

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CESAR AUGUSTU KOLAROVIC DE CAMPOS

**ANÁLISE DA MORFOLOGIA DE CORDÕES DE SOLDA EM
DEPÓSITOS DE AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO SOBRE UM
SUBSTRATO EM AÇO SAE 1020**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015

CESAR AUGUSTU KOLAROVIC DE CAMPOS

**ANÁLISE DA MORFOLOGIA DE CORDÕES DE SOLDA EM
DEPÓSITOS DE AÇO INOXIDÁVEL MARTENSITICO SOBRE UM
SUBSTRATO EM AÇO SAE 1020**

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Coordenação de Engenharia Mecânica (COEME), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Mecânica
Curso de Engenharia Mecânica**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Cesar Augustu Kolarovic de Campos

**ANÁLISE DA MORFOLOGIA DE CORDÕES DE SOLDA EM DEPÓSITOS DE AÇO INOXIDÁVEL
MARTENSITICO SOBRE UM SUBSTRATO EM AÇO SAE 1020**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:00hs do dia 10/11/2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Joao Roberto Sartori Moreno - Presidente (Orientador)

Prof(a). Esp. Henrique Flávio Alves de Andrade - (Membro)

Prof(a). Me(a). Jefferson Luis Cesar Salles - (Membro)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família e amigos, pelo constante apoio e confiança.

Agradeço ao meu professor orientador Dr. João Roberto Sartori Moreno pela atenção, dedicação e disponibilidade na orientação deste trabalho.

À todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para que este trabalho pudesse ser concretizado.

RESUMO

CAMPOS, Cesar Augustu Kolarovic de. Análise da Morfologia de Cordões de Solda em Depósitos de Aço Inoxidável Martensítico sobre um Substrato em Aço SAE 1020; Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Este trabalho propõe uma análise das propriedades de morfologia cordões de solda em deposição de um aço inoxidável martensítico em base de aço SAE 1020 por arame TIG/FCAW, para análise posterior em sua capacidade de revestimento de pás de hélices de turbinas de aviões. O trabalho se encontra na área de soldagem, incluindo nessa área o estudo dos materiais de base e material de deposição, do processo de soldagem por arame tubular, da morfologia de cordões de solda, e parâmetros que influenciam nessa morfologia. Busca avaliar a capacidade de revestimento do aço inoxidável em um aço SAE 1020, e a influência que a morfologia dos cordões de solda pode ter nas suas propriedades.

Palavras chave: Soldagem, revestimento, TIG, FCAW, arame tubular, morfologia de cordões de solda.

ABSTRACT

CAMPOS, Cesar Augustu Kolarovic de. Analysis of the Morphology of Weld Beads in Deposit of a Martensitic Stainless Steel in a Substrate of Steel SAE 1020; Final Thesis (Graduation) – Mechanical Engineering Course, Technological Federal University of Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

This work proposes an analysis of the morphological properties of weld beads in deposition of a martensitic stainless steel SAE 1020 by wire TIG/FCAW, for a further analysis of the capacity of coating airplanes turbine propeller blades. The work is in the welding area, including in this area base metal and the weld metal, the welding process with tubular wire, the morphological properties of weld beads, and parameters that influence on this morphology. Tries to evaluate the capacity of coating welding by a stainless steel in a steel SAE 1020 and the influence that the morphology of the weld beads can have in the alteration of the properties of the cords

Keywords: Welding, coating, TIG, FCAW, tubular wire, morphological properties of weld beads.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de Equilíbrio Fe-C	16
Figura 2 – Nomenclatura dos Aços SAE.....	17
Figura 3 – Composição Química do Aço SAE 1020.....	18
Figura 4 – Soldagem por Pressão	22
Figura 5 – Soldagem por Fusão	22
Figura 6 – Processo FCAW	24
Figura 7 – Tipos de Seção em Arames Tubulares Segundo a IIW	26
Figura 8 – Regiões de Solda	28
Figura 9 – Dimensões de Solda	32
Figura 10 – Localização dos Termopares.....	36
Figura 11 – Seccionamento dos Corpos de Prova	37
Figura 12 – Morfologia do Cordão 1	38
Figura 13 – Morfologia do Cordão 2.....	39
Figura 14 – Morfologia do Cordão 3.....	39
Figura 15 – Morfologia do Cordão 4.....	39
Figura 16 – Morfologia do Cordão 5.....	40
Figura 17 – Morfologia do Cordão 6.....	40
Figura 18 – Gráfico Relativo ao Reforço da Solda	42
Figura 19 – Gráfico Relativo à Largura da Solda.....	43
Figura 20 – Gráfico Relativo à Penetração da Solda.....	44

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 – Processos de Soldagem por Fusão	21
Tabela 2 – Classificação para Arames Tubulares de Acordo com a AWS	25
Tabela 3 – Composição química referencial do aço SAE 1020	34
Tabela 4 – Composição química do metal de adição – EC410NiMo	34
Tabela 5 – Variáveis da soldagem e níveis	34
Tabela 6 – Parâmetros de soldagem mantidos constantes	35
Tabela 7 – Resultados da morfologia do cordão para Corrente Convencional	41
Tabela 8 – Resultados da ANOVA para as características geométricas da corrente convencional.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SAE – Society of Automotive Engineers

TIG – Tungsten Inert Gas

FCAW – Flux-Cored Arc Welding

ASM – American Society for Metals

AISI – American Iron and Steel Institute

AWS – American Welding Society

MIG – Metal Inert gas

MAG – Metal Active Gas

IIW – International Institute of Welding

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona Termicamente Afetada

MB – Metal de Base

ANOVA – Análise de Variância

GMAW – Gas Metal Arc Welding

SMAW – Shielded Metal Arc Welding

IC – Índice de Convexidade

ESAB – Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget

SAP – Sistema de Aquisição Portátil

VS – Velocidade de Soldagem

DBCP – Distância Bico de Contato da Peça

CC – Corrente Convencional

LISTA DE SÍMBOLOS

Fe – Ferro

C – Carbono

Mn – Manganês

Si – Silício

Cr – Cromo

Al – Alumínio

P – Fósforo

S – Enxofre

Cu – Cobre

Ni – Níquel

Sn - Estanho

Zn – Zinco

Be – Berílio

Mo - Molibdênio

°C – Grau Celsius

Kgf – Kilograma força

mm – Milímetros

mm² - Milímetros Quadrados

ppm – Parte por Milhão

MPa – Mega Pascal

min – Minutos

L – Litros

s – segundos

h – horas

A – Ampére

Hz - Hertz

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	11
1.2	OBJETIVOS	12
1.2.1	Objetivos Gerais	12
1.2.2	Objetivos Específicos	12
1.3	JUSTIFICATIVA	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	AÇO.....	14
2.1.1	Aço SAE 1020	17
2.1.2	Aço Inoxidável.....	19
2.2	SOLDA	20
2.2.1	Solda por Arame Tubular	23
2.2.2	Regiões de Solda.....	27
2.2.2.1	Zona Fundida (ZF).....	29
2.2.2.2	Zona Termicamente Afetada (ZTA)	29
2.2.3	Influências dos Parâmetros de Soldagem na Morfologia do Cordão de Solda.....	31
2.2.4	Soldagem de Revestimento.....	33
3	MATERIAIS E EXPERIMENTOS	34
4	RESULTADOS	38
4.1	MORFOLOGIA DOS CORDÕES	38
5	CONCLUSÃO.....	45
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Antigamente, como a produção era basicamente artesanal, não existia controle de qualidade sobre os produtos fabricados. Com o passar dos anos os consumidores se tornaram cada vez mais exigentes. Materiais que se quebravam com facilidade eram considerados inferiores. Testes de qualidade cada vez mais rigorosos foram sendo implementados com o passar dos anos, para que assim, fosse possível garantir uma boa qualidade dos produtos.

Atualmente todos os produtos e materiais passam por sucessivos ensaios para que não sofram imprevistos durante o seu uso. São feitos ensaios de desgaste, de fadiga, de flexão, de torção, e uma série de outros procedimentos. Todos são de suma importância para o melhor entendimento do comportamento do material em diferentes situações.

Neste trabalho, primeiramente são apresentados alguns embasamentos teóricos para melhor entendimento sobre: aços; aços SAE 1020; solda; solda com arame tubular; regiões de solda; zona termicamente afetada; zona fundida; e influencia dos parâmetros de soldagem na morfologia dos cordões de solda. Posteriormente, serão realizados processos de solda TIG/FCAW com corrente convencional com aço inoxidável martensítico em um aço SAE 1020 com variados parâmetros de soldagem. Em seguida, serão realizadas as análises das propriedades de morfologia dos cordões de solda. Essas análises servirão para avaliar qual dos parâmetros utilizados se adapta melhor a uma soldagem de revestimento.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Antes de um material ser disponibilizado para o mercado é preciso passar por uma série estudos, para que possam ser garantidas as suas qualidades e a sua funcionabilidade. Como forma de obter essas garantias são realizados sucessivos ensaios. Serão realizadas soldas de aço inox martensítico pelo processo de arame tubular em um aço SAE 1020 com parâmetros variados, e depois serão analisadas as possíveis variações das propriedades morfológicas dos cordões de solda. No caso do estudo abordado neste trabalho, será para avaliar quais parâmetros na deposição de solda no aço se adaptam melhor para uma solda de revestimento. Essas mudanças podem ter grandes influências negativas, que podem levar ao comprometimento do material e ao desperdício exagerado de componentes. No caso, o

material que se deseja recuperar são pás de hélice de turbinas de aviões. Essas pás são fabricadas com aços SAE 1020, o mesmo material que será utilizado na análise deste trabalho.

1.2 OBJETIVOS

Neste tópico serão estabelecidos os principais objetivos relacionados à proposta do Trabalho de Conclusão de Curso.

1.2.1 OBJETIVOS GERAIS

Alcançar, por meio do desenvolvimento desse trabalho, conhecimento para um melhor entendimento sobre como a realização da solda afeta a integridade e propriedades físicas do aço, para enfim, desenvolver um procedimento de solda em um tipo de aço pré-determinado com parâmetros variados, para uma análise de qual parâmetro interfere positivamente nas propriedades morfológicas do cordão.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Ampliar os conhecimentos sobre aços, em especial sobre aço SAE 1020 e inoxidável;
- Ampliar os conhecimentos sobre solda, especialmente sobre a FCAW;
- Ampliar os conhecimentos sobre regiões de solda, e morfologia dos cordões de solda;
- Determinar os parâmetros a serem utilizados para os ensaios de soldagem;
- Aplicar o procedimento nas amostras do material proposto;
- Analisar os resultados dos ensaios realizados.

1.3 JUSTIFICATIVA

Para o melhor entendimento das características do material escolhido (aço SAE 1020), faz-se necessário um estudo detalhado sobre vários aspectos. O aspecto a ser estudado nesse trabalho é a capacidade da variação dos parâmetros de soldagem interferir nas características morfológicas dos cordões de solda, especialmente largura, penetração e reforço, que são características que influenciam diretamente no rendimento do processo de soldagem de revestimento visado neste trabalho. Os dados adquiridos nesse ensaio serão importantes para esse entendimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados alguns tópicos que servirão como embasamento teórico para uma melhor compreensão do desenvolvimento do trabalho. Serão abordados temas como aço, seus tipos, produção e características e também sobre solda, especialmente processo de solda por arame tubular (FCAW), análise das regiões de solda e zona termicamente afetada (ZTA).

2.1 AÇO

Aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação. (Chiaverini, 1988)

De acordo com ASM (1991) aço é geralmente definido como uma liga de ferro e carbono, com o carbono variando percentualmente entre algumas centenas de um ponto percentual até cerca de dois pontos percentuais. Outros materiais de liga podem chegar a 5% em aços de baixa liga, e mais ainda em aço de alta liga. Aços podem apresentar propriedades variadas dependendo de sua composição e do tratamento térmico utilizado.

