

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC  
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA - PROACAD  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM  
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**AUGUSTO WANDERLIND**

**EFEITOS DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM GMAW COM  
CURVA CONTROLADA NA UNIÃO DOS AÇOS  
DISSIMILARES ASTM A572 GRAU 50 E ASTM A36**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Elídio Angioletto  
Coorientador: Prof. Dr. Felipe Fardin Grillo.

**CRICIÚMA  
2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

W245e Wanderlind, Augusto.

Efeitos dos parâmetros de soldagem GMAW com curva controlada na união dos aços dissimilares ASTM A572 grau 50 e ASTM A36 / Augusto Wanderlind. - 2018.

100 p. : il.; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2018.

Orientação: Elídio Angioletto.

Coorientação: Felipe Fardin Grillo.

1. Soldagem GMAW. 2. Soldagem MAG. 3. Aço - Estruturas. 4. Geometria de filete de solda. 5. *Surface Tension Transfer* (STT). I. Título.

CDD 23. ed. 671.52

Augusto Wanderlind

Efeitos dos parâmetros de soldagem GMAW com curva controlada na união dos aços dissimilares ASTM A572 grau 50 e ASTM A 36.

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 19 de dezembro de 2017.

**Banca Examinadora:**




**Profª Drª Kétner Bendo Demétrio**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



**Prof. Dr. Eduardo Junca**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



**Prof. Dr. Marcio Roberto da Rocha**

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC



*Aos que amo.*



## AGRADECIMENTOS

À Deus pela saúde do corpo, mente e espírito.

Aos meus pais, Jucemar A. Wanderlind e Fátima T. Cesconetto Wanderlind, que sempre estiveram dispostos a me ajudar em qualquer que fosse a situação. Desejo viver de maneira a dar orgulho a eles.

Ao meu irmão, André Wanderlind, por confiar e apostar em minhas ideias. Desde jovens temos uma amizade espiritual.

À minha namorada, Tainá Francisco Pirola, pelo carinho, apoio e compreensão. Os diálogos resolveram tantas aflições, espero ajuda-la em suas batalhas mais difíceis.

À UNESC pela estrutura e recursos disponibilizados.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Elídio Angioletto, pela oportunidade, confiança e incentivo.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Felipe Fardin Grillo, pelo conhecimento repassado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais – PPGCEM/ UNESC.

À Vivian, secretaria do PPGCEM, pelas valiosas e esclarecedoras informações.

Aos meus colegas e amigos de laboratório e do curso de Engenharia Civil.





“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos”.

(Marcel Proust)



## RESUMO

A ligação soldada é de suma importância em estruturas de aço, necessitam de projetos estruturais e ajustes de processamento, para obter resistência mecânica e durabilidade. O processo de soldagem vem utilizando recursos eletrônicos para o controle das curvas de corrente e tensão, fato que faz surgir novos parâmetros de controle. Estes parâmetros possuem ranges limitados pela espessura das chapas a serem unidas, tipologia do aço utilizado e transferência metálica adotada. Assim, foram escolhidos para este estudo os aços ASTM A572 Gr50 e ASTM A36 com espessuras diferentes, pois possuem utilização expressiva em obras civis e industriais. O intuito deste estudo é otimizar a utilização do processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) MAG (*Metal Active Gas*) com curva controlada e transferência metálica por STT (*Surface Tension Transfer*). Para isto, foi proposto um planejamento experimental fatorial  $2^3$  completo, com ponto central em réplica, avaliando a velocidade de alimentação ( $V_a$ ), o foco da coluna do arco elétrico (FC) e a amplitude entre a corrente de pico e a corrente de base (APB). Foram realizados testes experimentais, a fim de mensurar a energia de soldagem, a eficiência de deposição, a geometria do cordão de solda, a resistência mecânica, bem como analisar a microestrutura formada na região da solda, o potencial de corrosão e o perfil de dureza Vickers passando pelos metais de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA), zona fundida (ZF) e metal de solda (MS). Todos os testes foram realizados em corpos de prova cruciformes, para evitar a interferência na interpretação dos resultados, por diferenças na transferência de calor. Os resultados obtidos apontam um valor ótimo de energia de soldagem, que promove baixa alteração microestrutural, com poucas alterações no perfil de microdureza e uma geometria de filete de solda sem defeitos e com previsão, através de modelo matemático, da área resistente.

Palavras chave: soldagem GMAW, aço, STT, microestrutura, geometria do filete de solda.



