisionadas pela escória, e (3) reduzir a velocidade de resfriamento do metal fundido para permitir o escape de gases. A escória também controla o contorno, a uniformidade e a aparência geral do cordão de solda. Isso é particularmente importante nas juntas em ângulo [4].
- Características da posição de soldagem - é a adição de certos ingredientes no revestimento, principalmente compostos de titânio, que tornam possível a

soldagem fora de posição (posição vertical e sobre cabeça). As características da escória — principalmente a tensão superficial e a temperatura de solidificação — determinam fortemente a capacidade de um eletrodo ser empregado na soldagem fora de posição [4].

- Controle da integridade do metal de solda - a porosidade ou os gases aprisionados no metal de solda podem ser controlados de uma maneira geral pela composição do revestimento. É o balanço de certos ingredientes no revestimento que tem um efeito marcante na presença de gases aprisionados no metal de solda. O balanço adequado desses ingredientes é crítico para a integridade que pode ser obtida para o metal de solda. O ferro-manganês é provavelmente o ingrediente mais comum utilizado para se conseguir a fórmula corretamente balanceada [4].
- Propriedades mecânicas específicas do metal de solda – propriedades mecânicas específicas podem ser incorporadas ao metal de solda por meio do revestimento. Altos valores de impacto a baixas temperaturas, alta ductilidade, e o aumento nas propriedades de escoamento e resistência mecânica podem ser obtidos pelas adições de elementos de liga ao revestimento [4].
- Isolamento da alma de aço - o revestimento atua como um isolante de tal modo que a alma não causará curto-circuito durante a soldagem de chanfros profundos ou de aberturas estreitas; o revestimento também serve como proteção para o operador quando os eletrodos são trocados [4].

2.4.2 Classificação dos revestimentos dos eletrodos

Os materiais do revestimento podem ser classificados em seis grupos principais:

- Elementos de liga - elementos de liga como molibdênio, cromo, níquel, manganês e outros conferem propriedades mecânicas específicas ao metal de solda [4].

- Aglomerantes - silicatos solúveis como os de sódio e potássio são empregados no revestimento dos eletrodos como aglomerantes. As funções dos aglomerantes são formar uma massa plástica de material de revestimento capaz de ser extrudada e secada no forno. O revestimento final após a passagem no forno deve apresentar uma dureza tal que mantenha uma cratera e tenha resistência suficiente para não se fragmentar, trincar ou lascar. Aglomerantes também são utilizados para tornar o revestimento não inflamável e evitar decomposição prematura [4].
- Formadores de gases - materiais formadores de gases comuns são os carboidratos, hidratos e carbonatos. Exemplos dessas substâncias são a celulose, os carbonatos de cálcio e de magnésio, e a água quimicamente combinada como a encontrada na argila e na mica. Esses materiais desprendem dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e vapor d'água (H_2O) às altas temperaturas do arco de soldagem. A umidade livre também é outro ingrediente formador de gases que é encontrado particularmente nos eletrodos do tipo celulósico e faz parte da formulação em quantidades de 2 - 3%. Ela apresenta uma influência marcante no arco e é um ingrediente necessário no eletrodo do tipo E6010 [4].
- Estabilizadores do arco - o ar não é suficientemente condutor para manter um arco estável, e então se torna necessário adicionar ao revestimento ingredientes que proporcionarão um caminho condutor para a corrente elétrica. Isso é particularmente verdadeiro durante a soldagem com corrente alternada. Materiais estabilizantes são os compostos de titânio, potássio e cálcio [4].
- Formadores de fluxo e escória - esses ingredientes são empregados principalmente para encorpar a escória e conferir propriedades como viscosidade, tensão superficial e ponto de fusão. A sílica e a magnetita são materiais desse tipo [4].

- Plasticizantes - os revestimentos são freqüentemente granulados e, para extrudá-los com sucesso, é necessário adicionar materiais lubrificantes e plasticizantes para fazer com que o revestimento flua suavemente sob pressão. Os carbonatos de cálcio e de sódio são os mais utilizados [4].

2.4.3 Tipos de revestimento

De acordo com a composição química do revestimento do eletrodo, estes podem ser ácidos, celulósicos, rútilicos ou básicos [5].

- Revestimento ácido: seus principais constituintes são o óxido de ferro e sílica (SiO_2). Os eletrodos ácidos podem ter pó de ferro na sua fórmula para aumentar o seu rendimento. Estes eletrodos apresentam fácil soldabilidade e boas propriedades mecânicas do metal de solda [5].
- Revestimento celulósico: seus principais constituintes são matérias orgânicas, a celulose. Apresenta uma formação de escória fina que permite realizar a soldagem em todas as posições, inclusive na vertical descendente. Estes eletrodos são de alta penetração e sempre são indicados para a soldagem de passe de raiz. Estes eletrodos têm boa soldabilidade e são indicados para a soldagem de tubulação [5].
- Revestimento rútilico: o principal constituinte deste revestimento é rutilo, mineral que apresenta grande quantidade de dióxido de titânio (TiO_2). Estes eletrodos apresentam fácil soldabilidade em qualquer posição de soldagem, o arco elétrico é muito estável mesmo em corrente alternada. A escória é de fácil remoção e as soldas têm bom acabamento [5].
- Revestimento básico: os principais elementos deste revestimento constituem de cálcio (CaCO_3 e CaF_2), que são elementos refratários. Podem ainda conter pó de ferro para aumentar o seu rendimento. Este revestimento caracteriza-se por apresentar excelentes propriedades mecânicas, incluindo tenacidade à baixa temperatura. Apresentam também baixo teor de hidrogênio (H_2) do

metal de solda. Este revestimento é higroscópico, ou seja, têm facilidade em absorver umidade e prejudicar as suas características operacionais, por isso é necessário cuidado com o seu armazenamento. Exigem que os soldadores sejam devidamente treinados e qualificados para utilizarem eletrodos com este tipo de revestimento [5].

2.4.4 Vantagens e desvantagens do processo

- Vantagens

- Equipamento simples, portátil e barato
- Não necessita de fluxos ou gases externos
- Pouco sensível a presença de correntes de ar
- Processo extremamente versátil em termos de matérias soldáveis
- Facilidade de atingir área de difícil acesso

- Desvantagens

- Aplicação difícil para materiais reativos
- Produtividade relativamente baixa
- Exige limpeza após cada passe de soldagem

2.5 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR

O processo com Arame Tubular (FCAW – Flux-Cored Arc Welding) é um processo de soldagem, por fusão, caracterizado pela abertura e manutenção do arco elétrico entre o metal de base (poça de fusão quando em regime) e o metal de adição. O eletrodo é fornecido em rolos; tem a forma de um tubo preenchido com materiais cuja função é similar à do revestimento no processo de soldagem por eletrodo revestido [6].

O processo combina determinadas características do processo MIG/MAG (continuidade na alimentação do arame) e do processo Eletrodo Revestido (possibilidade de manipulação da composição do fluxo). Em relação a proteção gasosa da região do arco, o processo pode ser classificado como auto protegido (parte do fluxo terá a função de formação da coluna gasosa) ou com proteção

gasosa (uso de proteção externa de gás, suprida com pressão e vazão adequadas). Assim como nos demais processos de soldagem ao arco elétrico, a proteção gasosa é justificada na necessidade de, ao mesmo tempo, viabilizar a proteção da gota metálica e da poça de fusão contra a atmosfera vizinha ao arco voltaico e, além disso, auxiliar na formação e manutenção do arco elétrico, além de refrigerar a tocha de soldagem [6].

Além da função de proteger o arco elétrico da contaminação pela atmosfera, o fluxo interno do arame pode também atuar como desoxidante através da escória formada, acrescentar elementos de liga ao metal de solda e estabilizar o arco. A escória formada, além de atuar metalurgicamente, protege a solda durante a solidificação.

Data da década de 30 o início da utilização de proteção gasosa nas operações de soldagem, para resolver problemas da contaminação atmosférica nas soldas de materiais reativos (i.e. alumínio, titânio e ligas de magnésio), tendo dado origem ao processo TIG (Tungsten Inert Gas). Utilizando o mesmo princípio de funcionamento do TIG, ou seja, um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo e a peça, envolto por uma atmosfera protetora de gás inerte, surge em 1948 o processo MIG, o qual difere do anterior por utilizar um eletrodo consumível de alimentação contínua. Inicialmente utilizado para ligas altamente reativas, pois a utilização de gases inertes tornava seu custo elevado para utilização em aços carbono e baixa liga. Quando da introdução do CO_2 como gás de proteção revelou-se um processo bem aceito para soldagem de aço carbono e baixa liga, uma vez que barateou o custo do processo. No início apenas arame sólido era utilizado e, por volta dos anos 50, foi introduzido o uso de Arame Tubular com proteção gasosa. Na década de 60, o Arame autoprotetido foi introduzido por pesquisadores e engenheiros da Lincoln Electric. Nas décadas de 60 e 70 foi observado um substancial crescimento desse processo nos Estado Unidos, o mesmo ocorrendo no Japão na década de 80 [6].

A utilização de Arame Tubular deu uma alta qualidade ao metal de solda depositado, excelente aparência ao cordão de solda, boas características de arco, além de diminuir o número de respingos e possibilidade de solda em todas as posições, tendo ganhado popularidade para soldagem de aços carbono e baixa liga, em chapas de espessura grossa e fina. Muitas vezes sendo utilizado onde a geometria

de junta e posição de soldagem não permitia a aplicação de outros processos de alto rendimento tal como arco submerso.

A figura 3 mostra o processo de forma esquemática

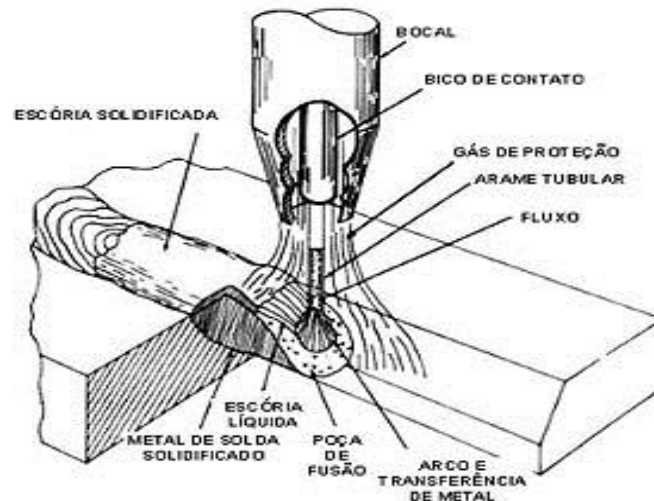


Figura 3 - Processo de soldagem com arame tubular (fonte: apostila Arame Tubular fabricante ESAB)

2.5.1 Componentes do fluxo em arames tubulares

Na soldagem com gás de proteção empregando arames tubulares com fluxo não metálico (flux-cored wires), os agentes do fluxo ou formadores de escória que constituem a parte não metálica do pó têm que desempenhar diversas funções [6].