Segundo Chiaverini (1988), aço é definido como uma liga metálica relativamente complexa. O limite de 0,008% representa a máxima solubilidade do carbono no ferro em temperaturas ambientes, enquanto o limite de 2,11% corresponde ao máximo possível de dissolução do carbono no ferro. Apesar de ser quase que exclusivamente produzida com ferro e carbono, podem possuir vários elementos de liga, que são utilizados em quantidades pequenas, mas com a capacidade de alterar significativamente suas propriedades químicas e físicas.

De acordo com Fortes (2005), aços são comumente classificados entre aços carbono, aços baixa liga, aços de média liga, e aços de alta liga. O aço carbono é uma liga composta basicamente por ferro e carbono, variando sua dureza e resistência de acordo com a quantidade de carbono. São classificados de acordo com a porcentagem de carbono. Aços carbono que possuem até 0,14% de carbono são denominados aços de baixo carbono; entre

0,15% e 0,29% são denominados aços doce; quando variam de 0,30% até 0,59% são aços de médio carbono; e finalmente, de 0,60% até 2,00% aços de alta liga. Devido a sua alta resistência boa soldabilidade, aços doce e baixo carbono são os mais produzidos atualmente. Aços de baixa liga contém em sua composição uma quantidade relativamente baixa de elementos de liga, que alteram positivamente suas propriedades mecânicas. Melhoram resistência, tenacidade, e diminuem a corrosão. Em aços baixa liga esses elementos correspondem de 1,5% até 5,0% de sua composição química. Os elementos mais utilizados são o manganês, silício, cromo, níquel, molibdênio e vanádio. Devido a sua alta resistência, é possível uma diminuição de seu peso em seu uso. Aços média liga possuem de 5,0% até 10,0% de elementos de liga em sua composição. Apresenta características semelhantes as do aço baixa liga. Aços alta liga possuem mais de 10% de elementos de liga em sua composição química, portanto possuem propriedades excepcionais se comparados com aços mais simples. Requerem cuidados especiais durante a solda.

Para Chiaverini (1988) é necessário um estudo completo no diagrama de equilíbrio Fe-C para um entendimento perfeito do comportamento do aço. O diagrama geralmente é representado com um valor máximo de 6,7% de carbono. O valor máximo utilizado em quantidade porcentual de carbono varia entre 4,0% e 4,5%, uma vez que acima desse valor o aço não apresenta nenhum valor comercial. Na figura 1 abaixo podemos analisar um modelo de diagrama Fe-C.

De acordo com Chiaverini (1988), existem quatro constituintes básicos do aço: austenita, ferrita, cementita e perlita. Cada um influencia a sua maneira sobre as propriedades mecânicas do aço. A austenita só é estável acima de 727°C; é uma solução sólida de carbono no ferro gama e é estruturalmente caracterizada por grãos poligonais irregulares; possui boa resistência mecânica e tenacidade, e não é magnética. A ferrita contém ferro no estado alotrópico alfa e traços de carbono; também apresenta estrutura de grãos poligonais irregulares; possui baixa dureza e resistência a tração, mas possui boa resistência ao choque e alongamento. A cementita é carboneto de ferro (Fe_3C); é excessivamente dura e quebradiça; responsável por aumentar a dureza e resistência, assim como por diminuir a ductilidade; sua estrutura é cristalina ortorrômbica. A perlita é a mistura de ferrita (88,5%) e cementita (11,5%), portanto suas propriedades são intermediárias em relação a essas duas citadas anteriormente. As diferentes solubilidades dos elementos de liga modificam a faixa de temperatura em que ocorrem as transformações estruturais do aço. Mudanças que ocorreriam em temperaturas únicas passam a acontecer em faixas maiores de temperatura, onde é possível duas formas alotrópicas coexistirem.

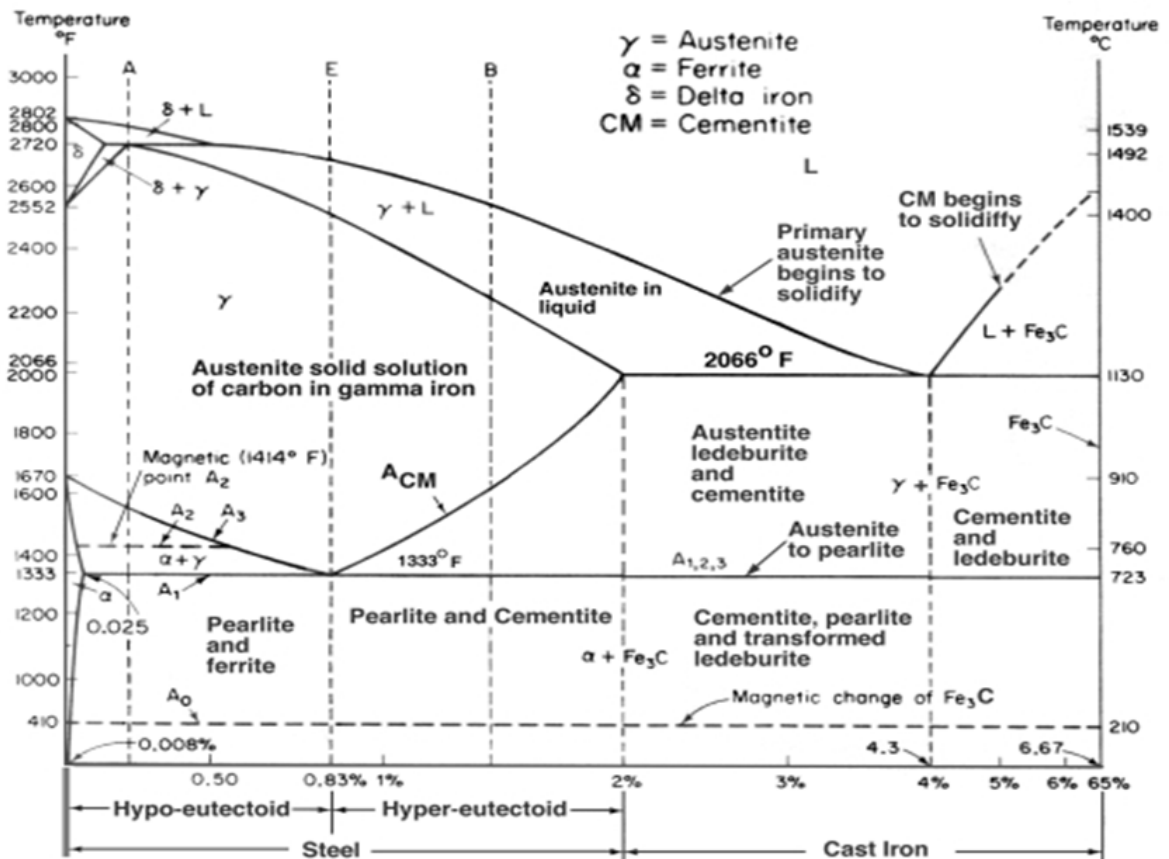


Figura 1 – Diagrama de Equilíbrio Fe-C
Fonte: Pollack (1988).

Segundo Callister (1999), em ligas de ferro-carbono também existem microconstituintes, que surgem em diferentes condições, a medida que a temperatura de transformação isotérmica é reduzida para baixo daquela na qual a perlita é produzida. Um desses microconstituintes é a bainita. Como ocorre com a perlita, a bainita consiste nas fases cementita e ferrita. Pode ser dividida em bainita superior e inferior, que dependem da temperatura de formação. A bainita superior se forma entre aproximadamente 300°C e 540°C. Nesta fase de temperatura ela se forma em serie de tiras finas e estreitas. Já a bainita inferior surge com temperaturas entre 200°C e 300°C. Nessa forma a fase ferrita existe na forma de placas finas e partículas estreitas de cementita se formam no interior dessas placas de ferrita. Existe ainda outro microconstituinte, chamado de martensita. Sua formação se dá devido ao resfriamento repentino de ligas ferro-carbono austenitizadas. É uma estrutura que não se encontra em equilíbrio, resultante de uma transformação sem difusão de austenita. Qualquer difusão que ocorre resulta na formação das fases ferrita e cementita.

2.1.1 AÇO SAE 1020

Para Chiaverini (1988) existem inúmeros sistemas de classificação de aços, devido à elevada quantidade e variedade de tipos. Dentre as classificações existem algumas mais generalizadas, como a classificação através de sua composição química. Os mais usados são os do “American Iron and Steel Institute AISI” e da “Society of Automotive Engineers SAE”. Os aços utilizados neste experimento seguem o padrão de classificação deste último. Nesse sistema as letras XX ou XXX correspondem à porcentagem de carbono que o aço possui. Nesse caso os últimos dois algarismos mostram que a liga possui 0,2% de carbono em sua composição. Os dois primeiros números servem para diferenciar os aços que possuem apenas carbono em sua composição, ou que possuem impurezas como silício, manganês, fósforo e enxofre, ou que possuem outros elementos de liga, como níquel e cromo. Na figura 2 abaixo podemos identificar a nomenclatura de cada tipo de aço em referência aos dois primeiros números.

Código SAE	Descrição ou principais elementos de liga
10xx	Aços-carbono de uso geral
11xx	Aços de fácil usinagem, com enxofre
13xx	Manganês (1,75%)
15xx	Manganês (1,00%)
23xx	Níquel (3,50%)
25xx	Níquel (5,00%)
31xx	Níquel (1,25%), cromo (0,65%)
33xx	Níquel (3,50%), cromo (1,55%)
40xx	Molibdênio (0,25%)
41xx	Cromo (0,50 ou 0,95%), molibdênio (0,12 ou 0,20%)
43xx	Níquel (1,80%), cromo (0,50 ou 0,80%), molibdênio (0,25%)
46xx	Níquel (1,55 ou 1,80%), molibdênio (0,20 ou 0,25%)
47xx	Níquel (1,05%), cromo (0,45%), molibdênio (0,25%)
48xx	Níquel (3,50%), molibdênio (0,25%)
50xx	Cromo (0,28% ou 0,40%)
51xx	Cromo (0,80, 0,90, 0,95, 1,00 ou 1,05%)
61xx	Cromo (0,80 ou 0,95%), vanádio (0,10 ou 0,15%)
86xx	Níquel (0,55%), cromo (0,50 ou 0,65%), molibdênio (0,20%)
87xx	Níquel (0,55%), cromo (0,50%), molibdênio (0,25%)
92xx	Manganês (0,85%), silício (2,00%)
93xx	Níquel (3,25%), cromo (1,20%), molibdênio (0,12%)
94xx	Manganês (1,00%), níquel (0,45%), cromo (0,40%), molibdênio (0,12%)
97xx	Níquel (0,55%), cromo (0,17%), molibdênio (0,20%)
98xx	Níquel (1,00%), cromo (0,80%), molibdênio (0,25%)

Figura 2 – Nomenclatura dos Aços SAE
Fonte: Gonçalves (2010).

No caso do aço SAE 1020 podemos analisar como sendo um aço carbono simples com o nível de carbono em torno de 0,2%.

Segundo Chiaverini (1988), é comum a presença de impurezas na composição química do aço. Essas impurezas se originam de reações entre as matérias primas empregadas ou de outros tipos reações. Essas impurezas são o fósforo, o enxofre, o manganês, o silício e o alumínio. Essas impurezas acabam reagindo com elementos não metálicos, como o oxigênio e o nitrogênio, formando as inclusões não metálicas. Essas inclusões aparecem principalmente na fase final de desoxidação desses aços. Elas podem beneficiar ou prejudicar a qualidade final do aço. Por esse motivo existem especificações rigorosas a respeito dessas impurezas, uma vez que quantidades acima da máxima admissível pode tornar a liga inconfiável. Na figura 3 abaixo podemos analisar a composição química de um aço SAE 1020. Podemos observar que o aço possui comumente as impurezas descritas e que existem variações na porcentagem dos elementos na composição química.