## ABSTRACT

The welded connection is of paramount importance in steel structures, requiring structural designs and processing adjustments, for mechanical strength and durability. The welding process has been using electronic resources to control current and voltage curves, a fact that gives rise to new control parameters. These parameters have ranges limited by the thickness of the plates to be joined, the type of steel used and the metallic transfer adopted. Thus, ASTM A572 Gr50 and ASTM A36 steels with different thicknesses were chosen for this study because they have significant use in civil and industrial works. The purpose of this study is to optimize the use of GMAW (Gas Metal Arc Welding) MAG (Metal Active Gas) welding process with controlled curve and metallic transfer by STT (Surface Tension Transfer). For this, a  $2^3$  factorial experimental design complete with a central point in replica was proposed, evaluating the feed velocity ( $V_a$ ), the focus of the electric arc column (FC) and the amplitude between the peak current and the base current (APB). Experimental tests were carried out to measure welding energy, deposition efficiency, weld bead geometry, mechanical strength, to analyze the microstructure formed by welding, the corrosion potential, microstructure analysis and the Vickers hardness profile was performed through fusion zone (ZF), weld metal (MS) and the base metal (MB). All tests were performed on cruciform specimens to avoid interference in the interpretation of the results, due to differences in heat transfer. The results show an optimum value of welding energy, which promotes low microstructural change, with few changes in the microhardness profile and a weld fillet geometry without defects and with predicted resistant area.

Keywords: GMAW welding, steel, STT, microstructure, weld fillet geometry.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do limite de escoamento e da tenacidade utilizando laminação controlada e mecanismos de aumento de resistência distintos. ....	33
Figura 2 – Curva típica do processo TMCP. ....	33
Figura 3 – Comparação microestrutural entre a laminação convencional (a) e a laminação utilizando TMCP (b). ....	34
Figura 4 – Quantidade de publicações científicas relacionadas ao termo <i>Structural Steel</i> , de 2009 a 2017. ....	35
Figura 5 – Relação entre tamanho de grão e tensão de escoamento. ....	38
Figura 6 – Microestrutura do aço ASTM A36 com ataque nital 3%. ....	39
Figura 7 – Efeito da precipitação do Nióbio em cada etapa do processo de laminação com TMCP. ....	40
Figura 8 – Microestrutura aço ASTM A572 grau 50 com ataque nital 3%. ....	41
Figura 9 – Ilustração do processo GMAW. ....	43
Figura 10 – Tipos de transferência metálica (a) curto-circuito, (b) globular e (c) spray. ....	43
Figura 11 – Curvas típicas de velocidade alimentação em função da corrente de soldagem. ....	44
Figura 12 – Representação esquemática da geometria do cordão de solda para diferentes tipos de gases de proteção. ....	45
Figura 13 – Representação esquemática das curvas típicas de corrente e tensão em função do tempo e o modo de transferência. ....	46
Figura 14 – Representação esquemática do conceito das curvas típicas de corrente e tensão em função do tempo controlados eletronicamente. ....	47
Figura 15 – Representação esquemática da curva controlada pelo modo STT e o modo de transferência. ....	48
Figura 16 – Fluxograma da caracterização e soldagem dos materiais. ....	51
Figura 17 – Fluxogramas da realização dos ensaios e análise dos dados. ....	52
Figura 18 - Detalhe do cordão de solda de filete. ....	55
Figura 19 – Representação esquemática da alteração no processo de soldagem causada pelo parâmetro FC. ....	56
Figura 20 – Representação esquemática da alteração no processo de soldagem causada pelo parâmetro APB. ....	56
Figura 21 – Desenho do espécime. ....	57
Figura 22 - Desenho do corpo de prova curciforme. ....	58





Figura 23 – Representação da geometria do cordão de solda no corpo de prova cruciforme. ....	61
Figura 24 – Locais para análise microestrutural.....	62
Figura 25 – Desenho do levantamento do perfil de microdureza.....	63
Figura 26 – Corpo de prova em ensaio de resistência à tração.....	64
Figura 27 – Área submetida à corrosão eletroquímica no corpo de prova cruciforme. ....	65
Figura 28 – Ensaio de corrosão eletroquímica. ....	65
Figura 29 – Representação gráfica da média da energia de soldagem em cada caso. ....	68
Figura 30 – Valores previstos versus valores observados para a variável energia de soldagem. ....	69
Figura 31 – <i>Box Plot</i> da massa de respingos agrupada em função da velocidade de alimentação ( $V_a$ ). ....	71
Figura 32 – Cordão de solda do caso 1 (a) e cordão de solda do caso 6 (b). ....	72
Figura 33 – Gráfico das dimensões em cada caso organizado em ordem crescente em relação a energia de soldagem. ....	74
Figura 34 – Gráfico de dispersão das dimensões geométricas do cordão em função da energia de soldagem.....	75
Figura 35 - Valores previstos versus valores observados para a variável garganta real. ....	76
Figura 36 – Padrão observado de alteração microestrutural na região soldada.....	78
Figura 37 - <i>Box Plot</i> da dureza agrupada nos casos .....	81
Figura 38 – Ruptura na interface da solda com o metal de base ASTM A36.....	82
Figura 39 – Taxa de corrosão em cada caso.....	83



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis e valores típicos para o processo TMCP. ....	34
Tabela 2 - Composição química para classificações dos aços estruturais de acordo com a NBR 7007:2016. ....	36
Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos aços estruturais de acordo com a NBR 7007:2016. ....	37
Tabela 4 – Composição química dos aços utilizados. ....	53
Tabela 5 – Planejamento fatorial $2^3$ completo com ponto central em réplica. ....	59
Tabela 6 – Significado das identificações na análise microestrutural. ..	62
Tabela 7 – Energia de soldagem e energia de soldagem por cordão. ....	67
Tabela 8 – Massa depositada e massa de respingos para cada caso. ....	70
Tabela 9 – Dimensões do cordão em cada caso. ....	73
Tabela 10 – Tensões máximas e local da ruptura. ....	82
Tabela 11 – Resultados da taxa de corrosão em cada caso. ....	83



## ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCEM – Associação Brasileira da Construção Metálica  
AISC – *American Institute of Steel Construction*  
APB – Amplitude entre a corrente de pico e a corrente de base  
ARBL – Alta Resistência Baixa Liga  
ASTM – *American Society for Testing and Materials*  
AWS – *American Welding Society*  
CBCA – Centro Brasileiro da Construção em Aço  
CO<sub>2</sub> – Gás carbônico  
CSN – Companhia Siderúrgica Nacional  
DBCP – Distância bico contato peça  
FC – Foco da coluna do arco elétrico  
GMAW – *Gas Metal Arc Welding*  
GR – Garganta real  
HSLA – *High Strength Low Alloy Steel*  
LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design*  
MAG – *Metal Active Gas*  
MB – Metal de base  
MIG – *Metal Inert Gas*  
MS – Metal de solda  
NBR – Norma Brasileira  
O<sub>2</sub> – Gás Oxigênio  
STT – *Surface Tension Transfer*  
TMCP – *Thermomechanical Control Process*  
Va – Velocidade de alimentação  
Vs – Velocidade de soldagem  
ZF – Zona fundida  
ZGG – Zona de grãos grosseiros  
ZTA – Zona termicamente afetada



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>27</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>29</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	29
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	29
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>31</b>
3.1 aços estruturais .....	31
<b>3.1.1 Histórico do processo de aços estruturais</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1.2 Aço ASTM A36</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1.3 Aço ASTM A572 grau 50</b> .....	<b>39</b>
3.2 Soldagem Gmaw .....	42
<b>3.2.1 Soldagem MAG com transferência metálica por curto-circuito</b> .....	<b>45</b>
<b>3.2.2 Soldagem MAG com curva controlada e transferência metálica por <i>surface tension transfer</i> (STT)</b> .....	<b>46</b>
<b>3.2.3 Energia de soldagem</b> .....	<b>48</b>
<b>3.2.4 Geometria da solda</b> .....	<b>49</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>51</b>
4.1 Materiais.....	52
4.2 Métodos.....	53
<b>4.2.1 Dimensionamento da solda</b> .....	<b>54</b>
<b>4.2.2 Soldagem</b> .....	<b>54</b>
<b>4.2.3 Obtenção dos corpos de prova</b> .....	<b>57</b>
<b>4.2.4 Planejamento Experimental</b> .....	<b>58</b>
<b>4.2.5 Energia de soldagem</b> .....	<b>59</b>
<b>4.2.6 Eficiência de deposição</b> .....	<b>60</b>
<b>4.2.7 Geometria do cordão da solda</b> .....	<b>61</b>
<b>4.2.8 Caracterização da região soldada</b> .....	<b>62</b>
<b>4.2.9 Resistência à tração</b> .....	<b>63</b>
<b>4.2.10 Potencial de corrosão</b> .....	<b>64</b>
<b>5 Resultados e discussões</b> .....	<b>67</b>
5.1 ENERGIA DE SOLDAGEM.....	67
5.2 eficiência de deposição.....	70
5.3 geometria do cordão .....	71
<b>5.3.1 Aspecto visual</b> .....	<b>71</b>
<b>5.3.2 Dimensões das pernas e garganta real</b> .....	<b>72</b>
5.4 microscopia ótica.....	76
<b>5.4.1 Fases formadas</b> .....	<b>76</b>
5.5 microdureza.....	80
5.6 resistência à tração .....	81





5.7 corrosão eletroquímica .....	82
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>85</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A construção metálica no Brasil vem crescendo exponencialmente a partir dos anos 2000, é o que mostra a 5ª edição da pesquisa “Perfil dos Fabricantes de Estruturas de Aço”. De acordo com a pesquisa, as empresas do setor empregaram aproximadamente 26,2 mil trabalhadores para produzir 694 mil toneladas de estruturas em aço no ano de 2016, o que resultou em um faturamento de 4,24 bilhões de reais. Classificando as estruturas fabricadas em aço no mesmo ano, 46% são estruturas industriais, 32% em infraestrutura, 18% comercial e 4% residencial. (CBCA, 2017).

A sustentabilidade das estruturas construídas em aço é avaliada no Brasil através do sistema de classificação de construções verdes, conhecido como *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED). Essa metodologia foi desenvolvida pelo conselho de edifícios verdes dos Estados Unidos da América e utilizada como ferramenta classificatória para a sustentabilidade de suas construções, inclusive na Europa. De acordo com os critérios LEED 2009 V4, ao aço estrutural é atribuído o crédito máximo na classificação geral de uma estrutura, devido ao seu conteúdo reciclável, que pode chegar a 98% em aços planos e perfis e, a 65% em armações para concreto armado (AISC, 2017).