Da mesma forma que nas escórias resultantes da fabricação dos aços, algumas escórias de solda são capazes de remover certas impurezas como o enxofre do metal fundido, porém com a boa qualidade dos aços modernos essa capacidade tem sido menos necessária do que no passado. Também importantes são as características da escória, que pode moldar e suportar o metal de solda ou ajudá-lo a molhar o metal de base. Dizemos que um consumível apresenta uma boa molhabilidade quando ele é capaz de se misturar facilmente à parcela do metal de base fundido, aumentando a diluição [6].

Alguns componentes não metálicos do pó não são formadores de escória, contudo servem para estabilizar o arco ou para controlar as características de queima do arame. Tais ingredientes podem estar presentes mesmo nos arames tubulares metálicos. Nos arames tubulares com fluxo não metálico os componentes estabilizadores do arco devem ser selecionados de tal modo que os resíduos remanescentes não prejudiquem a formação da escória.

2.5.2 Funções dos componentes dos fluxos

Conforme já citado anteriormente, a composição do fluxo é inspirada nos conceitos clássicos da siderurgia. Portanto, a adição de um componente no fluxo é inspirada no efeito que ele proporciona no processamento do aço e do problema que ele resolve naquele caso.

As funções básicas dos componentes do fluxo são:

- Desoxidante e formador de nitretos — como o nitrogênio e o oxigênio podem causar porosidade e fragilidade, são adicionados desoxidantes como o manganês e o silício. No caso de arames tubulares autoprotetidos, são adicionados formadores de nitretos como o alumínio. Ambos auxiliam na purificação do metal de solda [6];
- Formadores de escória — compostos formadores de escória como óxidos de cálcio, potássio, silício, ou sódio, são adicionados para proteger a poça de fusão da atmosfera. A escória ajuda a melhorar o perfil do cordão de solda, e escórias de rápida solidificação ajudam a suportar a poça de fusão na soldagem fora de posição. A escória também reduz a taxa de resfriamento, ação especialmente importante quando se soldam aços de baixa liga [6];
- Estabilizadores do arco — elementos como o potássio e o sódio auxiliam na obtenção de um arco suave e reduzem a quantidade de respingos [6];

- Elementos de liga — elementos de liga como o molibdênio, cromo, carbono, manganês, níquel e vanádio são empregados para aumentar a resistência, a ductilidade, a dureza e a tenacidade [6];
- Geradores de gases — minerais como a fluorita e o calcário decompostos quando aquecidos e produzem CO_2 e são normalmente usados para formar uma atmosfera protetora nos arames tubulares autoprotégidos [6].

2.5.3 Vantagens e desvantagens do processo

- Vantagens

- Soldagem pode ser executada em todas as posições.
- Alta taxa de deposição do metal de solda.
- Alta velocidade de soldagem.
- Pré-limpeza de metal não é necessária.
- Benefícios Metalúrgicos do fluxo, como o metal de solda sendo protegido inicialmente a partir de fatores externos, até o fluxo é lascado afastado.
- Processo pode ser automatizado.

- Desvantagens

- Porosidade - os gases não escapam a área soldada antes de endurecer o metal, deixando buracos na solda.
- Material de enchimento caro em relação ao MIG / MAG
- Menos adequado para aplicações que requerem pintura, como por exemplo, chassis de automóvel.
- Equipamento relativamente caro
- Pode gerar elevada quantidade de fumos
- Necessita limpeza após soldagem

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista a otimização do projeto, melhor desempenho e garantir a segurança dos usuários, qualquer procedimento de soldagem deve passar por alguns testes e análises cujos parâmetros são determinados pela empresa Arcelor Mittal Tubarão. A seguir serão descritos os procedimentos que deverão ser adotados para realização da soldagem, englobando desde a justificativa na escolha de quais processos de soldagem serão utilizados, até procedimentos básicos para garantir os requisitos do projeto das juntas soldadas.

3.1 ESCOLHA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

Atualmente existem mais de 50 processos diferentes de soldagem nos mais diversos tipos de indústria, desde a microeletrônica e ourivesaria até a construção de navios e grandes estruturas, passando pela fabricação de máquinas e equipamentos, veículos e aviões e muitas outras. Devido à amplitude de suas aplicações a escolha correta do processo de soldagem a ser aplicado é de extrema importância, visto que ele terá consequências na qualidade, produtividade e nos custos nos equipamentos a eles submetidos [7].

Os processos de soldagem podem ser classificados de acordo com o tipo de fonte de energia ou de acordo com a natureza da união. Industrialmente, os processos de soldagem mais empregados são os que utilizam a eletricidade como geração de energia para realizar a união. A soldagem por resistência envolve as seguintes variantes de processo: soldagem a ponto, soldagem com costura, soldagem topo-a-topo e soldagem com ressalto. Já a soldagem com arco elétrico pode ser subdividida entre soldagem com eletrodo consumível e soldagem com eletrodo não consumível [7].

No primeiro caso estão englobados os processos de soldagem com eletrodo revestido, processo de soldagem MIG/MAG, processo de soldagem com arame tubular e processo de soldagem com arco submerso. Os processos que utilizam eletrodo não consumível são soldagem TIG e soldagem com plasma [7].

A escolha do processo de soldagem envolve basicamente quatro fatores [7]:

- O projeto da junta (tipo, posição)
- Espessura do material
- A natureza do material a ser soldado
- Custo de fabricação (produtividade, qualidade da junta, durabilidade)

Um aspecto fundamental na escolha dos processos é a soldabilidade dos materiais envolvidos.

A American Welding Society (AWS) define soldabilidade como “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço”. Esta definição coloca pontos importantes como: “o projeto é adequado?”, “e as condições e o procedimento de soldagem?” Uma definição alternativa, mais prática, seria: “a facilidade relativa com que uma solda satisfatória, que resulte em uma junta similar ao metal sendo soldado, pode ser produzida” [8].

A maioria das ligas metálicas são soldáveis, mas, certamente, algumas são muito mais difíceis de serem soldadas por um dado processo que outras. Por outro lado, o desempenho esperado para uma junta soldada depende fundamentalmente da aplicação a que esta se destina. Também, para determinar a soldabilidade de um material, é fundamental considerar o processo e procedimento de soldagem e a sua aplicação. Assim, é importante conhecer bem o material sendo soldado, o projeto da solda e da estrutura e os requerimentos de serviço (cargas, ambiente, etc). Com base nessas definições, para melhor determinar a soldabilidade, é interessante fazer algumas suposições [8]:

1. Se o metal base é adequado para a aplicação desejada, isto é, se ele possui as propriedades adequadas e necessárias para resistir aos requerimentos da aplicação [8].
2. Se o projeto da estrutura e de suas soldas é adequado para o uso pretendido [8].

Superada esta etapa, é então necessário avaliar a própria junta soldada. Idealmente, uma junta soldada deveria apresentar resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistências à fadiga e à corrosão uniforme ao longo da solda e pelo menos igual às propriedades do material base.

Na maioria dos casos, a produção de uma solda envolve o uso de calor e/ou deformação plástica, resultando em uma estrutura metalúrgica diferente da do metal base. Além disso, também, podem apresentar descontinuidades como, vazios, trincas, material incluso, etc. Para efeito e avaliação de qualidade, podemos dividir os problemas de uma solda em [8]:

1. Problemas na zona fundida ou na zona termicamente afetada que ocorrem durante ou imediatamente após a operação de soldagem, como poros, trincas de solidificação, trincas induzidas pelo hidrogênio, perda de resistência mecânica, etc [8].
2. Problemas na solda ou no material adjacente que ocorrem nas etapas de um processo de fabricação posteriores à soldagem. Incluem, por exemplo, a quebra de componentes na região da solda durante processos de conformação mecânica [8].
3. Problemas na solda ou no material adjacente que ocorrem em um certo momento durante o serviço da estrutura soldada. Estes podem reduzir a eficiência da junta nas condições de serviço e incluem, por exemplo, o aparecimento e a propagação de trincas por diversos fatores, problemas de corrosão, fluência, etc [8].

Para se evitar estes problemas, é importante conhecer as possíveis complicações que os materiais podem apresentar ao serem soldados, os fatores do material, do projeto e do procedimento de soldagem que as afetam e a sua influência no comportamento em serviço da estrutura soldada.

Tendo em vista as especificações e requerimentos da Arcelor Mittal Tubarão, os processos viáveis e de melhor aproveitamento para a reforma do alto forno I foram

limitados aos de soldagem com arco elétrico de eletrodo consumível, como, eletrodo revestido, MIG/MAG, arame tubular e arco submerso.

Entre esses o arame tubular OK Tubrod 81 A1 foi o escolhido para a reforma geral e o eletrodo revestido OK 74.55 para possíveis reparos.

A não utilização do arco submerso se deu pelo projeto da junta, no qual as posições de soldagem não são compatíveis com o processo. E o arame tubular teve a preferência em relação ao MIG/MAG, pela sua maior taxa de deposição, produtividade, outros pontos favoráveis ao uso de arame tubular OK sobre o arame sólido, são o risco reduzido de defeitos de falta de fusão lateral, maior penetração, menos respingos e uma menor probabilidade de ocorrência de porosidade.

A escolha do eletrodo nos reparos ocorreu pela sua versatilidade e fácil utilização em locais de difíceis acessos.

Os parâmetros, corrente e tensão para a soldagem selecionados estão expostos na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros elétricos do processo

Consumível	Corrente (A)	Tensão(V)
OK 74.55	105 A	25 V
OK TUBROD 81 A1	180 A	25 V

3.2 ESCOPO DOS SERVIÇOS DE SOLDAGEM

A nova carcaça foi fornecida em segmentos, alguns dos quais foram soldados durante a fabricação. As chapas de aço DIN 17155 Mo3 serão soldadas entre si, formando a nova carcaça, e esta será soldada a varelas de aço estrutural ASTM

A36. Para a preparação e balanço de peso, três subconjuntos de anéis serão montados e os trabalhos consistem de:

1-Corte da solda circunferencial de um subconjunto existente, cujo anel será agregado a um novo subconjunto. Preparar o chanfro, montar, travar e soldar;

2-Montar, travar e soldar os outros segmentos.

Desta forma, a montagem durante a parada do alto-forno I consistirá de três subconjuntos de anéis e a realização de três soldas circunferenciais na posição horizontal.

3.3 QUALIFICAÇÕES REQUERIDAS

De acordo com os padrões de qualidade adotados pela empresa, os procedimentos deverão seguir normas técnicas ASME IX para garantia de excelência nos serviços executados.

Para a qualificação dos processos de soldagem deverá ser preparada uma EPS (especificação dos procedimentos de soldagem) considerando teste de impacto (Charpy V) ≥ 80 J a 20 ° C, e testes adicionais de dureza, além de ensaios de tração e dobramento de acordo com o código ASME IX e normas ASTM para qualificação de soldagem. Os valores inferiores aos especificados pela norma devem ser discutidos com especialistas da área, de forma ajustar os parâmetros dos processos de soldagem para atender as especificações de tenacidade, dureza, ductilidade das juntas soldadas.