C	Mn	Si	Cr	Al	P	S
0,17	0,30	0,40	----	----	0,04	0,05
–	–	máx	---	---	máx.	máx.
0,24	0,60					
0,18	0,60	0,15	0,30	0,02	0,025	0,02
–	–	–	–	–	máx.	–
0,23	0,90	0,35	0,40	0,05		0,04

Figura 3 – Composição Química do Aço SAE 1020
Fonte: Gerdau (2011).

De acordo com Chiaverini (1988) o enxofre, o fósforo, o oxigênio e o hidrogênio são indesejáveis na composição química do aço, já que podem comprometer a sua qualidade. O fósforo pode acarretar em fragilidade a frio; o enxofre pode levar a fragilidade a quente; o oxigênio forma inclusões; e o hidrogênio pode conferir fragilidade ao aço. Como não é possível eliminar esses elementos da composição do aço é feito o possível para mantê-los dentro do limite prejudicial. O manganês, o silício e o alumínio podem ser tanto benéficos quanto maléficis. Beneficamente falando, podem agir como desoxidante, e no caso do manganês como desulfurante. Por outro lado formam inclusões de sulfetos, silicatos e aluminatos.

2.1.2 AÇO INOXIDÁVEL

Para Callister (1999), aços inoxidáveis possuem alto nível de resistência a corrosão (oxidação superficial) em variados ambientes, especialmente a atmosfera. Seu elemento de liga predominante é o Cromo, sendo necessária uma concentração de cromo de pelo menos 11%. A resistência a corrosão pode ser melhorada adicionando níquel e molibdênio a sua estrutura. São divididos em martensíticos, ferríticos, ou austeníticos. Podem apresentar variadas propriedades mecânicas de acordo com sua composição, tornando o aço inoxidável muito versátil em suas aplicações. Aços inoxidáveis martensíticos podem ser submetidos a tratamento térmico que torne a martensita seu principal constituinte. Para os aços austeníticos, o campo de fases da austenita se estende até a temperatura ambiente. Os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos são endurecidos tem a sua resistência aumentada através da deformação plástica a frio, uma vez que não é possível realizar um tratamento térmico. Os aços inoxidáveis austeníticos são os mais resistentes a corrosão, devido aos elevados teores de cromo, e a presença de níquel. Tanto os aços inoxidáveis martensíticos e ferríticos são magnéticos, enquanto o austenítico não é.

Os aços inoxidáveis são materiais com utilização crescente nas indústrias em função de suas características específicas, principalmente aquelas relacionadas à resistência a corrosão. Além de versátil, resistente, anticorrosivo, portanto dono de uma vida útil prolongada, o aço inoxidável traz valor agregado em tempo de responsabilidades sociais corporativas. Seu alto índice de aproveitamento para reciclagem além de ecologicamente correto combina muito bem com redução de custos principalmente em tempos de crise. Porém, são materiais que exigem cuidados especiais na sua trabalhabilidade, sob o risco de comprometimento de suas propriedades físicas e mecânicas. Dentre estes riscos, uma atenção especial deve ser dada à soldagem dos aços inoxidáveis, pois é um das operações mais importantes já que procedimentos inadequados podem afetar de forma definitiva alterações significativas no metal de base, principalmente no que concerne a sua resistência a corrosão (Barbosa, 1995)

Segundo Callister (1999), aços inoxidáveis são usados frequentemente em temperaturas elevadas, uma vez que mantém sua resistência à corrosão e propriedades mecânicas. Seu limite de temperatura chega a até 1000°C. São usados frequentemente em turbinas, caldeiras, aeronaves e mísseis.

2.2 SOLDA

Processo de união de materiais usado para obter a coalescência localizada de metais e não metais, produzidos por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem utilização de pressão e/ou material de adição. (AWS, 1994)

Segundo Corrêa (2000), se comparados com os outros processos de fabricação mecânica de metais e suas ligas, o processo de soldagem foi o que mais se desenvolveu nas últimas décadas. Atualmente é difícil encontrar uma construção mecânica onde não foi utilizado o processo de soldagem. Assim sendo, a história da soldagem se mistura com a história da evolução dos materiais nas suas diversas aplicações, como em estruturas, áreas de transportes, indústria alimentícia, geração de energia nuclear e na área espacial.

Para ASM (1994), atualmente a soldagem é essencial para o desenvolvimento de produtos manufaturados. Entretanto esse processo consome uma grande fatia do custo do produto, e para produção em massa algumas dificuldades costumam aparecer. É necessário um conhecimento muito grande da área para maximizá-la, uma vez que apresenta variados processos de soldagem e um grande número de variáveis que afetam a soldagem, como velocidade da solda e tipos de materiais utilizados. É necessário também um cuidado com as juntas da soldagem, uma vez que essa é a região que apresenta uma alta porcentagem de falhas, pois se localizam em áreas de alto estresse. Essas regiões se tornam a parte mais fraca da ligação. Cuidados excessivos nessa área levam a grandes recompensas, economicamente falando.

Para Marques, Modenese, Bracarense (2011), embora os métodos hoje utilizados no processo de soldagem ser relativamente recentes, outros processos de soldagem como a brasagem e o por forjamento são utilizados desde épocas distantes. Na antiguidade até a idade média era utilizada o processo de soldagem por forjamento para a obtenção de armas brancas. Devido a escassez do aço, as armas eram forjadas no ferro, e tiras de aço eram soldadas em locais estratégicos para um aumento na resistência mecânica e tenacidade do material. A partir do momento em que as tecnologias foram se aprimorando, o uso de energia foi facilitado, e o custo de outros processos de fabricação, como a fundição, foi diminuindo, a soldagem caiu em desuso. A soldagem permaneceu como processo secundário até o século XIX, quando começaram as experiências com arco elétrico. A partir desse momento, a soldagem voltou ao cenário, mas na maioria dos casos apenas para execução de reparos de emergência. A soldagem passou a figurar como o processo de maior relevância no mundo

apenas após o início da primeira guerra mundial. Atualmente existem mais de 50 processos de soldagem, tornando-o assim no mais importante método para união permanente de metais. Na tabela abaixo temos alguns exemplos de processos de soldagem por fusão, características principais e aplicações.

Tabela 1 – Processos de Soldagem por Fusão

Processo	Características	Aplicações
Soldagem ao Arco Submerso	Automática/Mecanizada ou semi automática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo.	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com Arame Tubular	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Auto ou semi automático.	Soldagem de aços carbono com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de chapas.
Soldagem MIG/MAG	Automática/Mecanizada, ou semi automática. O arame é sólido.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição.
Soldagem TIG	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn e Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de solda em tubulações.
Soldagem por Feixe Eletrônico	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura.

Fonte: Marques, Modenese, Bracarense, 2011.

Segundo Figueiredo (2005), A grande vantagem da soldagem é a continuidade do material, não só em sua aparência externa, como também em suas características e propriedades químicas, relacionadas a sua estrutura interna.

De acordo com Marques, Modenese, Bracarense (2011), são utilizados dois métodos principais para processos de soldagem: soldagem por pressão, e soldagem por fusão. O primeiro consiste em deformar as superfícies de contato aproximando os átomos. Pode ser facilitada com aquecimento. Na figura 4 abaixo podemos analisar esse processo de soldagem.

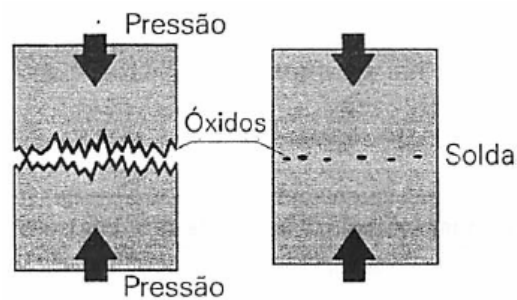


Figura 4 – Soldagem por Pressão
Fonte: Marques, Modenese, Bracarense (2011).

O segundo consiste na aplicação localizada de calor no metal da base e do metal de adição, atingindo assim o seu ponto de fusão, que preenche os espaços entre os materiais que se deseja soldar. O metal de adição é fundido pela fonte de calor e misturado com uma quantidade de metal de base, formando a poça de fusão. Quando o material fundido se solidifica, a solda é formada, como podemos ver na figura 5.



Figura 5 – Soldagem por Fusão
Fonte: Marques, Modenese, Bracarense (2011).

Para Pauli, Uliana (1996), na soldagem os materiais das peças devem ser, se possível, iguais, ou no mínimo devem ser semelhantes em sua composição. O material de fusão também deve apresentar características semelhantes, uma vez que os materiais se fundem na região da solda. O metal de adição deve ter um ponto de fusão próximo ao do metal de base, ou então um pouco abaixo, ou então ocorrerá uma deformação plástica significativa.

Para Corrêa (2000), o processo de soldagem é um processo relativamente novo, tendo uma grande evolução a partir da segunda guerra mundial. Desde então tem tido um rápido desenvolvimento tecnológico, com o desenvolvimento de novas fontes de soldagem, e de novos materiais utilizados com materiais de adição.

Segundo Marques, Modenese, Bracarense (2011), a soldagem é atualmente o método mais utilizado para união permanente de peças metálicas. Permite uma montagem rápida, segura, e econômica se comparada com outros processos de fabricação. Podemos analisar o exemplo da junção de duas placas metálicas através de parafusos ou rebiteagem. Isso exigiria que as chapas fossem previamente furadas, causando perda de seção. Também teríamos que levar em conta que isso aumentaria consideravelmente o peso das chapas. Uma das maiores vantagens da solda é a possibilidade de unir a maioria das ligas metálicas comumente utilizadas, uma vez que existem inúmeros processos de soldagem. Além disso, a soldagem pode ser facilmente adaptada a qualquer ambiente de trabalho, que vão desde o chão de fábrica, até trabalhos em campo, como por exemplo, debaixo d'água.

De acordo com Pauli, Uliana (1996) existem algumas desvantagens do processo de soldagem, como o fato de que após a solda ser realizada, não é possível reverter o processo para separar as partes, e também exigem um trabalho de acabamento. Em trabalhos especiais é necessária mão de obra especializada, e uma análise e ensaios dos cordões de solda.

2.2.1 SOLDA POR ARAME TUBULAR

Segundo Marques, Modenese, Bracarense (2011), a soldagem a arco com arame tubular (FCAW) é um processo que une dois materiais pelo aquecimento entre um eletrodo tubular e a peça de trabalho através de um arco elétrico. Nesse método, a proteção do eletrodo é feita pelo material contido em seu interior. Pode ser complementado com o uso de um gás de proteção de uma fonte externa. Esse material interno (fluxo) também funciona como desoxidante, refinador do material de solda, estabilizador do arco elétrico e como adicionador

de elementos de liga. Existem também arames tubulares cujo enchimento é realizado com pós de metais. Na figura 6 podemos observar a esquematização do processo. O FCAW é aplicável aos aços carbono e de baixa liga e aos aços inoxidáveis.

Para Fortes (2004), o surgimento de arames tubulares para soldagem de aços carbono deu-se nos anos 50, tornando-se disponíveis para comercialização alguns anos mais tarde. Foram desenvolvidos devido a crescente necessidade de melhoramentos de competitividade, visando o aumento da produtividade e redução de custos. O consumo desse tipo de arame obteve um crescimento considerável em vários mercados mundiais de elevada importância, como Estados Unidos e Japão. O fluxo em seu interior pode conter minerais, ferros-liga, materiais que forneçam gás de proteção, desoxidantes, e materiais formadores de escória. Esse fluxo tem a capacidade de estabilizar o arco, influenciando as propriedades mecânicas do material de solda, e no perfil da solda.