Um dos fatores que devem ser considerados na construção mecânica ou civil, é a otimização das propriedades dos materiais utilizados, de modo a aumentar a eficiência no atendimento destas normativas. Um exemplo é o desenvolvimento dos aços microligados, Silvestre (2012) mostrou que perfis fabricados em aço microligado com Nióbio (Nb), que confere maior resistência mecânica e mantêm a ductilidade e a soldabilidade, no caso o aço ASTM A572, proporcionou uma redução de 22% no total de aço consumido no projeto de um galpão industrial em comparação a utilização do aço ASTM A36, que é o mais utilizado no Brasil para essa finalidade.

Para Amaral (2016), os aços estruturais microligados são uma solução para o dimensionamento de estruturas mais leves, promovendo menor utilização de material e redução de custos das obras em diversos setores, como por exemplo, no gasto com combustíveis para transportar as peças estruturais, que estão com preços cada vez mais elevados.

No que tange a construção das estruturas metálicas, um dos fatores que também contribuem para a sua utilização é a rapidez na sua montagem, através de processos de união que envolvem principalmente solda elétrica e

parafusos, comumente empregadas em conjunto. A soldagem tem sido amplamente utilizada na produção e montagem de componentes estruturais e é uma das formas de ligação mais importantes para a estrutura de aço. Seu desempenho frente a fadiga e as propriedades mecânicas das juntas soldadas são afetadas por inúmeros fatores, que incluem defeitos iniciais, características geométricas de solda, variação de resistência, concentração de tensões e tensões residuais. Esses fatores determinam a vida útil das estruturas soldadas, trazendo a necessidade de reparos (XU, 2016).

Para Xu (2016), as estruturas soldadas de aço que atuam em condições de ambiente agressivo à corrosão, tais como edifícios industriais, pontes e estruturas marinhas, tem como principal ameaça, contra a confiabilidade e a segurança, os danos por fratura devido à corrosão grave em zonas de solda.

Um dos processos comumente utilizados é a soldagem com arame protegido por gás, conhecido por MIG (*metal inert gas*) e MAG (*metal active gas*), que se enquadram no processo de soldagem chamado GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). As vantagens deste processo e os avanços tecnológicos no campo da eletrônica, levaram ao desenvolvimento de novos parâmetros. Estes parâmetros permitem, entre outras vantagens, melhorias nas propriedades físicas do cordão de solda em comparação ao modo convencional, melhor aspecto da geometria do cordão e permite menores aportes térmicos para uma mesma geometria do cordão de solda (BARRA, 2003).

Zeng (2017), aponta que diversas pesquisas, focadas na otimização dos parâmetros de soldagem com corrente controlada, trouxeram importantes conceitos, como o tempo de permanência na corrente de base, que promove uma menor formação de respingos. A otimização dos parâmetros de uma curva controlada, pode favorecer a diminuição de respingos, menor consumo de energia ou ainda, implicar na penetração da solda.

Este trabalho teve por finalidade estudar a soldagem MAG com curva controlada e transferência metálica por STT (*Surface Tension Transfer*) entre os aços dissimilares ASTM A572 grau 50 e ASTM A36. Ele abrange a influência dos parâmetros de soldagem em junta do tipo filete em passe único. Os parâmetros escolhidos como variáveis foram o FC e APB, que interferem diretamente no foco do arco elétrico e na energia de soldagem, afetam a penetração da solda e a área de deposição do metal de solda. A velocidade de alimentação foi variada para se obter o nível máximo e mínimo de energia de soldagem, favorecendo a modelagem matemática para a otimização do processo.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência dos parâmetros de soldagem MAG com curva controlada na geometria e microestrutura da região soldada entre os aços estruturais dissimilares ASTM A36 e ASTM A572 grau 50.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a interferência dos parâmetros de soldagem na eficiência de deposição;
  - Avaliar o efeito da variação da energia de soldagem sobre as microestruturas na região de solda;
  - Relacionar a variação da microestrutura na região soldada e o perfil de dureza;
  - Analisar a influência dos parâmetros de soldagem na formação da geometria do cordão de solda e avaliar seu aspecto frente a resistência mecânica e ao projeto de ligações soldadas;
  - Verificar a influência da geometria e penetração da solda na resistência à tração de corpos de prova cruciformes;
  - Avaliar os efeitos dos parâmetros de soldagem na suscetibilidade à corrosão.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, descreve-se o histórico do processamento de aços estruturais, bem como a utilização dos que são empregados na construção de grandes estruturas. Além disso, foram descritos os materiais e processos de fabricação que são objetos de estudo nesta dissertação, especialmente os aços ASTM A36 e ASTM A572 grau 50 e a soldagem MAG com curva controlada, dando foco aos parâmetros de soldagem e suas implicações na microestrutura, geometria do cordão de soldagem e eficiência de deposição. Também é apresentado, os aspectos de corrosão para os aços de baixo carbono.