Outros documentos técnicos como relatórios de inspeções de ensaios não destrutivos e de inspeção dimensional, plano de inspeção e soldagem e instrução para execução de inspeção e soldagem (IEIS), compreendendo a sequência de soldagem, travamentos requeridos, previsão para fabricação e soldagem de olhais e outros dispositivos de elevação deverão ser gerados e aprovados pela contratante.

As soldas devem ser executadas nas posições horizontal (circunferencial) e vertical ascendente.

3.4 PRODEDIMENTOS PRÉ - SOLDAGEM

3.4.1 Limpeza

O objetivo da limpeza é evitar que impurezas estejam presentes e possam interferir de forma negativa no processo de soldagem. Ela deverá ser feita nas faces e laterais dos chanfros, as superfícies deverão ser esmerilhadas ao metal brilhante, removendo toda a oxidação nas faces e em até 100 mm de cada lado do bisel. Em seguida devem ser protegidas por esmalte apropriado.

3.4.2 Amanteigamento

O amanteigamento (deposição de uma camada de solda na região de alto risco com um material de alta ductilidade antes da soldagem propriamente dita) das faces dos chanfros das juntas verticais deve ser feito na posição plana de soldagem.

3.4.3 Ponteamento

A finalidade do ponteamento é permitir uma fácil, correta e econômica fixação das peças a soldar. Ele consiste em executar cordões curtos e distribuídos ao longo da junta, sendo sua função básica manter a posição relativa entre as peças, garantindo a manutenção de uma folga adequada. O ponteamento pode ser aplicado diretamente na junta, nos casos em que é prevista a remoção da raiz. Para sua realização algumas recomendações deverão ser seguidas:

- Pré-aquecer a pelo menos 10 mm de cada lado da região do ponto.
- Usar os mesmos consumíveis e parâmetros qualificados para o passe de raiz.
- Executar do lado oposto ao que a solda deverá se iniciar.
- Os ponteamentos não deverão ser incorporados á solda. Serão removidos na preparação da raiz.

Em juntas rígidas o ponteamto deverá ser com o passe mais cheio e reforçado (comprimento de 100-150 mm).

3.5 PROCEDIMENTOS DURANTE E PÓS - SOLDAGEM

Alguns passos deverão ser tomados durante e após a execução da soldagem aproveitando-se a vantagem do longo tempo de pré-aquecimento, da soldagem multipasses em seu longo tempo de ciclo e a fim de promover melhor distribuição e alívio das tensões e evitar trincas a frio (fragilização por hidrogênio). Especial atenção deve ser dada ao controle de estocagem dos consumíveis, a fim de se minimizar os riscos de absorção de umidade (causadora de trincas por hidrogênio).

Deverá se manter a junta aquecida e protegida durante toda a soldagem. A temperatura deverá ser medida a pelo menos 100 mm do eixo da solda (do centro da junta). A temperatura de interpasses deve ser mantida abaixo de 300 °C.

Deverá se executar a soldagem em multipasses (efeito do passe de revenimento) com oscilação lateral máxima de 20 mm. Dirigir o arco da soldagem primeiramente em cada lado do chanfro, amanteigando-o e mantendo boa molhabilidade (boa fusão entre metal de solda fundida e metal de base) e fusão em cada lado da junta. Somente após amanteigar ambos os lados do chanfro é que a camada deverá ser concluída.

As tensões de contração do cordão de solda deverão ser aliviadas através de martelamento, exceto nos passes de raiz e na camada de acabamento. Isto pode ser feito com ferramenta manual, elétrica ou pneumática e simultaneamente com a remoção de escória e limpeza antes do próximo passe de solda.

Na limpeza da raiz de solda deverá se remover os defeitos do seu lado oposto por meio de goivagem e esmerilhamento. A limpeza entre os passes deverá ser feita com picadeira e escova de aço. Todos os esforços deverão ser feitos para assegurar boa qualidade das soldas e evitar retrabalhos.

4 COMPARATIVO ECONÔMICO

Nos dias atuais procura-se intensamente a diminuição de custos nas atividades industriais para que o produto final que será comercializado tenha um valor competitivo no mercado. Cada vez mais as empresas buscam aperfeiçoar seus processos para atingir tal objetivo e a otimização deve englobar todos os setores da empresa.

No contexto do presente trabalho, no qual estamos tratando de uns dos principais equipamentos do processo siderúrgico, o alto forno, todos os custos envolvidos na sua operação/manutenção são de grande relevância, porém a prioridade está na qualidade dos processos envolvidos em seu reparo. Mesmo assim é importante avaliar os custos, embora eles estejam em segundo plano em relação à qualidade.

A seguir será apresentada uma maneira de se estimar custos de soldagem com os processos de soldagem escolhidos que serão utilizados na reforma do alto forno I da Arcelor Mittal Tubarão. Esta estimativa tem por objetivo comparar os custos dos diferentes processos utilizados (eletrodo revestido e arame tubular), para determinar qual a melhor relação custo benefício.

4.1 ESTIMATIVA E COMPARAÇÃO DE CUSTOS

A soldagem é, em geral, usada como parte de um processo de fabricação que também utiliza outros processos como corte usinagem, conformação mecânica, montagem e tratamentos térmicos e superficiais. Além disso, a operação de soldagem pode englobar etapas adicionais de pré-aquecimento, de remoção da raiz da solda, reparo e outras. No presente estudo estas etapas e os outros processos não serão considerados.

Para efeito deste estudo, será adotado como modelo de apropriação de custo, o trabalho desenvolvido por [1], considerado simplificado, porém adequado ao propósito de comparação econômica dos processos indicados.

A operação de soldagem envolve um grande número de aspectos que podem ter algum impacto em seu custo final, como por exemplo: o uso de consumíveis (metal de adição, gás, fluxo e outros), o custo de pessoal e outros custos fixos, o gasto de energia elétrica, os custos de manutenção, a depreciação e o custo dos equipamentos e materiais de proteção. No modelo adotado serão considerados: os custos dos consumíveis, custos de pessoal e custos fixos bem como os custos de energia elétrica [1].

4.2 METODOLOGIA

O modelo propõe a determinação dos custos associados com os consumíveis de soldagem e a mão de obra baseado no cálculo da massa de metal depositado (Figura 4) em um cordão de solda e no tempo de soldagem.

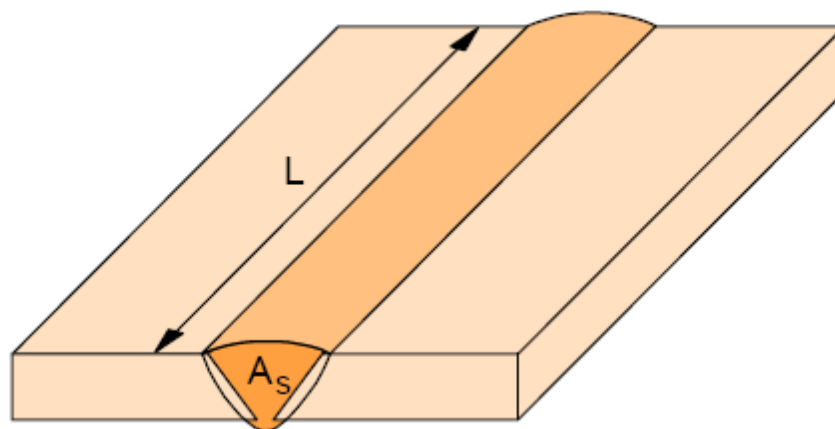


Figura 4 - Volume do cordão de solda (fonte: [1])

- Massa de material depositado (m_s)

A massa de metal depositado pode ser obtida através do produto do volume pela densidade do metal de adição, ou seja, é função da geometria da junta, comprimento do cordão e densidade do material depositado, que no caso de aço, equivale a 7,85 g/cm³.

$$m_s = A_s \times L \times r$$

Onde:

A_s = área transversal do cordão associada com o metal depositado.

L = comprimento do cordão

r = densidade da solda, para aço carbono = 7,85 g/cm³

- Tempo de soldagem

a) Tempo de Arco Aberto (t_{arc}):

$$t_{arc} = \frac{ms}{zm}$$

O tempo de arco aberto é a razão entre a massa de metal depositado e a taxa de deposição. A taxa de deposição do processo (zm) é a razão entre a quantidade de material depositado pela unidade de tempo e depende de vários fatores, incluindo o processo de soldagem, o tipo, diâmetro e comprimento do eletrodo e o tipo, a polaridade e o nível de corrente.

b) Tempo Total (t_T):

$$t_T = \frac{t_{arc}}{\phi}$$

O tempo total da operação de soldagem (t_T) é a soma do tempo de arco aberto (t_{arc}) e o tempo necessário para outras operações (remoção de escória e respingos, troca de eletrodos, posicionamento de cabeçote, etc.). O tempo total pode ser calculado através da razão entre o tempo de arco aberto e um fator percentual que é função dos diferentes modos possíveis de operação (Manual, Semi-Automático, etc.), denominado fator de ocupação (ϕ). Em termos práticos este fator representa o acréscimo percentual no tempo de arco aberto (t_{arc}) e que deve ser considerado em função do processo de soldagem adotado para efeito de cálculos de custo. Os valores de referência do fator de ocupação (ϕ) podem ser obtidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Faixa de valores do fator de ocupação segundo modo de operação

Modo de Operação	Fator de ocupação φ (%)
Manual	05 – 30
Semi - automático	30 – 60

- Parâmetros de custos de soldagem

a) Custo de Eletrodos ou Arame (Ce) :

É o custo com o consumível, eletrodo ou arame, onde φ é a eficiência prática de deposição do processo (tabela 6) e CeU é o preço por peso unitário do eletrodo (exemplo , R\$ / kg) e CaTU do arame tubular, ou seja:

$$Ce = \left(\frac{ms}{\varphi} \right) \times CeU \text{ (ou } CaTU)$$

Tabela 6 - Faixa de valores de eficiência prática segundo processo de soldagem

Processo	Eficiência Prática φ (%)
Eletrodo Revestido Comprimento : 350 mm 450 mm	55 - 65 60 - 70
Arame Tubular: FCAW	80 - 85

b) Gás de proteção (C_g):

É o custo com o consumível gás, onde VG é a vazão de gás usada e CGU é o preço por volume de gás (por exemplo, em R\$ / m³), ou seja:

$$C_g = VG \times tarc \times CGU$$

c) Mão de obra e custos fixos (CL):

É o custo total previsto com mão de obra e gastos fixos, onde L e O são respectivamente, os custos por unidade de tempo com mão de obra e gastos fixos.

$$CL = \left(\frac{tarc}{\phi} \right) \times (L + O)$$

d) Energia Elétrica (CEL):

É o custo total previsto com energia elétrica, onde $CELU$ (R\$ / kWh) é o preço da energia elétrica, P (kW) é a potência média desprendida durante a soldagem e ϕ_{el} é a eficiência elétrica do equipamento de soldagem. Por exemplo, a eficiência de um transformador gira em torno de 80%.

$$CEL = \left(\frac{P \times tarc}{\phi_{el}} \right) \times x \times CELU$$

4.3 RESULTADOS

- Massa do material depositado (m_s)

Da qualificação de procedimentos de soldagem obtém-se o croqui indicação de como deve ser a junta soldada, que permite o cálculo de A_s (área da seção transversal da junta soldada). A representação do croqui da junta está na figura 5.