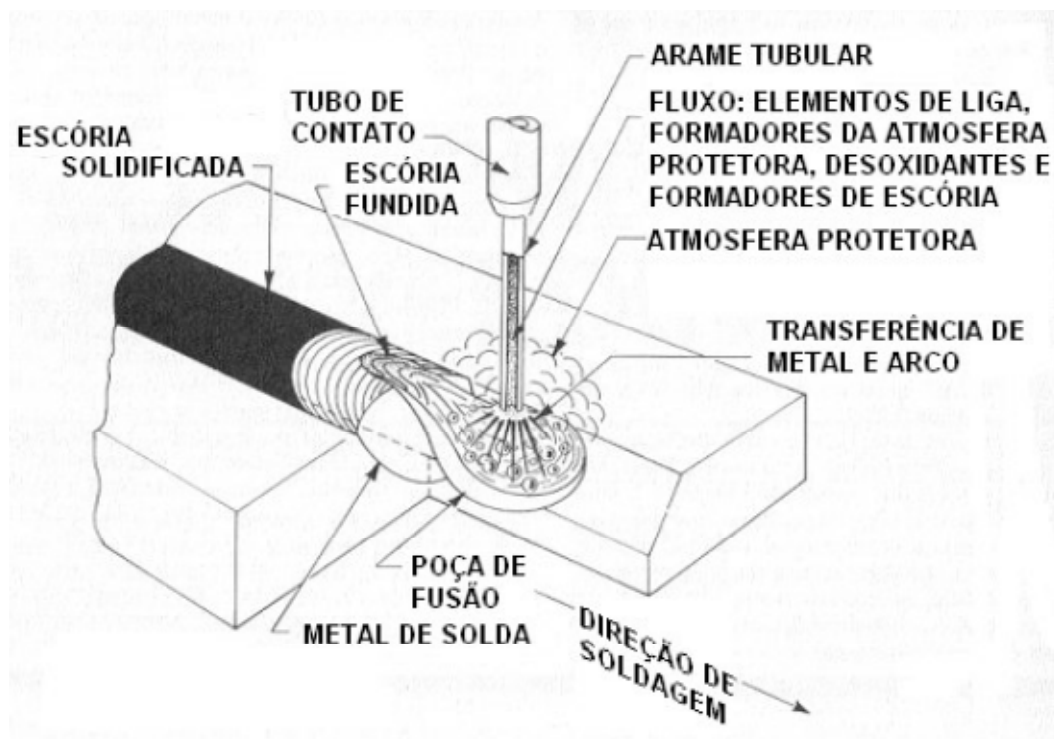


Figura 6 – Processo FCAW.
Fonte: Fortes (2004).

De acordo com Starling (2011), a soldagem com arame tubular (FCAW) apresenta as principais vantagens da soldagem com arame maciço e proteção gasosa (GMAW), como alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição, alto rendimento, resultando em alta produtividade e qualidade da solda. A soldagem com arame tubular também apresenta as

vantagens da soldagem manual com eletrodos revestidos (SMAW), possuindo assim alta versatilidade, possibilidades de ajustes da composição química do cordão e facilidade de operação em campo. Nesse tipo de soldagem o material do eletrodo necessita ser previamente aquecido desde a sua temperatura inicial, até sua temperatura de fusão, e a seguir precisa ser fundido e separado do eletrodo. A velocidade com que o eletrodo se funde deve ser próxima da velocidade de alimentação, para manter assim um comprimento de arco constante.

Para Fortes (2004), o processo FCAW se assemelha bastante com os processos MIG/MAG. Embora não seja o processo mais produtivo, se comparado com processos como arco submerso e processos robotizados, o arame tubular oferece um processo mais flexível, sendo possível aumentar consideravelmente a produtividade com investimento baixo. O processo pode ser facilmente adequado de MIG/MAG para FCAW, apenas com troca de alguns acessórios como roldanas e alguns materiais consumíveis da tocha.

Segundo Marques, Modenese, Bracarense (2011), o equipamento básico utilizado na soldagem com arames tubulares é composto por uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem, e em alguns casos, faz-se o uso de uma fonte de gás protetor. Arames de menor diâmetro (menor que 2,4mm) são utilizados com fontes de tensão constante e alimentador de velocidade constante. Já os arames com maior diâmetro (maior que 2,4mm), são utilizados também com tensão constante, mas seu alimentador possui velocidade variável. O controle de comprimento do arco é (MIG/MAG). A fonte de gás de proteção (quando utilizado) possuem reguladores de pressão/vazão e mangueiras. Os arames tubulares para soldagem são classificados pela AWS de acordo com a tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Classificação para Arames Tubulares de Acordo com a AWS

Especificação	Consumível
AWS A 5.9	Arames de aço inoxidável com pó metálico interno
AWS A 5.15	Arames para soldagem de ferro fundido
AWS A 5.18	Arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno
AWS A 5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A 5.21	Arames para revestimento
AWS A 5.22	Arames tubulares para soldagem de aço inoxidável
AWS A 5.29	Arames de aço de baixa liga com fluxo interno

Fonte: Marques, Modenese, Bracarense, 2011.

De acordo com Marques, Modenese, Bracarense (2011), os arames tubulares possuem variadas seções transversais. Arames de seções mais complexas possuem custo

elevado se comparados com os de seção simples, mas compensam apresentando melhores características operacionais devido a maior homogeneidade de aquecimento ao longo da seção transversal e maior regularidade de transferência metálica. Geralmente o peso equivalente dos materiais do interior do arame fica entre 15% e 30%, mas podem atingir valores próximos a 50% em arames especiais. Na figura 7 abaixo podemos analisar variados tipos de seções em arames tubulares, baseado em uma classificação realizada pelo IIW (International Institute of Welding).


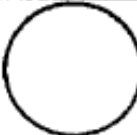

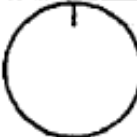

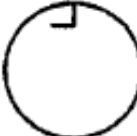






Tipo Nº.	Seção	Símbolo	Descrição
1			Sem costura
2			De topo
3			Sobreposto
4			Dobra simples
5			Dobra múltipla
6			Dobra dupla

Figura 7 – Tipos de Seção em Arames Tubulares Segundo a IIW.
Fonte: Marques, Modenese, Bracarense (2011).

Segundo Marques, Modenese, Bracarense (2011), ultimamente a utilização de arames tubulares em processos de solda vem aumentando consideravelmente. Vem sendo largamente utilizada nas indústrias naval e nuclear, em construções em plataformas marítimas

para exploração de petróleo, e na fabricação de componentes e estruturas de aço carbono, de baixa liga e aços inoxidáveis.

De acordo com Machado (1996), o processo arame tubular apresenta uma taxa de deposição muito alta em regiões planas se comparado ao processo com eletrodo revestido e o processo MIG. Quando o processo é realizado com proteção de gás eficiência de deposição se encontra geralmente entre 85-90%. No caso do eletrodo autoprottegido essa eficiência cai um pouco, ficando na faixa de 80-87%. Em alguns consumíveis modernos essa taxa pode chegar a 95%, que é uma taxa de deposição muito alta. Por outro lado, a razão entre tempo de arco aberto e o tempo total de soldagem geralmente se encontra na faixa de 35%, mas pode alcançar 50%.

Para Machado (1996) o eletrodo tubular é um processo bem versátil, uma vez que pode ser empregado em soldas de aços com espessuras de 2mm até 75mm, algumas vezes até maiores. Também possui uma velocidade de solda alta, podendo chegar a 10mm/s. Um dos principais fatores negativos é a alta vazão de gás (cerca de 40% a mais do que o processo MIG). O alto preço do arame consumível também deve ser levado em conta. Em alguns países pode chegar a custar 3x mais do que o consumível MIG. A presença de escoria também é apontada como desvantagem, já que se faz necessária uma limpeza adequada. Uma análise completa desses prós e contras mostra que esse processo é um dos mais competitivos economicamente e tecnicamente.

2.2.2 REGIÕES DE SOLDA

Segundo Figueiredo (2005), como a principal fonte de energia da solda é o calor, ocorrem transformações metalúrgicas e acabam por ocorrer fenômenos mecânicos na região da solda. Um ponto localizado próximo à junta sofrera uma variação de temperatura devido ao calor, não somente do arco, como também da dissipação de calor sofrido pela peça. Essa transferência de calor depende de algumas variáveis, como tipo de metal da base, geometria da junta, espessura da junta, energia de soldagem, e temperatura inicial da peça.

Para Marques, Modenese, Bracarense (2011), a junta precisa ser aquecida até uma temperatura adequada. No caso de soldagem por fusão, as temperaturas da fonte de calor geralmente variam de 2000°C a 20000°C. Além do alto nível de temperatura, possui alto nível de concentração. Devido a essa alta temperatura e alta concentração de temperatura, ocorrem

mudanças microestruturais e de propriedades significantes em um pequeno volume do material de base. O fluxo de calor pode ser dividido principalmente em duas partes: fornecimento de calor; e dissipação do calor pela peça. Essa dissipação de calor se dá por condução, e varia conforme a distância da zona de fusão.

De acordo com Figueiredo (2005), podemos dividir a região da solda em três regiões: Zona Fundida (ZF), Zona Termicamente Afetada (ZTA), e Metal de Base (MB). ZF é a região onde houve fusão e solidificação do material. ZTA é a região onde não houve mudança de estado, mas ocorreu uma mudança estrutural. E metal da base é a região que se encontra a uma distancia considerável, que acabou por não sofrer alterações devido ao calor. Na figura 8 abaixo podemos analisar essas regiões.

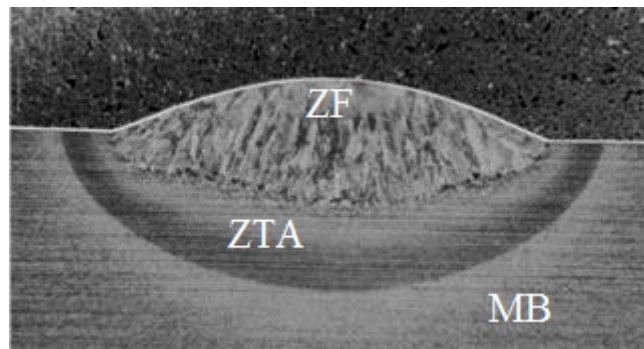


Figura 8 – Regiões de Solda.
Fonte: Paredes (2015).

Para Marques, Modenese, Bracarense (2011), a característica mais importante para o estudo na soldagem de aços carbono é a velocidade de resfriamento, pois quando aquecidas a temperaturas elevadas são austenitizadas na região de solda, e no resfriamento os produtos de transformação de austenita dependem das condições de resfriamento. Essa dissipação de calor varia muito conforme o tipo de metal de base, e o formato geométrico da junta, espessura da junta, e temperatura inicial da peça. Metais com elevada condutividade térmica dissipam mais rapidamente o calor da região da solda para o resto da peça, dificultando assim a formação da poça de fusão. Por outro lado, materiais com baixa condutividade térmica apresentam gradientes térmicos elevados não aquecimento, e menores velocidades de resfriamento. Nesse tipo de material a energia utilizada para a criação da poça de fusão é mais bem aproveitada. Em relação ao formato geométrico da junta, alguns tipos dissipam o calor mais facilmente. Uma junta em formato de T dissipa o calor mais facilmente pela peça do que uma junta de

topo. É levada em conta também a espessura da peça. Quanto maior a espessura, mais facilmente ocorrerá a dissipação de calor.