#### 3.1 AÇOS ESTRUTURAIS

##### 3.1.1 Histórico do processo de aços estruturais

Os aços com qualidade estrutural começaram a ser produzidos em larga escala após a criação do processo Bessemer, que foi patenteado pelo inglês Henry Bessemer em 1856. Em 1867, os irmãos Martin acrescentaram melhorias no processo de fabricação, aumentando a qualidade e mantendo a competitividade nos custos, patenteando o processo Siemens-Martin. O aço passou então a substituir o ferro fundido e o forjado na indústria de construção civil e mecânica (PFEIL, 2009).

Até meados do século XX as construções de aço utilizavam, em sua maior parte, o material com resistência a ruptura ou limite último de resistência de 370 MPa. A partir de 1950, os aços com maior resistência difundiram-se, possibilitando recordes de vãos na construção civil e arquiteturas mais arrojadas e competitivas (PFEIL, 2009).

Nos anos 70, a indústria automobilística criou a necessidade de se produzir automóveis mais leves, por conta do aumento dos preços dos combustíveis. Em 1975, foram desenvolvidos os aços denominados *High Strength Low Alloy* (HSLA), em português, aços de Alta Resistência Baixa Liga (ARBL). Estes aços, contém micro adições de Nb, Ti e V, e podem ser tratados termicamente. Estes aços possuem qualidade estrutural e maiores limites de escoamento e limite último de resistência, podendo-se fabricar peças com redução de material e, conseqüentemente, peso. As indústrias da construção civil e naval, rapidamente implementaram seu uso (GORNİ, 2008).

No Brasil, a indústria siderúrgica foi implantada após a Segunda Guerra Mundial, com a construção da Usina Presidente Vargas da CSN – Companhia Siderúrgica Nacional. Esta implementação foi influenciada pelos Estados Unidos da América, e como herança o Brasil tomou como base para a criação das normas de produção metalúrgica e dimensionamento de estruturas de aço, as normas norte americanas ASTM (*American Society of Testing Materials*) e AISC (*American Institute of Steel Construction*) (PFEIL, 2009). Hoje o território brasileiro possui em seu parque siderúrgico, 30 usinas com capacidade de fabricar produtos para estruturas de grande porte distribuídas em 10 estados, levando o país a ocupar a 8ª posição no ranking da produção mundial (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2015).

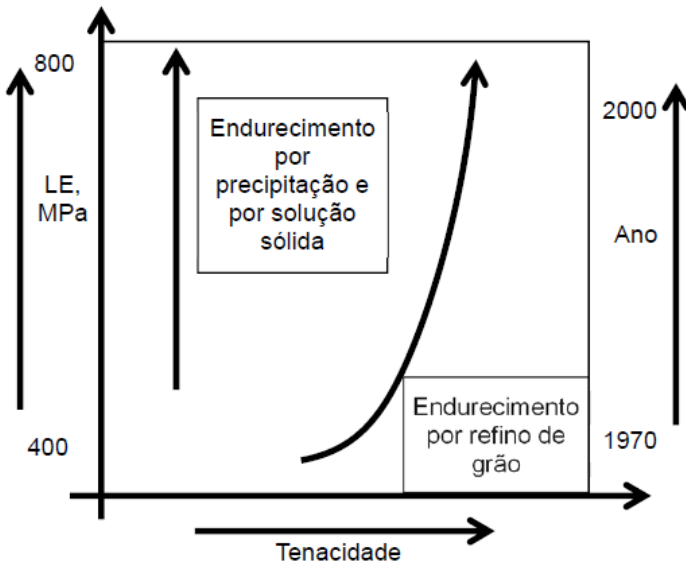
De acordo com a norma de projeto de estruturas de aço NBR 8800:2008, os aços com qualidade estrutural devem possuir tensão de escoamento ( $f_y$ ) de no máximo 450 MPa, relação entre limite último de resistência ( $f_u$ ) e limite de escoamento ( $f_y$ ) não inferior a 1,18. Devem ser classificados quanto às propriedades mecânicas, soldabilidade e análise química de acordo com a NBR 7007:2016. Esta norma estabelece requisitos para produtos de aço-carbono ou microligados, laminados a quente, que se empregam em estruturas metálicas (parafusadas, rebetadas ou soldadas).

Com a laminação controlada, rotas de fabricação de aços estruturais cada vez mais resistentes têm sido criadas, são chamados de aços fabricados a partir do processo TMCP (*Thermomechanical Control Process*). Podem ser utilizados como mecanismos de aumento de resistência, o controle da solução sólida, a precipitação de elementos ou o refino do grão (BARBOSA, 2013). Scotti et al. (2014) complementa que estes aços estruturais, necessitam de rígido controle termomecânico para a produção de uma microestrutura fina e que as adições de elementos de liga, interferem significativamente no controle do processo.

Na figura 1, é apresentado a evolução do limite de escoamento e da tenacidade, desde 1970 até o ano 2000 utilizando a laminação controlada, em aços estruturais microligados. Já na figura 2, uma curva típica do processo TMCP é ilustrada e na tabela 1, são apresentadas as variáveis e valores típicos do processo.