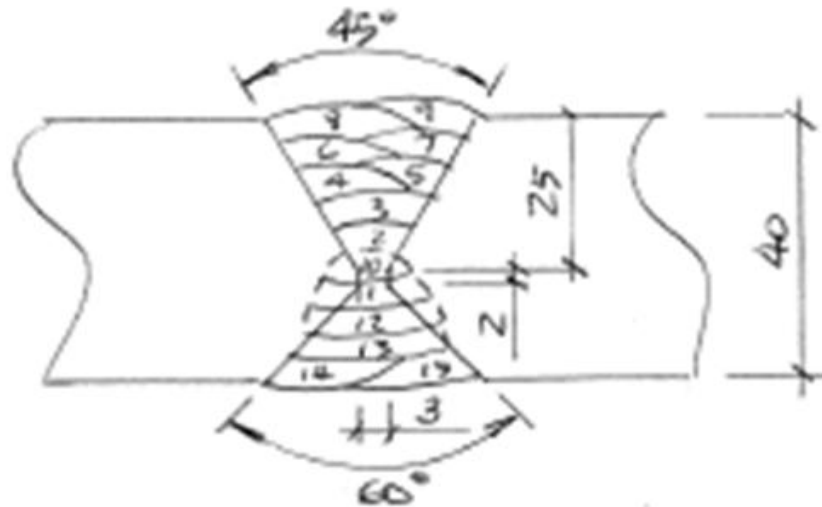


Figura 5 - Croqui da junta soldada (fonte: EPS ESAB)

Para efeito de cálculo, o croqui da junta foi aproximado as figuras geométricas como representado na figura 6, sendo a área total igual a $A_t = A_1 + A_2$.

*Desenhos fora de escala

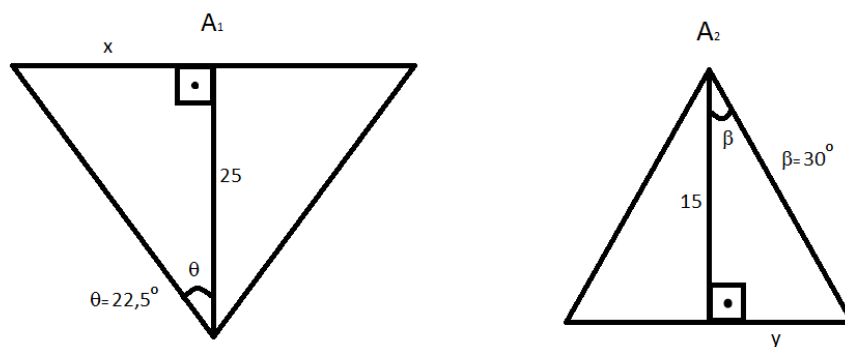


Figura 6 - Área transversal aproximada da junta soldada

Devido pequenas diferenças entre a geometria real da junta e a adotada como na mostrado na figura 6, será adicionado um acréscimo de 3 % na área total para equalizar as áreas.

- Cálculo de A1

$$X = 25 \times \tan 22,5^\circ = 10,35 \text{ mm}$$

$$A1 = 2 \left(\frac{X \times h}{2} \right) = 2 \left(\frac{10,35 \times 25}{2} \right)$$

$$A1 = 258,75 \text{ mm}^2$$

- Calculo de A2

$$Y = 15 \times \tan 30^\circ = 8,66 \text{ mm}$$

$$A2 = 2 \left(\frac{Y \times h}{2} \right) = 2 \left(\frac{8,65 \times 15}{2} \right)$$

$$A2 = 129,75 \text{ mm}^2$$

Assim,

$$At = A1 + A2 = 258,75 + 129,75 = 388,57 \text{ mm}^2$$

- Aplicando a correção:

$$At = 388,57 \times 1,03 = 400,22 \text{ mm}^2$$

Aplicando $As = 400,22 \text{ mm}^2$, $L = 800 \text{ mm}$ e $r = 7,85 \text{ g/cm}^3$:

$$ms = As \times L \times r$$

$$ms = 400,22 \times 800 \times 7,85$$

$$ms = 2513,38 \text{ g}$$

- Tempo de Arco Aberto (t_{arc}):

$$t_{arc} = \frac{ms}{zm}$$

Para arame tubular $zm = 2,85 \text{ kg/h}$ (anexo C)

$$t_{arc} = \frac{2,513}{2,85} = 52,9 \text{ min}$$

Para eletrodo revestido $zm = 1,2 \text{ kg / h}$ (anexo C)

$$t_{arc} = \frac{2,513}{1,2} = 125,65 \text{ min}$$

- Tempo total

$$tT = \frac{tarc}{\phi}$$

Sendo considerados os valores máximos de ϕ em ambos os casos.

Para arame tubular, com processo semi – automatizado, $\phi = 0,6$ (tabela 5)

$$tT = \frac{52,9}{0,6} = 88,16 \text{ min.}$$

Para eletrodo revestido, com processo manual, $\phi = 0,3$ (tabela 5)

$$tT = \frac{125,65}{0,3} = 418,83 \text{ min.}$$

- Custo de Eletrodos ou Arame (Ce) :

$$Ce = \left(\frac{ms}{\phi} \right) \times CeU \text{ (ou } CaTU \text{)}$$

Para arame tubular com $\phi = 0,85$ (tabela 6) e $CatU = R\$ 14,80 / \text{kg}$

$$Ce = \left(\frac{2,513}{0,85} \right) \times 14,80 = R\$ 43,75$$

Para eletrodo revestido com $\phi = 0,70$ (tabela 6) e $CeU = R\$ 12,30 / \text{kg}$

$$Ce = \left(\frac{2,513}{0,70} \right) \times 12,30 = R\$ 44,16$$

- Gás de proteção (Cg)

$$Cg = VG \times tar_c \times CGU$$

Somente para arame tubular, com VG = 19 l/min CO₂; Taxa de Deposição Arame Tubular (anexo) = 2,85 kg/h; CGU = R\$ 384,00 / 45 kg → R\$ 8,53 / kg, densidade = 1,833 kg/m³, CGU = R\$ 15,64 /m³

$$Cg = 0,019 \times 88,16 \times 15,64 = R\$ 26,20$$

- Mão de obra e custos fixos (CL):

$$CL = \left(\frac{tar_c}{\phi} \right) \times (L + O)$$

Para arame tubular com $\phi = 0,6$; (tabela 5) e L + O = R\$ 32,00/h,:

$$CL = \left(\frac{52,9}{0,6} \right) \times \left(\frac{32,00}{60} \right) = R\$ 47,02$$

Para eletrodo revestido com $\phi = 0,3$; (tabela 5) e L + O = R\$ 15,50/h:

$$CL = \left(\frac{125,65}{0,3} \right) \times \left(\frac{15,00}{60} \right) = R\$ 104,17$$

- Energia Elétrica (CEL)

$$CEL = \left(\frac{P \times tar_c}{\phi_{el}} \right) \times CELU$$

$$P (\text{aramé}) = 25 \text{ V} \times 180 \text{ A} = 4500 \text{ W} = 4,500 \text{ kW}$$

$$P (\text{eletrodo}) = 25 \text{ V} \times 105 \text{ A} = 2625 \text{ W} = 2,625 \text{ kW}$$

CEL (arame) = $(4,500 \text{ kW} \times 0,88 \text{ h} / 0,80) \times \text{R\$ } 0,39276 / \text{kWh} = \text{R\$ } 1,94$

CEL (eletrodo) = $(2,625 \text{ kW} \times 2,09 \text{ h} / 0,80) \times \text{R\$ } 0,39276 / \text{kWh} = \text{R\$ } 2,69$

A tabela 7 traz o resumo dos gastos de cada processo.

Tabela 7 - Custo teórico dos processos de soldagem em R\$/kg

PROCESSO	ESTIMATIVA TÉORICA DE CUSTOS						
	Eletrodo Arame	CO ₂	Mão de Obra	Energia Elétrica	Total	Massa (g)	Custo R\$/Kg
Eletrodo Revestido	R\$ 44,16	-	R\$ 104,17	R\$ 2,69	R\$ 151,02	2513	60,09
Arame Tubular	R\$ 43,75	R\$ 26,20	R\$ 47,02	R\$ 1,94	R\$ 118,91	2513	47,31

5 ENSAIOS DESTRUTIVOS

Os ensaios destrutivos provocam a ruptura ou a inutilização da peça ensaiada e avaliam as propriedades mecânicas dos metais.

As propriedades mecânicas avaliam o comportamento de um material quando sujeito a esforços de natureza mecânica e correspondem às propriedades que, num determinado material, determinam a sua capacidade de transmitir e resistir aos esforços que lhe são aplicados, sem romper ou sem que produzam deformações instáveis [9].

As propriedades da solda devem ser compatíveis com as propriedades mecânicas do metal de base.

Uma vez aprovados, os ensaios mecânicos, asseguram a qualidade mínima da solda em termos de propriedades mecânicas, bem como servem de base para qualificações do metal de adição, do procedimento de soldagem, de soldadores e para verificar os testes de produção [9].

As propriedades mecânicas de um material deformado termomecanicamente podem variar conforme a direção de onde foram extraídos os corpos de prova para o ensaio. Este fenômeno é denominado de anisotropia. Então, deve-se verificar através das especificações do material qual a direção exata para se retirar o corpo de prova [9].

Normalmente são utilizados os termos “ensaio longitudinal” (quando o eixo longitudinal do corpo de prova é paralelo à direção de laminação da amostra do material a ser ensaiado) e “ensaio transversal” (quando o eixo longitudinal do corpo de prova é ortogonal à direção de laminação da amostra do material a ser ensaiado). A Figura 7 mostra a chapa soldada em que foram retirados os corpos de prova, em sentido transversal, para ensaios mecânicos.



Figura 7 - Chapa soldada para extração de corpo de prova transversal

5.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é realizado conforme está mostrado na figura 8. O corpo de prova é usinado conforme as dimensões estabelecidas por norma e tracionado até a ruptura. O teste de tração fornece quatro informações básicas:

- Limite de escoamento;
- Limite de resistência;
- Alongamento;
- Redução de área.

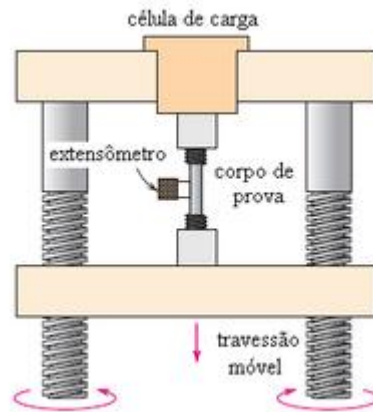


Figura 8 - Equipamentos para realização de ensaio de tração
(fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Ensaio_de_tração)

5.2 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

O ensaio de impacto Charpy tem objetivo principal de medir a quantidade de energia absorvida pelo material durante a fratura, numa dada temperatura.