2.2.2.1 ZONA FUNDIDA (ZF)

Região onde o material fundiu-se e solidificou-se durante a operação de soldagem. As temperaturas de pico desta região foram superiores a temperatura de fusão do metal de base. (Marques, Modenese, Bracarense, 2011)

De acordo com Marques, Modenese, Bracarense (2011), em processos de soldagem por fusão a zona fundida se forma em diferentes condições. Nos processos mais comuns, o metal de adição é aquecido a temperaturas elevadas, causando sua fusão, sendo então transferido para a poça de fusão. No caso de aços, essa temperatura de fusão chega a ultrapassar 2000°C. As regiões logo abaixo do arco são as regiões de maior temperatura. Nessa área o metal de adição se mistura ao metal de base fundido. Na parte posterior da poça a temperatura cai gradativamente, possibilitando assim a solidificação do material. Este material de solda solidificado denomina-se cordão de solda. Nas regiões mais quentes também ocorrem interações do metal fundido com escória. Ocorre a absorção de gases, a redução de óxidos, a transferência de materiais entre a escória e o metal fundido. A composição final da zona fundida é influenciada diretamente pela intensidade dessas interações e da composição química dos metais de base e de adição.

2.2.2.2 ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA)

Região não fundida do metal de base que teve sua microestrutura e/ou propriedades alteradas pelo ciclo térmico de soldagem. As temperaturas de pico nessa região foram superiores à temperatura crítica de material em questão e inferiores à sua temperatura de fusão. (Marques, Modenese, Bracarense, 2011)

Para Kou (2002), a dureza de um material pode ser drasticamente reduzida pelo calor durante uma soldagem na área denominada zona termicamente afetada (ZTA). Isso ocorre quando essa área é submetida a uma quantidade grande de calor, aumentando a sua temperatura, mas sem chegar ao seu ponto de fusão, afetando a integridade microestrutural da região e alterando suas propriedades mecânicas. A recristalização e a alteração estrutural dos grãos podem tornar a zona termicamente afetada muito mais fraca do que o metal de base.

Segundo Fortes (2004), não é possível acumular um gradiente térmico em uma solda por fusão. A propagação de calor para o metal de base é influenciada consideravelmente pela temperatura da poça de fusão, e pela velocidade de soldagem. O gradiente térmico é diminuído em soldagens com alta potência e alta velocidade. A região da ZTA que se encontra próxima a ZF sofre variações muito grandes de temperatura em um curto período de tempo. Essa temperatura aumenta e diminui rapidamente, produzindo um efeito de tempera. No caso de aços, essa região torna-se austenítica durante o aquecimento, e quando se resfria pode conter martensita. Devido a isso, a região acaba por desenvolver grãos grosseiros. Em regiões que a variação de temperatura não foi tão alta, mas ocorreu, o tamanho do grão é menor. Em regiões mais distantes, mas que sofreram pouca ação do calor, mantém o tamanho dos grãos, mas tem a sua dureza reduzida e elimina os efeitos de qualquer encruamento.

De acordo com Marques, Modenese, Bracarense (2011) as características de ZTA variam conforme o tipo do metal de base, e dos processos e do procedimento a que foi a soldagem submetida. Assim sendo, os efeitos do ciclo térmico variam consideravelmente. Em metais não transformáveis que foram recozidos a maior mudança que ocorre em sua estrutura é o crescimento de grão. Em caso de materiais encruados, além da região de crescimento de grãos em contato com a zona fundida, surgirá uma região recristalizada em um local mais afastado.

Para Fortes (2004), os defeitos mais comuns que podem ocorrer em uma ZTA são: a fissuração por hidrogênio (fissuração sob cordão); decoesão lamelar; trincas de reaquecimento; fissuração por corrosão sob tensão; e trincas de liquação ou microfissuração.

No caso de metais transformáveis, como aços carbono e aços baixa liga, a opinião de Bracarense (2011) é de que a ZTA se torna mais complexa, uma vez que apresentará regiões características. Essas regiões são divididas em região de crescimento de grão, região de refino de grão, e região intercrítica. A região de crescimento de grão é a região mais afetada pelo calor. Sendo a região mais perto da solda é submetida na média a temperaturas que variam de em torno de 1200°C até a temperatura de fusão. A estrutura austenítica acaba sofrendo um grande crescimento de grão, que dependerá do tipo de aço e da energia da soldagem. A

estrutura final de transformação do teor de carbono e dos elementos de liga, do tamanho dos grãos austeníticos e da velocidade de resfriamento. Essa região é caracterizada por uma estrutura grosseira. Tende a ser a região mais problemática da ZTA, uma vez que apresenta baixa tenacidade, tornando-se mais suscetível a trincas. Pode ser minimizada através da escolha correta das condições de soldagem, a energia de soldagem e a temperatura de pré-aquecimento para cada material específico. A região de refino de grão consiste da porção da junta afetada por temperaturas relativas a normalização do aço. Essa temperatura varia entre 900°C e 1200°C. É caracterizada por uma estrutura fina de ferrita e perlita. Geralmente não apresenta grandes problemas. a região intercritica é afetada por temperaturas entre 727°C até 900°C. Somente uma parte dessa região acaba sendo austenitizada. Em algumas situações específicas, é possível que ocorra o surgimento de regiões de elevada dureza e baixa tenacidade. Regiões que são afetadas por temperatura inferiores a 727°C raramente apresentam alguma mudança estrutural significativa.

2.2.3 INFLUÊNCIAS DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA MORFOLOGIA DO CORDÃO DE SOLDA

Para Moreira (2008), para a garantia de alta qualidade em um procedimento de soldagem se faz necessário um estudo no controle dos modos de transferência metálica. Os parâmetros de solda afetam diretamente a qualidade, a produtividade e o custo da solda. Diferentes parâmetros de solda influenciam na morfologia do cordão de solda. Levando esses aspectos em conta, podemos constatar que o tamanho e a forma do cordão de solda influenciam a qualidade da solda e por isso devem ser considerados para um possível projeto de engenharia. A geometria da solda influencia na complexidade de tempos e ciclos de soldagem, aumentando assim os custos de fabricação. Alguns desses parâmetros podem ser ajustados durante o processo de soldagem, como corrente de soldagem, tensão do arco, a velocidade de soldagem, o ângulo da pistola, a distância do bocal, a posição e direção da soldagem e a taxa de fluxo de gás. Outros parâmetros não podem ser mudados durante o processo de soldagem, como diâmetro e composição do arame e o tipo de gás protetor.

Segundo Corrêa (2000), a geometria do cordão de solda é caracterizada pela largura, reforço, penetração e diluição. Essas características influenciam as propriedades mecânicas do

material. Na figura 9 abaixo podemos observar detalhadamente as divisões do cordão de solda. Devemos considerar também que a geometria do cordão de solda é afetada também pela composição do fluxo e dos parâmetros de soldagem.

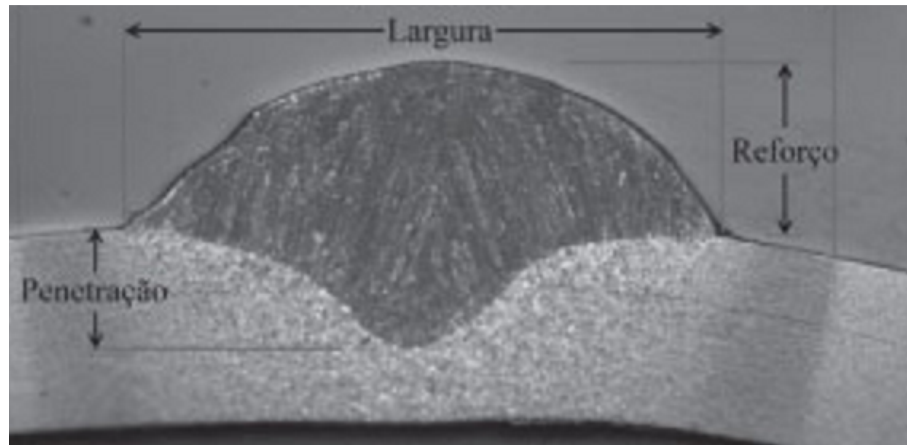


Figura 9 – Dimensões de Solda.
Fonte: Pereira (2013).

De acordo com Moreira (2008), uma penetração suficiente, taxa de aquecimento adequada e perfil de solda levam a uma boa qualidade de junta de solda, que são afetadas pela corrente elétrica, pela tensão do arco, pela velocidade de soldagem e pelos parâmetros do gás de proteção. A intensidade de corrente de soldagem deve ser bem analisada, uma vez que afeta a capacidade de fusão do material, no tamanho da poça de solda, na geometria do cordão de solda, e na profundidade de penetração. Se a corrente for demasiadamente baixa pode ocorrer acúmulo de metal de solda no metal de base devido ao baixo valor de penetração. Velocidade de soldagem é outro parâmetro que interfere na soldagem. Uma velocidade muito baixa causa acúmulo de metal de solda, grande poça de solda e baixa penetração. Uma velocidade adequada leva a uma penetração adequada. Estudos que associam os parâmetros de soldagem e a morfologia do cordão de solda são realizados desde o ano de 1900. Os resultados mostram que a corrente do arco tem maior influência na geometria do cordão.

Segundo Corrêa (2000), a penetração da solda aumenta de acordo com maiores níveis de concentração e intensidade de energia e também quanto maior a ação de escavação do arco. A concentração de energia é determinada pelo diâmetro do arco. Quanto menor for o comprimento, maior a condutividade térmica e menor o diâmetro do eletrodo. Já a intensidade de energia aumenta a medida que há um aumento da corrente e uma diminuição da velocidade de soldagem.

2.2.4 SOLDAGEM DE REVESTIMENTO

De acordo com Corrêa (1999), a soldagem de revestimento é muito usada para aumentar ou melhorar a vida útil de componentes mecânicos na engenharia, obtendo assim uma redução de custos. É definida como um depósito de um material de solda em uma camada de uma parte do metal de base, obtendo assim propriedades diferentes em sua superfície. A altura do cordão de solda não pode ser muito grande, uma vez que pode implicar na perda de material de revestimento em um possível processo de fabricação subsequente a soldagem.

Para Moreira (2008), na soldagem de revestimento alguns parâmetros devem ser levados em conta. É interessante baixos valores de diluição e penetração. A largura deve ser o maior possível, diminuindo deste modo o número de passes que serão executados. A largura influencia também na relação reforço/largura que gera o Índice de Convexidade (IC). Para uma eficiência adequada de depósito, o IC deve ser o menor possível.

3 MATERIAIS E EXPERIMENTOS

Os ensaios serão realizados somente com o processo de soldagem com arame tubular (FCAW) com corrente convencional na soldagem do revestimento. Esse metal de revestimento (metal de base) será um aço SAE 1020 nas seguintes dimensões: 12,70 mm x 127,00 mm x 185,00 mm. Na tabela 3 abaixo podemos analisar a sua composição química. O metal de adição será um arame tubular inoxidável martensítico e possui diâmetro de 1,20mm. Na tabela 4 abaixo podemos analisar sua composição química.

Tabela 3 – Composição química referencial do aço SAE 1020.

Elementos	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Sn	N2 (ppm)
Teor em %	0,18 a 0,23	0,30 a 0,60	0,10 a 0,30	0,030 máx.	0,035 máx.	0,200 máx.	0,150 máx.	0,150 máx.	0,060 máx.	80
Resistência à tração (kgf/mm²)				45	Limite de escoamento (kgf/mm²)				25	

Fonte: Gerdau Catalogo 2011.

Tabela 4 – Composição química do metal de adição – EC410NiMo.

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Teor em %	0,027	0,440	0,590	0,024	0,006	12,500	4,860	0,430
Resistência à tração (MPa)	910			Limite de escoamento (MPa)				830

Fonte: ESAB Catalogo 2014.

Na tabela 5 baixo são apresentados os parâmetros de soldagem utilizados no estudo.

Tabela 5 – Variáveis da soldagem e níveis.