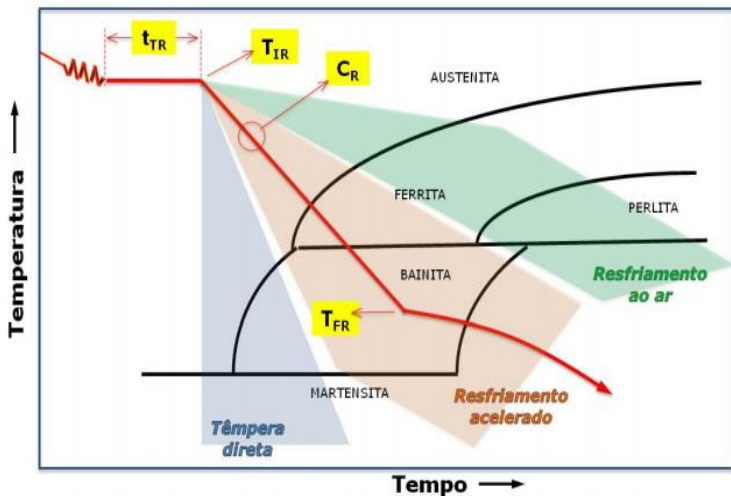


Figura 1 - Evolução do limite de escoamento e da tenacidade utilizando laminação controlada e mecanismos de aumento de resistência distintos.



Fonte: Barbosa, 2013.

Figura 2 – Curva típica do processo TMCP.



Fonte: Turani, 2010.

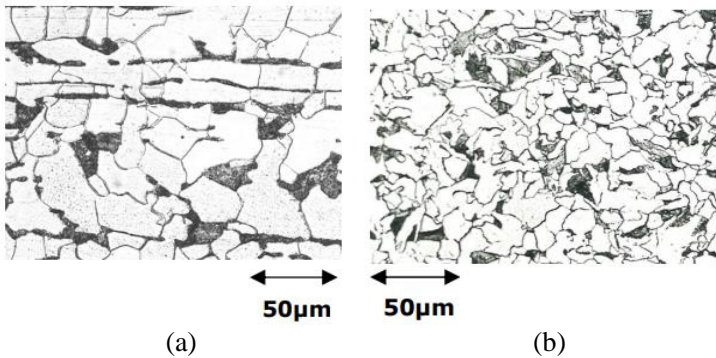
Tabela 1 – Variáveis e valores típicos para o processo TMCP.

Variáveis	Valores Típicos	
	Resfriamento acelerado	Têmpera direta
$t_{TR}$	< 20 s	< 20 s
$T_{IR}$	850 a 700 °C	950 a 850 °C
$C_R$	5 a 40 °C/s	15 a 60 °C/s
$T_{FR}$	650 a 350 °C	< 200 °C

Fonte: Turani, 2010, adaptado pelo autor, 2017.

Na figura 3, é apresentada uma comparação da microestrutura do mesmo aço microligado, entre a laminação convencional e a laminação utilizando TMCP, onde pode ser observado um maior refino da microestrutura.

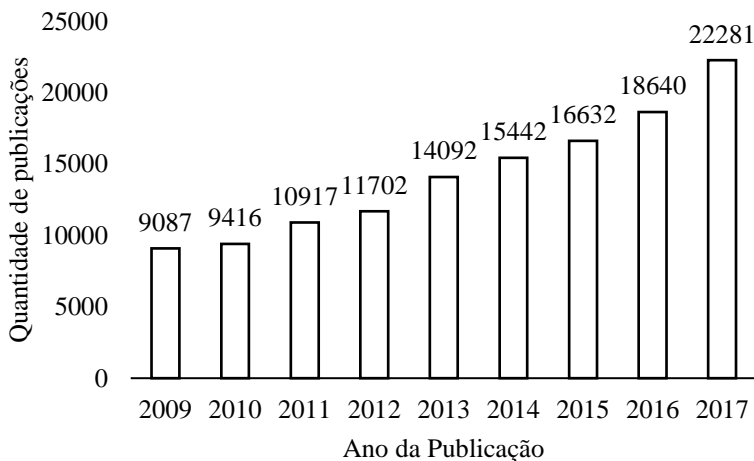
Figura 3 – Comparação microestrutural entre a laminação convencional (a) e a laminação utilizando TMCP (b).



Fonte: Turani, 2010.

Na base de dados ScienceDirect que reúne aproximadamente 2500 revistas científicas publicadas pela Elsevier, é possível apontar a quantidade de publicações relacionadas ao termo *Structural Steel*, que são as pesquisas relacionadas aos aços estruturais, seja em processamento ou desempenho. A figura 4 apresenta os dados dos anos de 2009 até 2017.

Figura 4 – Quantidade de publicações científicas relacionadas ao termo *Structural Steel*, de 2009 a 2017.



Fonte: Do autor, 2017.

### 3.1.2 Aço ASTM A36

O aço ASTM A36 é o aço estrutural mais comumente utilizado, seja no setor automotivo, nas construções de edifícios residenciais ou comerciais, na construção de galpões, estruturas de apoio ou ainda na fabricação de tubos. É normalmente empregado em conjunto com outras tipologias de aço, como no caso de tabuleiros de pontes e edifícios de múltiplos andares. As cantoneiras utilizadas como elementos de ligação e chapas de *gusset*, são largamente utilizadas neste tipo de aço, o que pode levar ao projeto de soldagem entre aços dissimilares (BAJARES, 2015).