As características essenciais para um ensaio de impacto são: um corpo de prova adequado, um suporte no qual o corpo de prova é colocado, um martelo com energia cinética conhecida e um dispositivo de medição da energia absorvida na quebra do corpo de prova.

O dispositivo de ensaio, bem como o suporte para colocação do corpo de prova, é mostrado na Figura 9

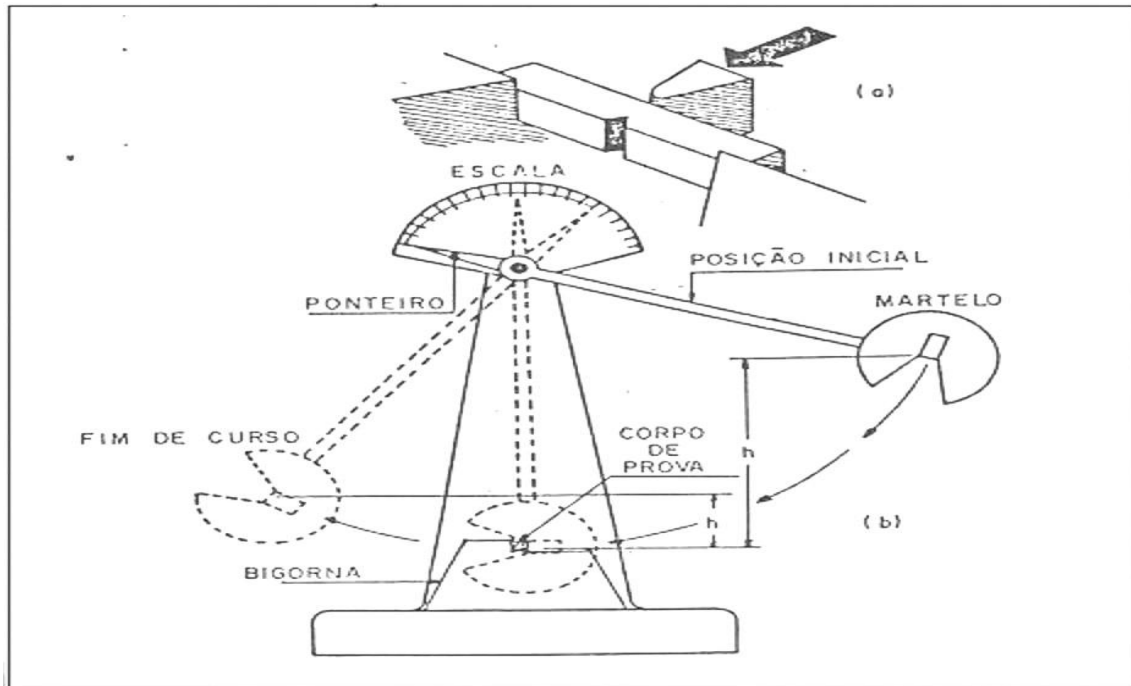


Figura 9 - Equipamento para realização de ensaio de impacto
(fonte: <http://www.mspc.eng.br/ciemat/ensaio130.pdf>)

O corpo de prova é colocado no suporte e o martelo é liberado, rompendo o corpo de prova na região do entalhe e continuando sua trajetória até certa altura. A medição da energia absorvida no impacto é feita por meio de um cursor que acompanha o martelo em todo o seu curso até seu retorno, indicando a diferença entre a energia inicial e a energia final do martelo..

Uma característica dos ensaios de impacto Charpy é a dispersão de resultados. Por isso, um resultado de ensaio é considerado normalmente como a média dos resultados de três ensaios executados a uma mesma temperatura.

5.3 ENSAIO DE DOBRAMENTO

O ensaio de dobramento fornece uma indicação qualitativa da ductilidade do material. É um ensaio de realização muito simples. Existem variações do ensaio que permitem avaliar certas propriedades mecânicas do material.

Quanto menor é o diâmetro do cutelo, mais severo é o ensaio e o dobramento sem o cutelo é conhecido como dobramento sobre si mesmo. O ângulo também determina a severidade de ensaio e é geralmente de 90°, 120° ou 180°. A velocidade do ensaio não é um fator importante no dobramento, desde que o ensaio não seja realizado com uma velocidade extremamente alta.

Depois de efetuada a aplicação de carga e o dobramento do corpo de prova, observa-se a olho nu a região tracionada. Esta região não deve apresentar trincas ou fissuras para a aprovação do material. Caso contrário, o material não passou no teste. A maioria das especificações considera que um defeito de comprimento maior do que 3 mm é causa para rejeição.

Se o corpo de prova rompe durante o teste - antes de atingir o ângulo de dobramento especificado - também fica caracterizada a não aprovação do material. Tal condição é denominada ruptura prematura, que pode ser causada por defeitos ou fragilização do material na região de tração.

No caso de corpos de prova soldados é usual determinar o alongamento percentual da região soldada.

5.4 ENSAIO DE DUREZA

Dureza é uma propriedade mecânica bastante utilizada na especificação de materiais, em pesquisas metalúrgicas e mecânicas e na comparação de diversos materiais. Ela pode ser definida como a resistência à penetração de um corpo duro e a resistência a deformação permanente na superfície.

Na soldagem, a dureza é influenciada pelas fases presentes na junta, que, por sua vez é resultado da composição química e do histórico térmico. do processo de soldagem além do grau de encruamento do metal de base.

Por ser um ensaio mecânico, o ensaio de dureza acha-se incluído entre os ensaios destrutivos, porém em vários casos não é um ensaio destrutivo, pois depende do método aplicado e da utilização posterior da peça ou equipamento.

5.4.1 Ensaio de dureza Vickers

O teste de dureza Vickers consiste em submeter o material a um penetrador de diamante, na forma de uma pirâmide reta de base quadrada e um ângulo de 136° entre as faces opostas, utilizando uma carga de 1 a 100 kgf.

A dureza Vickers é o quociente obtido dividindo a carga (em kgf) pela área da produzida.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através dos resultados foi possível ser avaliar algumas propriedades da junta soldada e qualificar os processos e consumíveis de acordo com as exigências do projeto.

Como esperado, a maioria dos resultados foram semelhantes aos de literatura. Porém devido a algumas características dos processos e materiais, alguns resultados tiveram resultado fora do padrão esperado, mostrando que, na prática, diferentes processos têm diferentes peculiaridades que influenciam no resultado. Assim, a análise teve de ser mais aprofundada para se explicar os resultados obtidos.

6.1 TESTE DE TRAÇÃO

Foi realizado o teste de tração em dois corpos de prova com especificações segundo norma ASME seção IX. O metal base foi o aço DIN 171655 Mo3 com composição química e propriedades mecânicas segundo tabela 8. O processo de soldagem utilizado foi Arame Tubular com arame da fabricante ESAB tipo OK 81-T1-A1 1,2 mm (tabela 9). Gás de proteção foi o CO₂. Os resultados são mostrados na tabela 10.

Tabela 8 - Composição química (%) e propriedades mecânicas do aço

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N	L.E (Mpa)	L.R (Mpa)
DIN 17155 Mo3	0,17	0,5	0,35	0,025	0,01	0,3	0,3	0,3	0,3	0,012	270	430 - 520

Tabela 9 - Composição química (%) e propriedades mecânicas do arame tubular

	C	Si	Mn	Mo	Ni	L.E (Mpa)	L.R (Mpa)
Arame tubular 81-T1-A1C	0,04	0,4	0,8	0,5	0,12	560	640

Tabela 10 - Resultados de ensaios de tração(MPa)

Corpo de Prova	Tensão Max (Mpa)	Tipo/Local Falha
1	454,12	Ductil / Metal Base
2	461,89	Ductil / Metal Base

O requisito para aprovação da junta soldada é que o limite de resistência da zona de fusão seja igual ou superior ao mínimo comportado pelo metal base. Conforme mostra a tabela 10, em ambos os corpos de prova pode ser visto que a ruptura ocorreu no metal base, com valor um pouco acima de seu limite mínimo de resistência esperado. Logo se comprova que o metal de adição tem resistência superior a este valor, atendendo assim os requisitos de aprovação.



Figura 10 - Corpo de prova após ensaio de tração

6.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Foi realizado ensaio de dobramento conforme especificações ASME seção IX, com ângulo de dobramento de 180 ° distancia entre roletes 60 mm. O metal base foi o aço DIN 171655 com especificações conforme mostrado anteriormente. O processo de soldagem utilizado foi Arame Tubular com arame da fabricante ESAB tipo OK 81-T1-A1 1,2mm. Como não houve aparecimento de imperfeições ou trincas maiores de

3 mm em todos corpos de provas, todos foram aprovados. Resultados estão expostos na tabela 11.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de dobramento

Corpos de prova	Distância entre roletes (mm)	Ângulo (°)	Resultados obtidos
1	60,4	180	Descontinuidade menor que 3 mm
2	60,4	180	Descontinuidade menor que 3 mm
3	60,4	180	Descontinuidade menor que 3 mm
4	60,4	180	Descontinuidade menor que 3 mm

A figura 11 mostra o corpo de prova após o ensaio realizado.



Figura 11 - Corpo de prova após ensaio de dobramento, evidenciando a inexistência de trincas

6.3 ENSAIO DE IMPACTO

O ensaio de impacto foi realizado na junta soldada entre o aço estrutural ASTM – A36 (que dá suporte a carcaça do forno) e o equivalente ao aço das chapas DIN 17155 Mo3 , na norma ASTM, o aço A516 GR 70. A região desta junta é uma região crítica em relação à tenacidade, visto que ela deve suportar esforços e não correr o risco de falha por fragilidade. A tabela 12 mostra a composição química dos aços.

Tabela 12 - Composição química (%) Aços ASTM A36 e ASTM A516 70

Composição química dos aços					
Material	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)
A36	0,25	0,40	-	0,04	0,05
A516-70	0,30	0,18	1	0,035	0,035

Foi realizado ensaio Charpy a temperatura de 20 ° C, conforme especificações da norma ASTM A370/10. O processo de soldagem foi feito com características iguais a dos testes anteriores. O requisito para aprovação era a energia absorvida ser igual ou superior a 80 J a 20 °C. Os resultados seguem na tabela 13.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de impacto Charpy

Localização	Dimensões (mm)	Temperatura do Ensaio	Resultado Obtido (J)		Média (J)
Solda	10x10x55	20°C	C.P 01	126	124
			C.P 02	122	
			C.P 03	125	
ZTA ASTM A 36	10x10x55	20°C	C.P 01	89	86
			C.P 02	80	
			C.P 03	88	
ZTA ASTM A 516	10x10x55	20°C	C.P 01	139	136
			C.P 02	139	
			C.P 03	136	

A média dos resultados nos mostra que todos os corpos de prova absorveram energia superior a requerida, que é de 80 J.