Variáveis/Níveis	-1	1
Ângulo da Tocha (graus)		58,5
Corrente Média de Soldagem (Amperes)	200	230
Distância Bico Contato Peça (mm)	30	36
Velocidade de Soldagem (mm/min.)	300	400

Fonte: Autoria Própria

Primeiramente serão determinados a distância bico contato/peça para o metal de adição, o arame tubular EC410NiMo com diâmetro de 1,2mm sobre o metal de base na posição plana, com um cordão de solda de aproximadamente 150mm de comprimento. Alguns parâmetros, que serão apresentados na tabela 6 abaixo, serão mantidos fixos.

Tabela 6 – Parâmetros de soldagem mantidos constantes.

Parâmetro	Nível
Gás de Proteção	Ar+ 2%O
Vazão de Gás	15 L/min.
Temperatura de pré-aquecimento	120 ⁰ C
Eletrodo	CCEP

Fonte: Fonte: ESAB Catalogos 2014.

A próxima etapa dos ensaios será a fase final dos experimentos. Serão utilizados os parâmetros da tabela 3 com seus respectivos níveis para os corpos de prova em sua forma definitiva. Serão realizadas duas amostras em cada condição, totalizando 6 ensaios.

A quantidade de material fundido num determinado período de tempo (taxa de fusão), a quantidade de material depositado num determinado período de tempo (taxa de deposição) e o rendimento do processo, levam a identificação de defeitos oriundos da deposição. Os corpos de prova serão identificados individualmente, e serão pesados antes e depois da soldagem. O metal de adição será dividido em 30 amostras. Cada amostra apresentará um comprimento de 100 mm de comprimento e serão pesados para definir sua densidade linear.

Antes da realização das soldagens, os corpos de prova serão aquecidos em um forno mufla até atingirem 170°C, evitando assim a concentração de hidrogênio nas peças. Após esse aquecimento, as peças estarão aptas a serem levadas para a mesa de soldagem.

A temperatura dos corpos de prova será monitorada através de termopares. Serão utilizados termopares do tipo K, instalados no corpo de prova de acordo com a figura 10 abaixo. Quando esses corpos de prova atingirem a temperatura de 120°C será executada a soldagem.

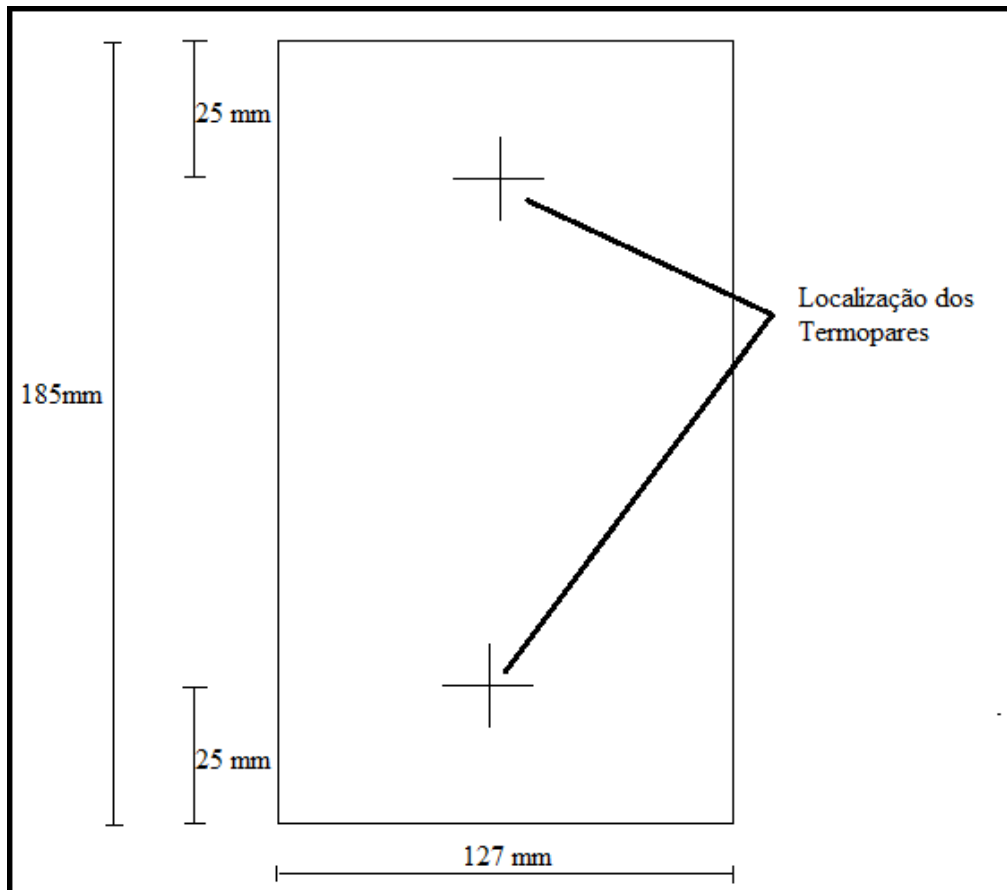


Figura 10 – Localização dos Termopares.
Fonte: Autoria Própria

Para a aquisição dos dados será utilizado um sistema de aquisição portátil da IMC-Soldagem modelo SAP-4 (Sistema de Aquisição Portátil – 4) para fazer a leitura instantânea das grandezas corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás, com tempo configurável de até 600s, com taxa de amostragem de 5000 pontos por segundo para cada variável. A leitura dos valores médios e eficazes da corrente e tensão, de potência, de tempo de arco aberto, quantidade de arame para acompanhamento da produção e qualidade da soldagem pode ser feita com amostras de 1 s por até 80 h seguidas, ou em 0.1 s por 8 h.

Além da aquisição dos dados de tensão e corrente de soldagem, será utilizado também um sistema de aquisição de dados da National Instruments CDAQ-9178 com os módulos de aquisição de temperatura e acelerômetro. Os termopares utilizados serão do tipo K e o acelerômetro industrial piezoelétrico de vibração modelo KS80D, com uma faixa de frequência linear de 0,3 a 14.000 Hz.

Será utilizado um acelerômetro para determinar defeitos em trilhos do trem de soldagem através do contato entre o trilho e a roda.

Após a execução da soldagem nos corpos de prova, serão fotografados individualmente para verificarmos possíveis defeitos superficiais encontrados e suas dimensões. Esses defeitos serão analisados e classificados de acordo com as condições de soldagem executadas para detectarmos as melhores condições dos cordões sem defeitos e os parâmetros utilizados. Para um melhor entendimento, os corpos de prova serão seccionados de acordo com a figura 11 abaixo, sendo assim possível medirmos os parâmetros da morfologia do cordão, como reforço, penetração e largura, além da diluição, microdureza da zona fundida, da zona afetada termicamente e do metal de base.

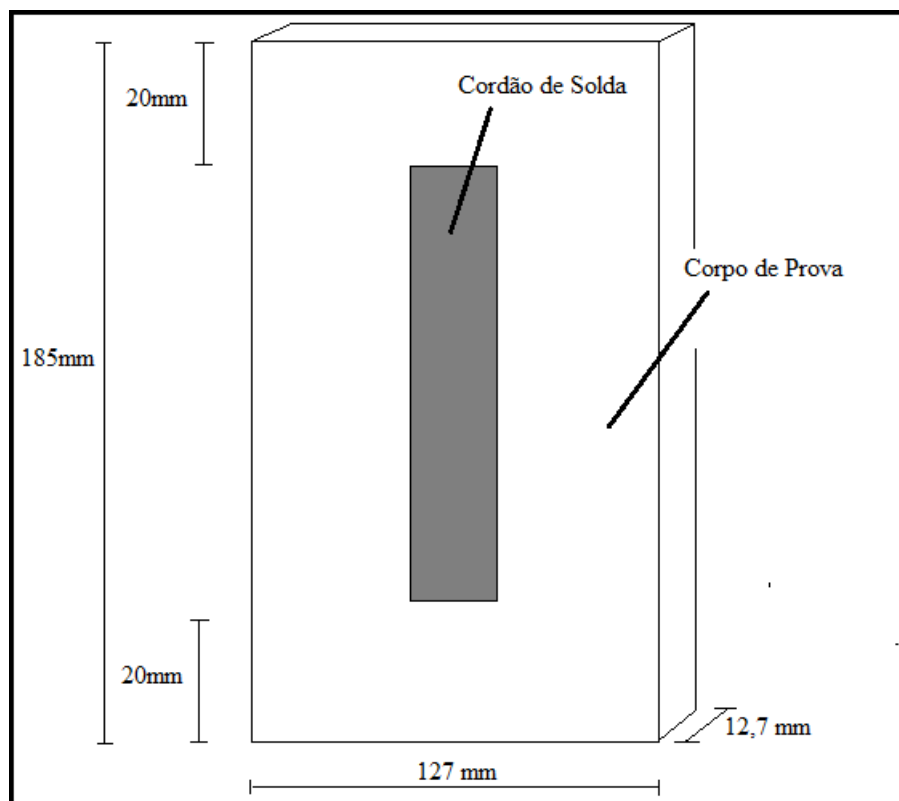


Figura 11 – Seccionamento dos Corpos de Prova.
Fonte: Autoria Própria

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o desenvolvimento experimental. Serão abordados os resultados obtidos através da soldagem, como as características da morfologia do cordão de solda, e os dados relativos às características da soldagem, como largura, reforço e penetração.

Também serão apresentadas estatísticas relacionadas às variáveis que interferem no processo de soldagem como corrente média, velocidade de soldagem e a distância bico de contato da peça (DBCP). Entre as combinações possíveis poderemos analisar os resultados mais coerentes com o processo de soldagem.

4.1 MORFOLOGIA DOS CORDÕES

Na análise deste estudo foram medidos parâmetros geométricos para os cordões de solda como diluição e penetração, largura, reforço, e também o Índice de Convexidade (IC), que nada mais é do que a relação reforço/largura. Primeiramente serão exibidos os resultados com a utilização da corrente convencional nas figuras 12, 13, 14, 15, 16, 17. Cada figura apresenta os parâmetros utilizados na soldagem, como corrente média (IM), velocidade de soldagem (VS) e distancia bico de contato e peça (DBCP).