Este aço é classificado pela NBR 7007:2016 através das tabelas 1 e 3 da norma, tabelas 2 e 3 mostradas a seguir, como um aço MR 250, em que a sigla MR significa média resistência e o número 250 é o valor mínimo requerido de tensão de escoamento em MPa.

A tabela 2 refere-se aos limites e elementos necessários na composição química, a fim de se obter a laminação dos produtos estruturais com o mínimo de defeitos, com as propriedades desejadas na

especificação de sua utilização e com confiabilidade ao longo de sua vida útil.

Tabela 2 - Composição química para classificações dos aços estruturais de acordo com a NBR 7007:2016.

Grau → Elementos ↓	MR 250	AR 350 <sup>1</sup>	AR 350 COR <sup>1</sup>	AR 415 <sup>1</sup>
C (%)	0,23 Máx.	0,23 Máx.	0,20 Máx.	0,26 Máx.
Mn <sup>2</sup> (%)	- <sup>3</sup>	0,05 a 1,35	0,05 a 1,35.	0,05 a 1,35
Si (%)	0,05 a 0,40	0,10 a 0,40	0,15 a 0,55	0,10 a 0,40
P (%)	0,040 Máx.	0,040 Máx.	0,040 Máx.	0,040 Máx.
S (%)	0,050 Máx.	0,050 Máx.	0,050 Máx.	0,050 Máx.
Cu (%)	0,35 Máx.	0,35 Máx.	0,25 a 0,50	0,35 Máx.
V (%)	- <sup>3</sup>	0,050 Máx.	0,050 Máx.	0,050 Máx.
Nb (%)	- <sup>3</sup>	0,050 Máx.	0,050 Máx.	0,050 Máx.
Cr (%)	0,35 Máx.	0,35 Máx.	0,40 a 0,70	0,35 Máx.
Ni (%)	0,35 Máx.	0,35 Máx.	0,50 Máx.	0,35 Máx.
Mo (%)	0,05 Máx.	0,05 Máx.	0,10 Máx.	0,05 Máx.

<sup>1</sup> Nb + V ≥ 0,010%.

<sup>2</sup> Para cada redução de 0,01% no teor máximo de carbono especificado, um aumento de 0,06% no teor de manganês acima do especificado será permitido até o limite máximo de 1,50%.

<sup>3</sup> Não especificado.

Fonte: NBR 7007:2016 Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral.

A tabela 3 apresenta os limites e intervalos das propriedades mecânicas mais relevantes, exigidas em cada classe.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos aços estruturais de acordo com a NBR 7007:2016.

Grau	Limite de escoamento mínimo (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento Mínimo após ruptura (%)
MR 250	250	400 a 560	20.0
AR 350	350	Mín. 450	18.0
AR 350 COR	350	Mín. 485	18.0
AR 415	415	Mín. 520	16.0

Fonte: NBR 7007:2016 Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral.

O tamanho de grão é essencial para o aumento da resistência mecânica, pode ser explicado e estimado através da Equação 1, chamada de equação de Hall-Petch (SUN et al, 2016).

$$\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2} \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_y$  = Tensão de escoamento em MPa;

$\sigma_0$  = Uma constante do material relacionada ao tipo do cristal;

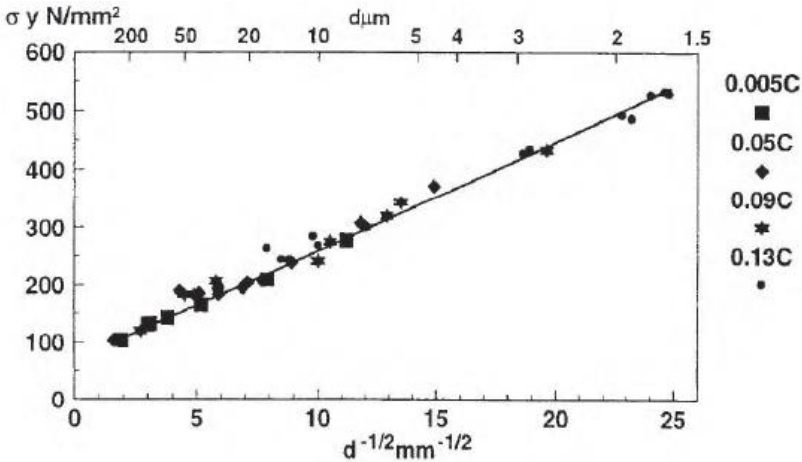
k = Uma constante;

d = diâmetro do grão em  $\mu\text{m}$ .

Através da equação é possível afirmar que, quanto menor o diâmetro do grão, maior será a tensão de escoamento do material.