Na figura 12 podemos observar os resultados obtidos nas diferentes regiões da junta soldada.

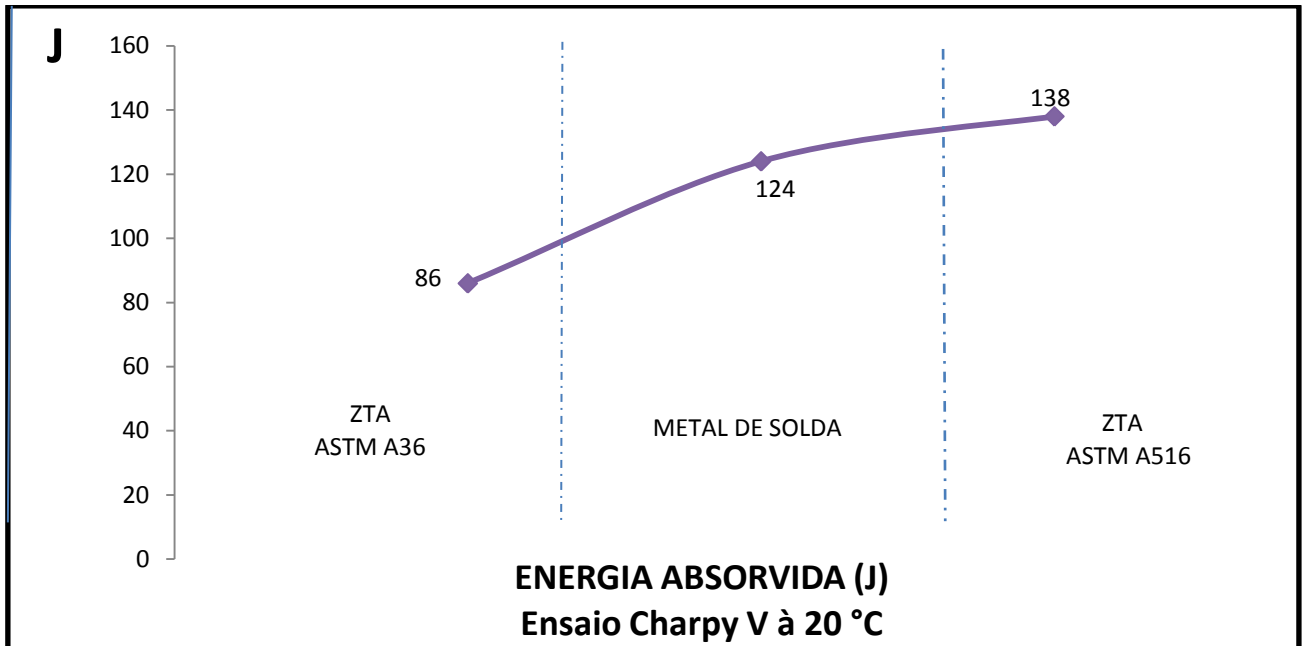


Figura 12 - Perfil de energia absorvida nas diferentes zonas da região soldada

A figura 13 traz os corpos de prova após a realização do ensaio.



Figura 13 - Corpo de prova após ensaio de impacto

6.4 ENSAIO DE DUREZA

Foi realizado ensaio de dureza Vickers em uma junta semelhante a que foi realizado ensaio de impacto, com intuito de correlacionar os resultados e avaliar se a junta atende a requisitos de resistência mecânica e tenacidade. Os parâmetros, processo e consumíveis de soldagem são os mesmos dos testes de anteriores.

A figura 14 mostra o croqui da junta e a localização onde deve ser feita as penetrações para se avaliar a dureza, seguindo norma Petrobras N-133

As medições devem ser realizadas em 2 diferentes planos, sendo o 0 – I o plano superior, e o plano 0 – II , o inferior.

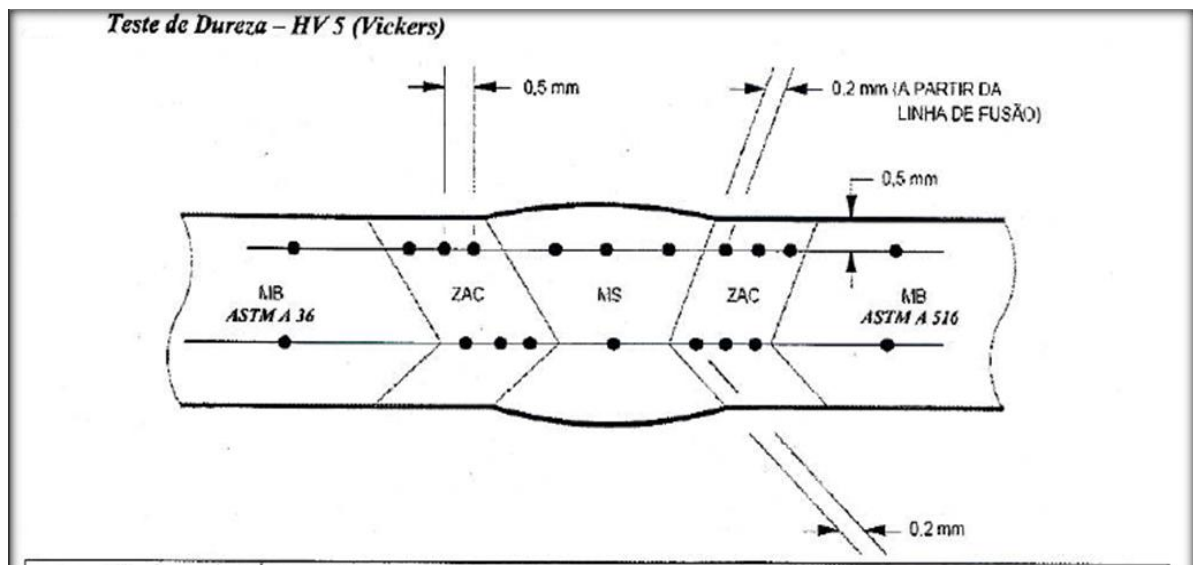


Figura 14 - Perfil de dureza segundo norma Petrobras – N133 [10]

Os resultados do teste estão expostos na tabela 14.

Tabela 14 - Resultado do ensaio de dureza Vickers

Plano de medição	Valores Encontrados				
	MB ASTM A36	ZTA 1	Metal de Solda	ZTA 2	MB ASTM A516
0 - I	169	242 - 250 - 247	210 - 176 - 215	304 - 367 - 343	174
0 - II	156	189 - 189 - 190	228	198 - 197 - 193	156

Para melhor análise e avaliação dos resultados, foram traçados perfis de dureza da junta soldada nos dois planos de medição apresentados no croqui. O perfil do plano de medição 0 –I é mostrado na figura 15.

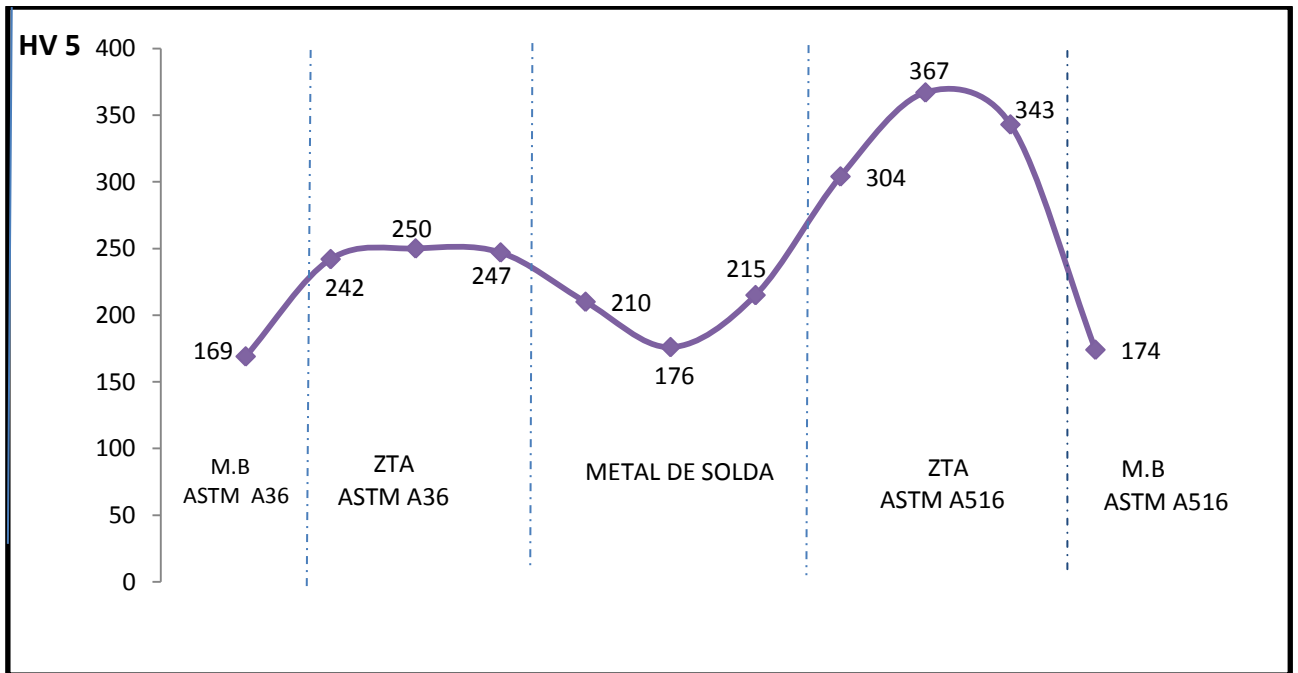


Figura 15 - Perfil de dureza Vickers no plano superior

O perfil do plano de medição 0 –II é mostrado na figura 16

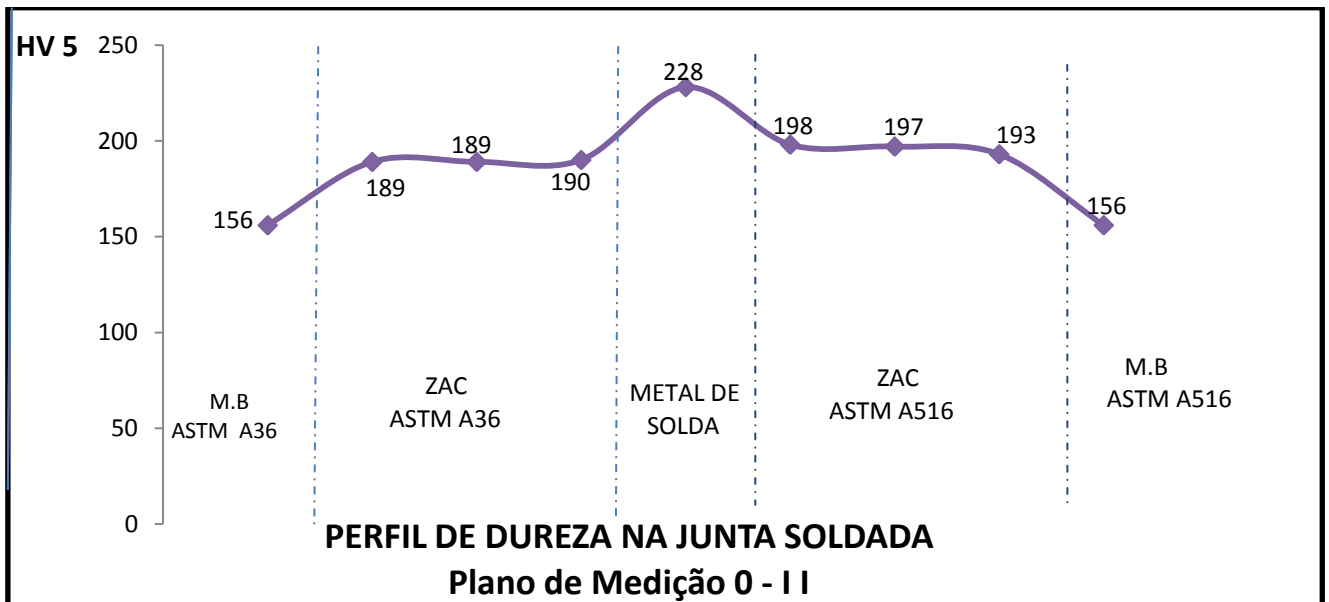


Figura 16 - Perfil de dureza Vickers no plano inferior

Conforme era esperado o aço ASTM A516 Gr 70 apresentou valores de dureza na ZTA superiores ao ASTM A36, visto que este é um aço estrutural de baixo teor de carbono, que em geral não responde a tratamento térmico de têmpera.