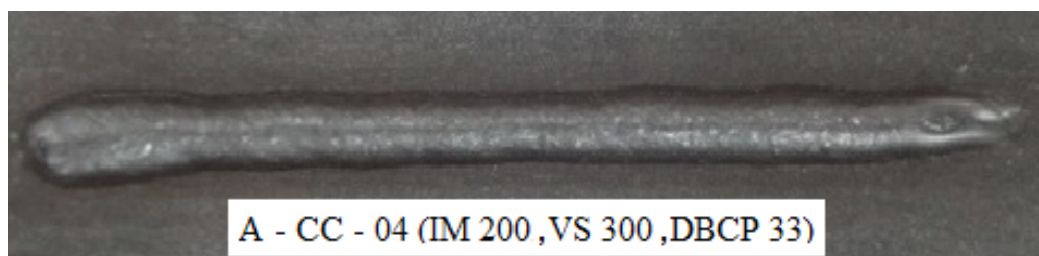


Figura 12 – Morfologia do Cordão 1
Fonte: Autoria Própria

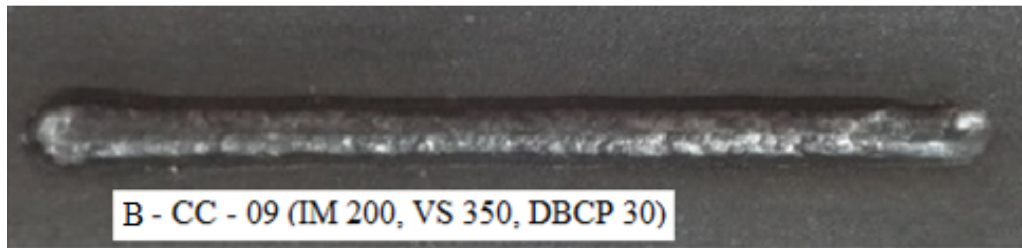


Figura 13– Morfologia do Cordão 2
Fonte: Autoria Própria

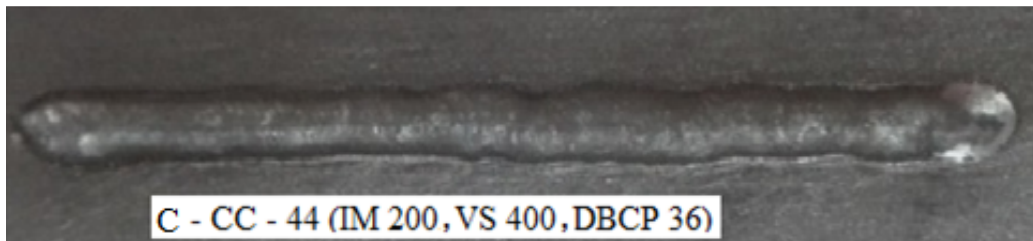


Figura 14 – Morfologia do Cordão 3
Fonte: Autoria Própria

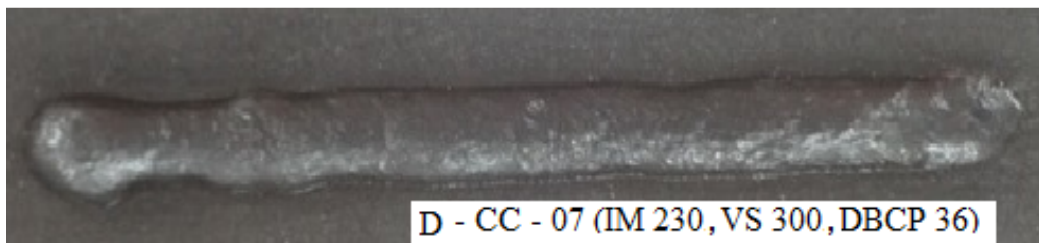


Figura 15 – Morfologia do Cordão 4
Fonte: Autoria Própria

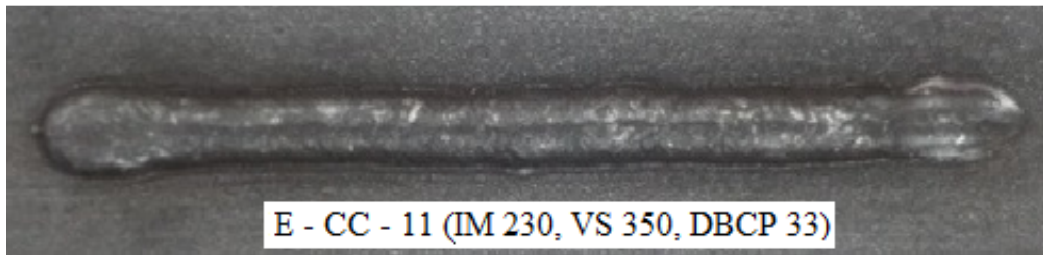


Figura 16 – Morfologia do Cordão 5
Fonte: Autorial Própria

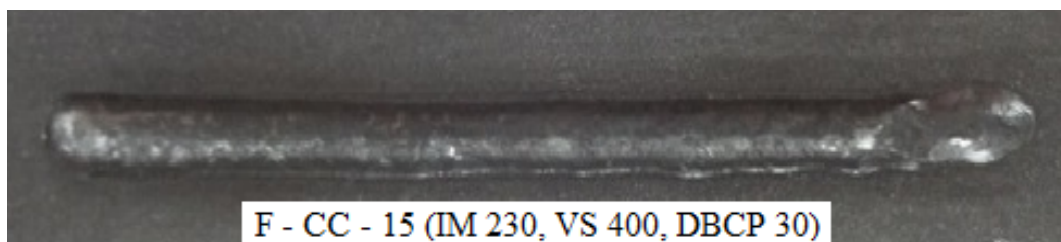


Figura 17 – Morfologia do Cordão 6
Fonte: Autorial Própria

Na tabela 7 abaixo serão apresentados dados relativos aos resultados obtidos da morfologia dos cordões para cada parâmetro utilizados para os ensaios de corrente convencional. Serão apresentados dados relativos à morfologia dos cordões, como corrente média, frequência de pulsação, velocidade de soldagem, DBCP, largura, reforço, penetração, ângulo do reforço e índice de convexidade. Na tabela 8 serão apresentados dados referentes aos resultados da ANOVA para as características econômicas da corrente convencional.

Tabela 7 – Resultados da morfologia do cordão para corrente convencional.

Corrente Convencional							
Corrente Média (A)	Frequência Pulsação (Hz)	Velocidade de Soldagem (mm/min)	DBCP (mm)	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Índice de Convexidade em % (Reforço/Largura)
200	0,00	300	33	9,00	4,20	2,49	46,41
200	0,00	350	30	8,48	3,98	1,86	46,93
200	0,00	400	36	9,38	3,55	2,11	38,10
230	0,00	300	36	13,51	3,29	2,00	23,36
230	0,00	350	33	10,54	3,19	1,94	30,26
230	0,00	400	30	10,28	3,45	2,57	33,64

Fonte: Autoria Própria

Tabela 8 – Resultados da ANOVA para as características geométricas da corrente convencional.

Corrente Convencional				
Fator	Largura	Reforço	Penetração	Índice de Convexidade
1 – Corrente Média (A)	0,000	0,000	0,021	0,000
2 – Velocidade de Soldagem (mm/min)	0,530	0,665	0,322	0,965
3 – DBCP (mm)	0,509	0,604	0,740	0,680
Interação 1 x 2	0,001	0,143	0,001	0,050
Interação 1 x 3	0,001	0,186	0,000	0,496
Interação 2 x 3	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: Autoria Própria

Nas figuras abaixo podemos analisar através de gráficos os resultados equivalentes a cada parâmetro utilizado. A figura 18 abaixo mostra os resultados referentes ao reforço. Na figura 19 podemos observar os resultados referentes à largura do cordão de solda. Enquanto que na figura 20 podemos analisar os resultados referentes à penetração.

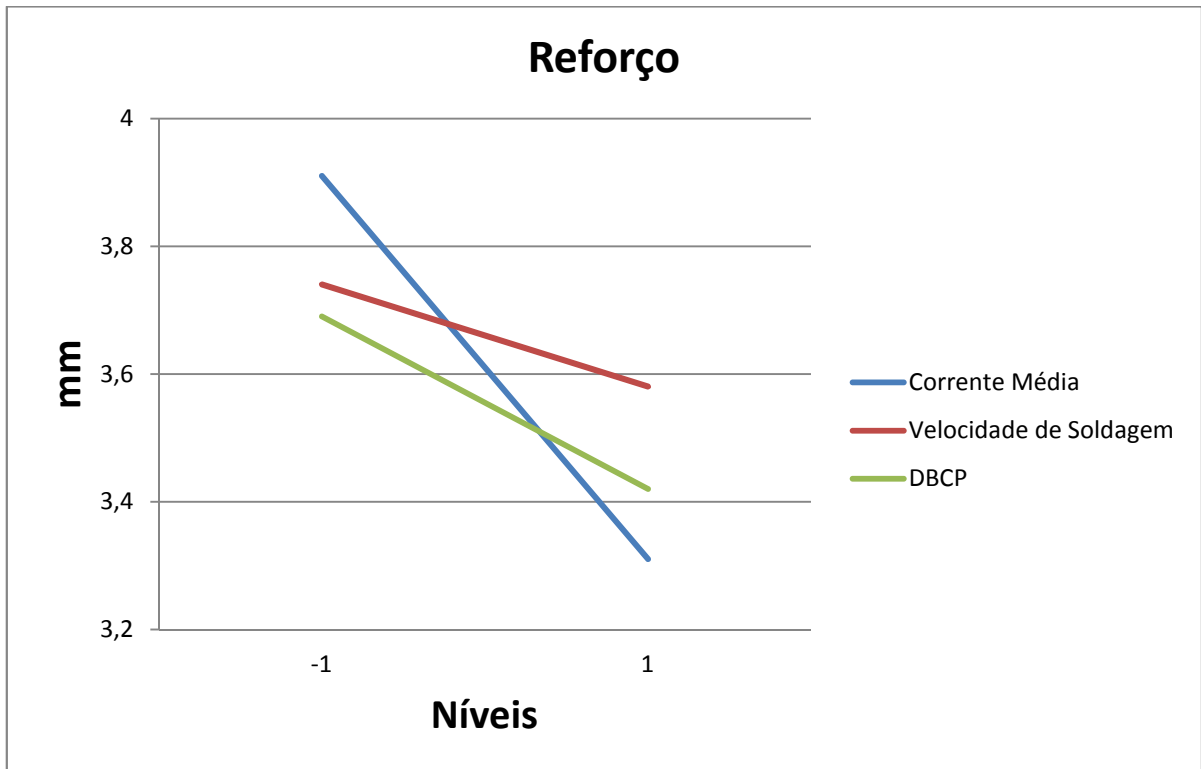


Figura 18 – Gráfico Relativo ao Reforço da Solda
Fonte: Autoria própria

Analisando os dados obtidos com relação ao reforço, podemos perceber facilmente através da figura 18 acima que conforme a corrente média aumenta, há uma diminuição considerável da necessidade de reforço do cordão de solda. Essa variação transitou de 3,91 mm para a corrente mais baixa, de 200 A, para 3,31 mm para a corrente mais alta, de 230A.

Podemos perceber também que o reforço sofre uma diminuição de acordo com o aumento da distância bico contato da peça, apesar dessa mudança ser menor do que a diminuição relacionada à corrente média.

O reforço variou de 3,90 mm (200A) para a distância bico contato da peça para 3,70 mm (230A). Já com relação à velocidade de soldagem o reforço sofreu um decréscimo muito pequeno da corrente de 200A para a corrente de 230A.

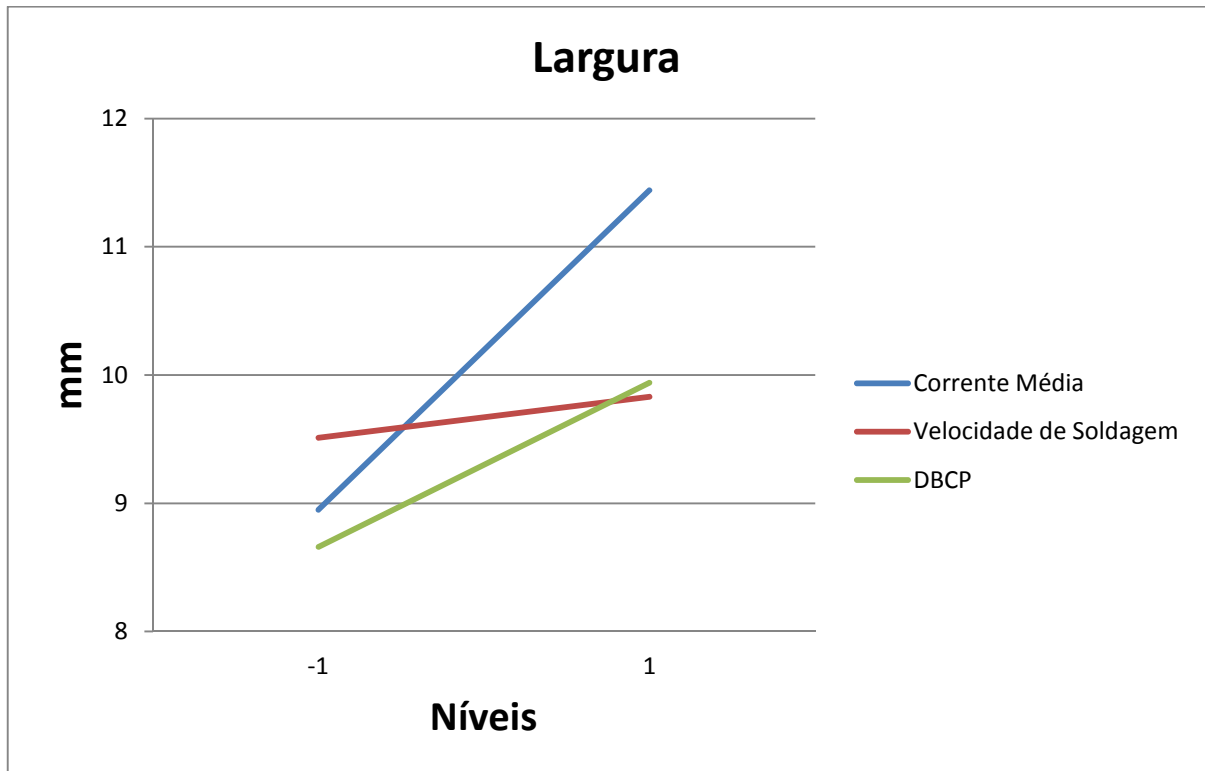


Figura 19 – Gráfico Relativo à Largura da Solda
Fonte: Autoria própria

Na análise da figura 19 acima, podemos perceber claramente a grande influência da corrente média na largura do cordão de solda. Quanto maior a corrente média, maior a largura deste cordão de solda. Com o aumento da corrente média a largura foi afetada substancialmente, variando de 8,95 mm com a corrente mais baixa (200A), para 11,44mm para a corrente mais alta (230A). Com relação ao aumento da velocidade de soldagem, quase não houve uma mudança significativa, pois passou de 9,51 mm para 9,83 mm. Quanto a distancia bico contato da peça houve um acréscimo acentuado na largura de 8,66 mm (200A) para 9,94 mm (230A).

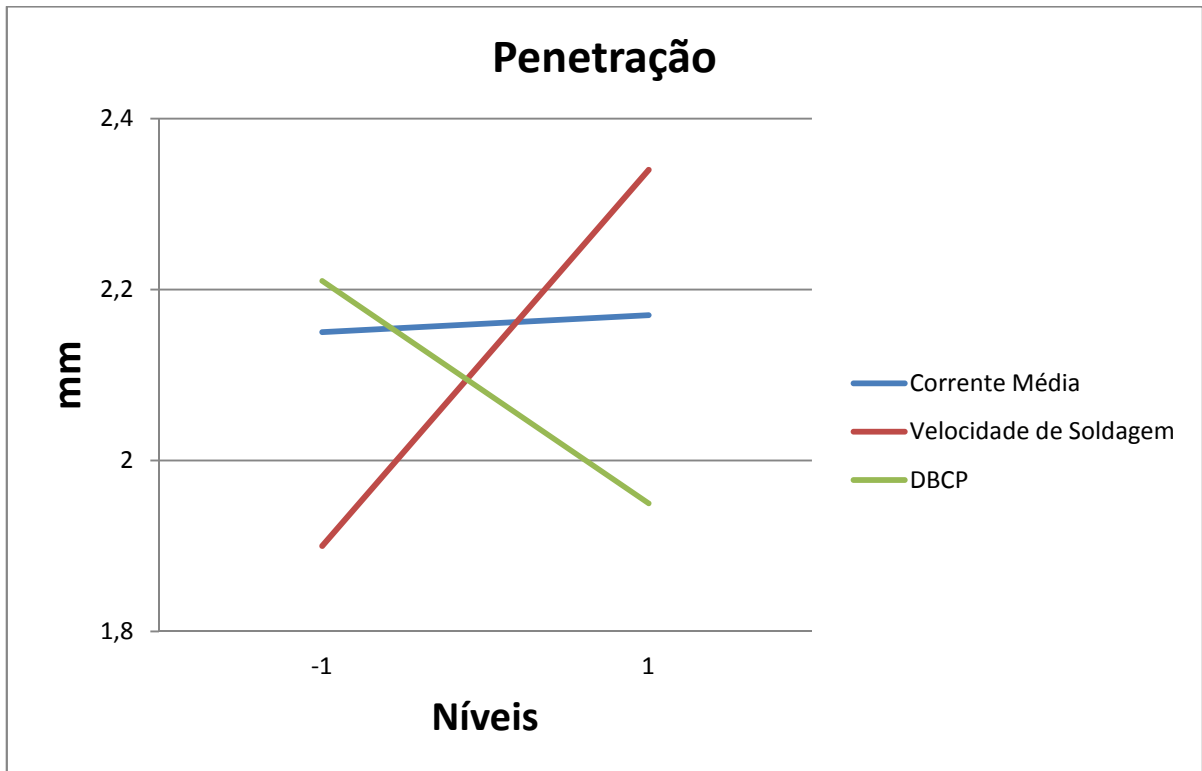


Figura 20 – Gráfico Relativo à Penetração da Solda
Fonte: Autoria própria

Por último, analisando a figura 20, podemos ver que os parâmetros afetaram a penetração muito mais devido a velocidade de soldagem do que na corrente média e DBCP.

Visto isto, a penetração variou de 1,90 mm para 2,34 mm segundo a velocidade de soldagem, porém sem muita alteração para os parâmetros corrente média.

Com relação ao DBCP, houve uma diminuição da penetração com o aumento dos parâmetros, diminuindo de 2,21 mm para a distância de 33 mm, para 1,95 mm com a distância de 36 mm. Apesar da variação do DBCP ser menor do que a variação da corrente média, ainda possui um valor considerável.

5 CONCLUSÃO

Conforme os resultados encontrados neste trabalho, podemos concluir que os parâmetros de solda influenciam substancialmente no desenvolvimento da soldagem e na morfologia dos cordões de solda. Através destes resultados é possível analisar as interferências destes parâmetros nos cordões de solda.

Como visto nas referências, é interessante lembrar que para soldagem de revestimento baixos valores de penetração e reforço, e alto valor de largura são interessantes, tanto economicamente quanto geometricamente e que o índice de convexidade (IC) deve ser o menor possível para uma eficiência adequada.

Portanto podemos perceber que conforme o valor da corrente média aumenta, há uma diminuição da necessidade de reforço e um aumento na largura e penetração do cordão solda. Podemos concluir assim que um aumento da corrente média afeta positivamente o cordão de solda, mesmo com o aumento da penetração o valores não se alteram substancialmente.

Com o aumento a velocidade de soldagem houve também uma diminuição do reforço e da largura do cordão de solda, enquanto que em relação à penetração não houve uma variação clara, uma vez que com o aumento de 300 mm/min para 350 mm/min houve um decréscimo no valor da penetração, enquanto que no aumento de 350 mm/min para 400 mm/min houve um aumento de penetração. Podemos concluir então que o a penetração não é substancialmente afetada pelo aumento da velocidade de soldagem, mas que largura e o reforço foram afetados de formas inversas. Enquanto a largura foi afetada negativamente, uma vez houve um decréscimo desta, o reforço foi afetado positivamente, apesar da variação positiva não ter sido muito considerável.

Com relação à distância bico de contato da peça (DBCP), foi observado que há um efeito positivo na morfologia do cordão de solda conforme os valores aumentam, uma vez que existe uma diminuição da necessidade de reforço, aumento da largura e decréscimo da penetração.

Após essas observações, é possível afirmar que os parâmetros que afetam positivamente a eficiência da soldagem de revestimento são um alto valor de corrente média e um alto valor da distância bico de contato da peça. Em relação à velocidade de soldagem podemos afirmar que um valor baixo de velocidade é benéfico para a morfologia do cordão.

De acordo com os ensaios realizados, o cordão de solda que apresentou os melhores índices foi o cordão de solda 4, pois apresentou as características citadas acima, como alto

valor de corrente média (230A) e de distância bico de contato da peça (36mm), e baixo valor de velocidade de soldagem (300mm/min). Esses valores são os extremos dos valores padrões utilizados nos ensaios. Também, tal cordão apresentou o menor valor de índice de convexidade, mostrando que possui a melhor eficiência dentre os cordões de solda analisados e também apresentou o melhor rendimento do processo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK. **HEAT TREATING**. VOLUME 4. 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK. **WELDING BRAZING AND SOLDERING**. VOLUME 6. 1994.

BARBOSA, R. P. **EFEITO DO TIPO DE METAL DE ADIÇÃO E DO APORTE TÉRMICO NA CORROSÃO SOB TENSÃO DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI-304**. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA-UFSC, 1995.

CALLISTER, W. **CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS: UMA INTRODUÇÃO**. 5ªED. SALT LAKE CITY: LTC, 1999.

CHIAVERINI, V. **AÇOS E FERROS FUNDIDOS**. 6ªED. SÃO PAULO: ABM, 1988.

CÔRREA, Celso A. **AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO APLICADO EM REVESTIMENTO PELO PROCESSO MIG PULSADO E CONVENCIONAL**. CAMPINAS, FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2000.

ESAB – **ARAMES TUBULARES**. Disponível em:

<http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901098rev1_apostilaaramestubulares_ok.pdf>. Acesso em 9 de Agosto. 2015.

ESAB – **METALURGIA DA SOLDAGEM**. Disponível em:

<<http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostilametalurgiasoldagem.pdf>>. Acesso em 1 de Agosto. 2015.

FIGUEIREDO, Kléber M. de. **TECNOLOGIA DA SOLDAGEM**. APOSTILA. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO MARANHÃO. DEPARTAMENTO DE MECÂNICA E MATERIAIS. SÃO LUÍS. 2005.

GERDAU – **BARRAS E PERFIS**. Disponível em:

<file:///C:/Users/Win7/Downloads/Cat%C3%A1logo%20Barras%20e%20Perfis.pdf>.

Acesso em 10 setembro. 2015

GONÇALVES, T; **METALOGRAFIA**. META – ESCOLA TÉCNICA DE FORMAÇÃO PROFISSIONAL. BELO HORIZONTE, 2010.

KOU, SINDO. **WELDING METALLURGY**. 2ªED. NEW JERSEY. WILEY INTERSCIENCE. 2002.

MACHADO, Ivan G., **SOLDAGEM E TÉCNICAS CONEXA: PROCESSOS**. PORTO ALEGRE. Editado pelo Autor. 1996.

MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Q. **SOLDAGEM: FUNDAMENTOS E TECNOLOGIA**. 3ªED. BELO HORIZONTE: UFMG, 2011.

MOREIRA, Hamilton V.; **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM MIG E DA MORFOLOGIA DO CORDÃO NO COMPORTAMENTO À FADIGA DE JUNTAS SOLDADAS DE UM EIXO TRASEIRO VEICULAR**. SÃO PAULO: 2008.

PAREDES, R S. C. **INTRODUÇÃO À METALURGIA DA SOLDAGEM**.

PAULI, Alberto B. de; ULIANA, Fernando S. **NOÇÕES BÁSICAS DE PROCESSOS DE SOLDAGEM E CORTE**. VITÓRIA: SENAI-ES. 1996.

PEREIRA, Aldo S.; BUSCHINELLI, Augusto J. A.; KEJELIN, Norton Z. **AValiação DA PERFURAÇÃO NA SOLDAGEM EM OPERAÇÃO PELO PROCESSO**

MIG/MAG DE DUTOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA ESPESSURA.
SOLDAGEM E INSPECAO, vol. 18, nº3. SÃO PAULO, 2013.

POLLACK, H; MATERIALS SCIENCE AND METALLURGY. 4ed, PRENTICE-HALL,
UPPER SADDLE RIVER, NJ, 1988.

**STARLING, C.M.D.; MODENESI, P.J.; BORBA, T.M.D. CARACTERIZAÇÃO DO
CORDÃO NA SOLDAGEM FCAW COM UM ARAME TUBULAR “METAL
CORED”.** SOLDAGEM E INSPEÇÃO, vol 16, nº3. SÃO PAULO, 2011.