Um fator importante a ser considerado neste contexto é o carbono equivalente nos aços, cuja fórmula simplificada, que se tornou uma medida comumente aceita para soldabilidade dos aços, é [11]:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Conforme equação acima foi calculado o carbono equivalente para ambos os aços. Para o aço A36, CE = 0,25 % e para o A516 – 70, CE = 0,46 %

Os valores encontrados ratificam a justificativa apresentada para esta diferença de dureza.

Outra análise importante é relacionada com os valores encontrados na ZTA do aço ASTM A516. À primeira vista, os valores que geraram um pico no perfil de medição do plano 0 – I nesta ZTA, geram certa estranheza, visto que o mesmo não acontece no plano de medição 0 – II.

As hipóteses mais prováveis para explicar tal fato, estão relacionadas com a soldagem feita em vários passes, que causa o feito do revenimento, juntamente com a variação de aporte térmico nas diferentes áreas da junta que contribuem para tal efeito.

Como pode ser visto na figura 17, a região do plano de medição 0 – I está afetada pelos primeiros passes de soldagem, sendo passes mais curtos e muito próximos a superfície da chapa, logo o resfriamento nesta região provavelmente foi muito rápido, de modo que a microestrutura final se tornou dura, constituída provavelmente por grande quantidade de martensita.

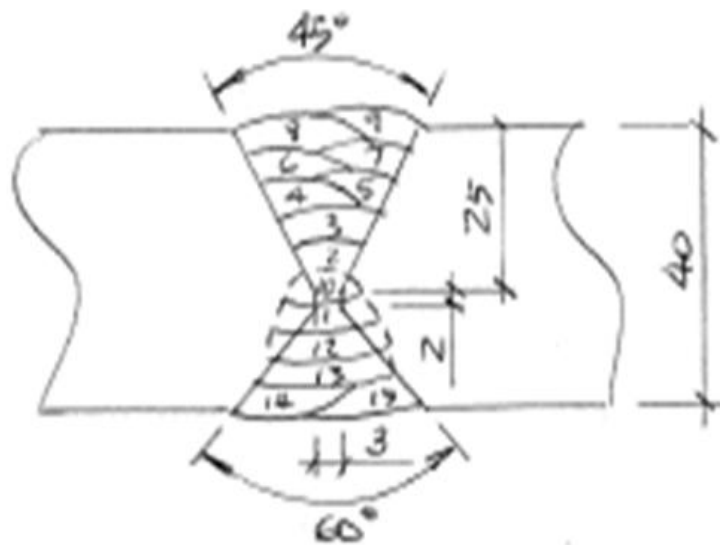


Figura 5 - Croqui da junta soldada (fonte: EPS ESAB)

Já o plano de medição 0 – II onde se apresentou valores de dureza mais baixos está influenciado por mais passes e passes maiores, o que gera um reaquecimento da região após cada passe, causando o revenimento, que é responsável por aumentar a tenacidade da região, diminuindo assim a dureza.

Também pode ser observado que a parte inferior possui ângulo do chanfro maior, logo a junta tem maior comprimento, tendo a necessidade de um maior aporte térmico, gerando uma região com mais calor, o que maximiza o efeito do revenimento citado anteriormente.

Regiões com microestrutura de elevada dureza, como a apresentada na ZTA do aço ASTM A516 -70 podem estar suscetíveis a tornar o material mais frágil, facilitando o surgimento de trincas em toda a região afetada termicamente e a possíveis quebras de juntas soldadas.

Altas taxas de resfriamento e a composição de grãos grosseiros podem promover a formação de fases frágeis e duras no metal fundido e na ZTA de aços soldados. Aliado a estes fatores, a presença de hidrogênio difundido no processo de soldagem pode levar ao trincamento a frio do conjunto soldado.

Apesar do pré aquecimento trabalhar de forma a minimizar este efeito, ele não foi suficiente para evitá-lo. Logo se torna necessário um tratamento térmico de pós aquecimento imediatamente após o término da soldagem, com o objetivo de diminuir a taxa de resfriamento, de forma a se prevenir a formação de martensita.

7 CONCLUSÕES

- Foi possível indicar o processo de soldagem com arame tubular como a melhor escolha para a reforma geral do alto forno, e o eletrodo revestido pela sua versatilidade, foi indicado para reparos.
- Após o estudo econômico entre os processos, a soldagem com arame tubular se mostrou mais vantajosa em relação ao seu custo-benefício.
- Uma análise minuciosa na composição do metal de base, observando a presença de elementos de liga e a sua porcentagem de Carbono Equivalente, é indispensável para se fazer uma avaliação dos resultados nos ensaios mecânicos.
- A temperatura de pré aquecimento utilizada nos testes, indicada na especificação do procedimento de soldagem, de no mínimo 75 °C, não foi suficiente para evitar a formação de microestruturas indesejáveis. Tornando – se necessário aumenta – lá.
- De acordo com a análise dos resultados obtidos pelos ensaios mecânicos, foi sugerida a realização de um tratamento térmico de pós-aquecimento em uma temperatura superior a temperatura final de formação da martensita por aproximadamente 4 horas, para a redução da dureza nas ZTAs dos aços.
- O Arame Tubular OK TUBROD 81 A1 1,2MM, mostrou-se ideal para o procedimento, tendo em vista que foi aprovado em todos os ensaios mecânicos, atendendo os requisitos necessários para a reforma do alto forno. Assim como o eletrodo revestido OK 74.55 foi aprovado para os reparos dos procedimentos de reforma.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Após a realização da reforma do alto forno, calcular os custos reais dos processos e compará-los ao teórico que foi estimado neste trabalho.
- Fazer estudo comparativo entre processo por Arame Tubular de modo semi-automatizado e automatizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 MODENESI, Paulo J, *Estimativa de Custos de Soldagem*, 2001, Disponível em: <http://www.demet.ufmg.br/labs/soldagem/>. Acessado em 08 de Agosto de 2011.
- 2 http://www.cst.com.br/usina/fluxo_producao/popfluxo.htm. Acessado em 15 de Agosto de 2011.
- 3 ESAB, *Apostila de metalurgia da soldagem*, 2004, Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901102rev0_ApostilaMetalurgiaSoldagem.pdf>. Acessado em 30 de Agosto de 2011.
- 4 ESAB, *Apostila de Eletrodo Revestido*, 2005, Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901097rev0_ApostilaEletrodosRevestidos.pdf> Acessado em 12 de Setembro de 2011.
- 5 <http://www.lincolnbrasil.com.br/index.php?action=openFile&path=/media/noticias/files/1092201484847f124538b9.pdf> Acessado em 22 de Setembro de 2011
- 6 ESAB, *Apostila de Arames Tubulares*, 2004, Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901098rev0_ApostilaAramesTubulares.pdf>. Acessado em 28 de Setembro de 2011.
- 7 http://www.oxigenio.com/oxi/dbc/educacional_soldagem_processos_de_soldagem.htm Acessado em 29 de Setembro de 2011.
- 8 http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/metals_soldab.pdf Acessado em 29 de Setembro de 2011.
- 9 http://www.stdengenharia.com.br/?page_id=25 Acessado em 10 de Outubro de 2011..
- 10 PETROBRAS - PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS. *N-133 Soldagem*. Rio de Janeiro, 2005.
- 11 http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0612050_08_cap_07.pdf Acessado em 20 de Outubro de 2011.

ANEXO A - Especificação do procedimento de soldagem

RELATÓRIO DE QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM Welding Procedure Qualification Record		RQPS: WPGR: DATA: 27/10/2010 Date:
PS Nº: WPS Nº:	PROCESSO(S) DE SOLDAGEM: FCAW Welding process(es):	
TIPO (MANUAL, AUTOMÁTICO, SEMI-AUTOMÁTICO): SEMI-AUTOMÁTICO Types (Manual, automatic, semi-automatic):		
JUNTAS (QW-402) Joint:	CROQUI DA JUNTA DE TESTE - Groove Design of Test Coupon	
<p>EXTRAÇÃO DE RAÍZ APÓS 6º PASSE - GOIVAGEM A ARCO E ESMERILHAMENTO</p>		
<p>PARA COMBINAÇÃO DE QUALIFICAÇÕES, AS ESPESURAS DOS METAIS DE SOLDA DEPOSITADAS DEVEM SER REGISTRADAS PARA CADA METAL DE ADIÇÃO OU PROCESSO USADO. For combinations, the deposited weld metal thickness shall be recorded for each filler metal or process used.</p>		
METAL BASE (QW-403) Base Metals		TRATAMENTO TÉRMICO PÓS SOLDAGEM (QW-407) Postweld Heat Treatment
ESPECIFICAÇÃO MATERIAL: EN 10028-2 Material Specification		TEMPERATURA: N. A. Temperature
TIPO OU GRAU: 16Mo3 MD Type or Grade		TEMPO: N. A. Time
NÚMERO P: 3 G Nº 1 P. No.	COM Nº P: 3 G Nº 1 To P. No.	OUTRO: N. A. Other
ESPESSURA DA JUNTA-TESTE: 40,0 mm Thickness of Test Coupon		GÁS (QW-408)
DIÂMETRO DA JUNTA TESTE: N. A. Diameter of Test Coupon		TIPO DO GÁS OU GASES: CO2 Type of Gas or Gases
OUTROS: N. A. Other		COMPOSIÇÃO DA MISTURA DE GASES: 100% Composition of gas Mixture
METAIS DE ADIÇÃO (QW - 404) Filler Metals		OUTROS: VAZÃO GÁS: 19 l/min Other
ANÁLISE METAL DE SOLDA Nº A: 1 Weld Metal Analysis A - No.		CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW - 409) Electrical Characteristics
DIÂMETRO DO METAL DE ADIÇÃO: 1,20 mm Size of Filler Metal		CORRENTE: CONTINUA Current
NÚMERO F DO METAL DE ADIÇÃO: 5 Filler Metal F. No.		POLARIDADE: (+) Polarity
ESPECIFICAÇÃO: SFA / A5.29 SFA Specification		AMPERAGEM: 200 a 216 A Amperage
CLASSIFICAÇÃO AWS: E 81T-1 AWS Classification		VOLTAGEM: 25 a 26 V Volts
OUTROS: TUBROD B1 ULTRA / ESAB Other		DIÂMETRO DO ELETRODO DE TUNGSTÊNIO: N. A. Tungsten Electrode Size
POSIÇÃO DA JUNTA (QW - 405) Position		OUTROS: N. A. Other
POSIÇÃO DA JUNTA: 3G Position of Groove		TÉCNICA (QW - 410) Technique
PROGRESSÃO DE SOLDAGEM: ASCENDENTE Weld Progression		VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO: 11 a 22,5 cm/min. Travel Speed
OUTROS: N. A. Other		CORDÃO RETO OU TRANÇADO: RETO/TRANÇADO Stitch or Weave Bead
PRÉ-AQUECIMENTO (QW - 406) Preheat		OSCILAÇÃO: LARG. MÁX. CORDÃO: 25 mm Oscillation
TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO: 75° C MÍN. Preheat Temperature		PASSE SIMPLES OU MÚLTIPLO: MÚLTIPLO Multipass or Single pass (per side)
TEMPERATURA INTERPASSE: 250° C MÁX. Interpass Temperature		ELETRODO SIMPLES OU MÚLTIPLO: SIMPLES Single or Multiple Electrodes
OUTROS: N. A. Other		OUTROS: - DISTÂNCIA BICO-PEÇA: 17 mm Other - APORTE DE CALOR: 17800 J/cm

TESTE DE TRAÇÃO (QW - 150) Tensile Test					RELATÓRIO Nº 631 Report Nº	
Nº CORPO PROVA Specimen	LARGURA Width (mm)	ESPESSURA Thickness (mm)	ÁREA (mm²) Area	CARGA MÁX. (KG) Ultimate Total Load	TENSÃO MÁX. (MPa) Ultimate Unit Stress	TIPO E LOCAL FALHA Type of Fail. & Location
	20,31	36,87	748,83	34700,0	454,12	DUCTIL / M. BASE
	19,85	37,41	742,59	35000,0	461,89	DUCTIL / M. BASE

TESTE DE DOBRAMENTO GUIADO (QW - 160) Guided Bend Tests		RELATÓRIO Nº 632 Report Nº
TIPO DE DOBRAMENTO E FIGURA Nº Type And Figure Nº	RESULTADO Result	
- D1 - LATERAL - 9,50 x 38,90 x 202 mm	APROVADO	
- D2 - LATERAL - 9,84 x 38,47 x 200 mm	APROVADO	
- D3 - LATERAL - 9,50 x 38,47 x 198 mm	APROVADO	
- D4 - LATERAL - 9,64 x 38,60 x 210 mm	APROVADO	

TESTE DE TENACIDADE (QW - 170) Toughness Test					RELATÓRIO Nº 631 Report Nº			
Nº CORPO PROVA Specimen Nº	LOCALIZAÇÃO DO ENTALHE Notch Location	TIPO DE ENTALHE Notch Type	TEMPERATURA DE TESTE Test Temperature	VALORES IMPACTO Impact Values	EXPANSÃO LATERAL Lateral Expansion		QUEDA LIVRE Drop Weight	
					% CISALHAMENTO % Shear	MILÍMETROS Mils	QUEBRADO Break	Nº QUEBRADO No. Break
	C.S.- 2 mm	U	0 °C	164,0J	N. A.	N. A.	N. A.	N. A.
	C.S.- 1/4T	U	0 °C	285,3J	N. A.	N. A.	N. A.	N. A.
	ZTA- 2 mm	U	0 °C	188,7J	N. A.	N. A.	N. A.	N. A.

TESTE EM SOLDA DE FILETE (QW - 180) Fillet Weld Test				RELATÓRIO Nº N. A. Report Nº	
RESULTADO - SATISFATÓRIO: () SIM () NÃO Result - Satisfactory Yes No		PENETRAÇÃO NO METAL BASE: () SIM () NÃO Penetration Into Parent Metal Yes No			
RESULTADO - MAGNÓGRAFICO: RELATÓRIO Nº 633 Macro - Result					
RESULTADO - ULTRA - SON: RELATÓRIO Nº 634/04 Ultrasonic - Result					
RESULTADO - TRATAMENTO TÉRMICO: N. A. Heat Treatment - Result					
RESULTADO - ACOMP. SOLDAGEM: RELATÓRIO Nº 1990 Welding Following - Result					
ANÁLISE DO DEPOSITO: CERT. CONSUMÍVEL : LOTE Nº 046461 Deposit Analysis					
OUTROS TESTES: N. A.					
NOME DO SOLDADOR: OSVALDO Welder Name				CHAPA Nº: Clock Nº	SINETE Nº: A-23 Stamp Nº
CERTIFICAMOS QUE AS INFORMAÇÕES NESTE RELATÓRIO ESTÃO CORRETAS E QUE AS SOLDAS DE TESTE FORAM PREPARADAS, SOLDADAS E TESTADAS DE ACORDO COM OS REQUISITOS DA SEÇÃO IX DO CÓDIGO ASME. We certify the statements in this record are correct and that the test welds were prepared, welded and tested in accordance with the requirements of section IX of the ASME CODE.					
EXECUTADO POR: Forced		VERIFICADO POR: Checked by		INSPECTOR AUTORIZADO: Authorized Inspector	
Inspeção de Soldagem - N2		INSPECTOR DE SOLDAGEM N2			

ARAME TUBULAR OK	METAL DEPOSITADO (%)	APLICAÇÕES	PROPRIEDADES MECÂNICAS	POSICÕES SOLDAGEM	DIÂM. (mm)	CORRENTE / TENSÃO	RENDIM. %	DEPOS. (Kg/h)	GÁS DE PROTEÇÃO TIPO DE CORRENTE
TUBROD 81 A1 ASME SFA-5.29 E81T1-A1C E851T1-A1C	C 0,04	Arame tubular rutilico, para soldagem em todas as posições, o qual possibilita elevadas taxas de deposição, resultando em uma grande produtividade. Apresenta-se com uma ampla faixa de parâmetros operacionais, baixo índice de respingos e ótima remoção de escória. É recomendado para aços 0,50% Molibdênio. Usado na fabricação de vasos de pressão, caldeiras e tubulações, dentre outros.	L.R. 640 MPa L.E. 560 MPa A 25% ChV (+ 20°C) 80J	 	1,20	150A, 28V	87	1,90	100% CO ₂ CC+
	Si 0,40				210A, 29V	87	2,85		
	Mn 0,80					250A, 30V	88	3,85	
	Mo 0,50					290A, 33V	88	4,85	
	Ni 0,12					330A, 34V	90	5,75	
					1,60	190A, 27V	87	2,75	
						300A, 30V	87	4,60	
						365A, 33V	88	5,60	
						410A, 33V	89	6,35	
						450A, 33V	90	7,30	
						500A, 39V	90	9,11	
ELETRODO OK	METAL DEPOSITADO	APLICAÇÕES	PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS	POSICÃO SOLDAGEM	TENSÃO/ TIPO CORR.	DIÂM. (mm)	COMPR. (mm)	FAIXA DE CORRENTE (A)	
74.55 básico ASME SFA 5.5 E7018-A1	C 0,05	Soldagem de grande responsabilidade em aços ligados ao molibdênio, resistentes ao calor; para vasos de pressão, caldeiras, tubulações, etc; recomenda-se pré-aquecimento do metal base.	L.R. 550-590 MPa A 25-30%	 	20 - 25 V	2,5	350	90 - 110	
	Si 0,50				CA ≥ 70 V	3,25	350	100 - 145	
	Mn 0,70				CC +	4	450	135 - 200	
	Mo 0,50					5	450	195 - 250	

ANEXO C - Parâmetros de soldagem

Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Taxa Deposição (Kg/h)	Eficiência Deposição (%)	Extensão Eletrodo (mm)
1,2	150	28	1,90	87	10 - 20
	210	29	2,85	87	10 - 20
	250	30	3,85	88	10 - 20
	290	33	4,85	88	10 - 20
	330	34	5,75	90	10 - 20
1,6	190	27	2,75	87	10 - 20
	300	30	4,60	87	10 - 20
	365	33	5,60	88	10 - 20
	410	33	6,35	89	10 - 20
	450	33	7,30	90	10 - 20
	500	39	9,11	90	10 - 20
2,4	350	30	4,35	88	20 - 32
	400	30	5,70	84	20 - 32
	450	31	6,80	85	20 - 32
	500	32	8,30	86	20 - 32
	550	34	9,60	86	20 - 32

Tabela X - Parâmetros de soldagem para arames tubulares OK Tubrod® rutilicos

Eletrodo	AWS	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Valor ótimo (A)	Tx. dep. (kg/h)	Ef. dep. (%)
OK 22.46P	E7010-G	3,2 4,0 5,0	80 – 140	100 / 130	0,9 / 1,0	76 / 69
OK 22.47P	E8010-G		90 – 180	140 / 170	1,3 / 1,3	74 / 64
OK 22.48P	E9010-G		120 – 250	160 / 190	1,5 / 1,6	75 / 70
OK 22.85P	E7010-A1					
OK 73.03	E7018-W1	2,5 3,2 4,0 5,0	65 – 105	90	0,8	66
OK 73.45	E8018-G		100 – 150	120 / 140	1,2 / 1,2	72 / 71
OK 74.55	E7018-A1		130 – 200	140 / 170	1,4 / 1,7	75 / 74
OK 75.60	E9018-M		185 – 270	200 / 250	2,2 / 2,4	76 / 75
OK 75.75	E11018-G					
OK 76.18	E8018-B2					
OK 76.28	E9018-B3					
OK 74.75	E9018-D1	3,2	100 – 150	120 / 140	1,2 / 1,2	72 / 71
OK 75.65	E10018-G	4,0	130 – 200	140 / 170	1,4 / 1,7	75 / 74
OK 78.15	E9018-G	5,0	185 – 270	200 / 250	2,2 / 2,4	76 / 75
OK 75.77	E12018-G	2,5	65 – 105	90	0,8	66
		3,2	100 – 150	120 / 140	1,2 / 1,2	72 / 71
		4,0	130 – 200	140 / 170	1,4 / 1,7	75 / 74

Tabela XI - Recomendações de parâmetros de soldagem para os eletrodos revestidos OK® para a soldagem de aços de baixa liga