Morrison (2000), apresentou dados experimentais da relação entre a tensão de escoamento e o tamanho do grão, para aços carbono. É possível observar que para grãos com diâmetros próximos a 200  $\mu\text{m}$ , a tensão de escoamento é de aproximadamente 100 MPa. Com um tamanho de grão próximo a 2  $\mu\text{m}$ , as mesmas ligas passam a apresentar tensão de escoamento por volta de 450 MPa. Estes dados experimentais estão ilustrados graficamente na figura 5.

Figura 5 – Relação entre tamanho de grão e tensão de escoamento.



Fonte: Morrison, 2000.

No Brasil, os procedimentos normativos de soldagem adotados são os contidos na norma americana AWS D1.1-2010. Nela está especificado que os aços com carbono equivalente menores que 0,30 %, não necessitam de soldagem com pré-aquecimento ou demais cuidados específicos e não são suscetíveis a trincas a frio. Verificando através da Equação 2, constata-se que pelos elementos e respectivos teores, requeridos pela NBR 7007:2016, o aço ASTM A36 possui carbono equivalente menor que 0,30 %.

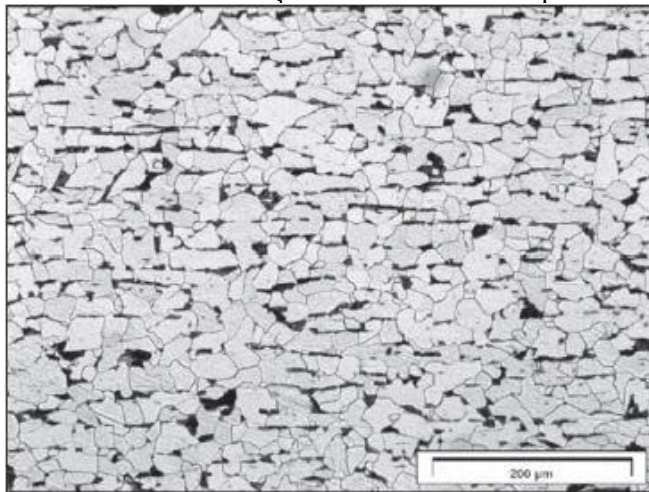
$$C_{eq} = C + (Mn/6) + ((Cr + Mo + V)/5) + ((Ni + Cu)/15) \quad (2)$$

Onde:

$C_{eq}$  = Carbono equivalente;  
 $C$  = Teor de carbono em %;  
 $Mn$  = Teor de Manganês em %;  
 $Cr$  = Teor de cromo em %;  
 $Mo$  = Teor de Molibdênio em %;  
 $V$  = Teor de Vanádio em %;  
 $Ni$  = Teor de Níquel em %;  
 $Cu$  = Teor de cobre em %.

A figura 6 é uma micrografia da microestrutura do aço ASTM A36 laminado a quente. Pode ser observado que a mesma possui uma matriz de ferrita com a presença discreta de perlita. O diâmetro médio dos grãos de acordo com o procedimento descrito na ASTM E112-3, é classificado como o n. 6, sendo equivalente a aproximadamente 45  $\mu\text{m}$  (Silvestre, 2012).

Figura 6 – Microestrutura do aço ASTM A36 com ataque nital 3%.



Fonte: Silvestre, 2012.

Analisando o tamanho de grão próximo a 45  $\mu\text{m}$ , observamos a tensão de escoamento próxima a 200 MPa. Dos aços avaliados por Morrison, o que possui maior conteúdo de carbono apresentava 0,13%, valor menor que o utilizado na produção do aço ASTM A36, em que a presença maior de carbono, aumenta o valor de limite de escoamento.

### 3.1.3 Aço ASTM A572 grau 50

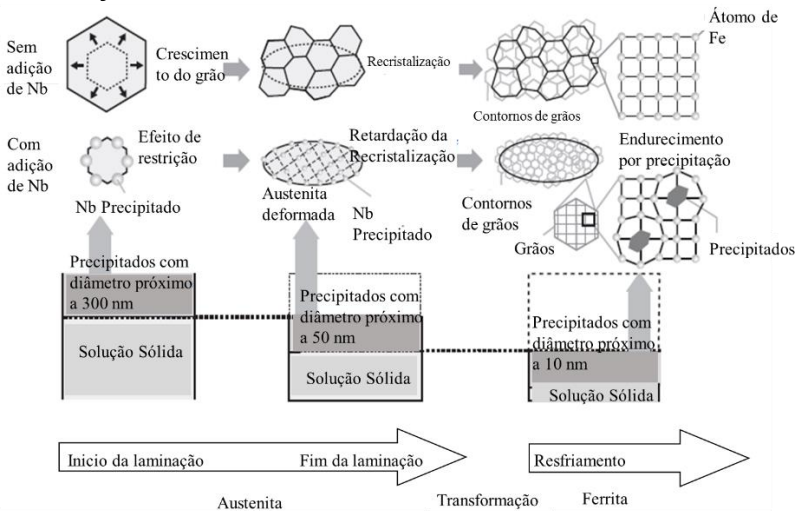
Inicialmente o aço ASTM A572 grau 50 foi desenvolvido para atender a demanda e as necessidades das indústrias de petróleo e gás. Este aço possui maiores valores para resistência mecânica e tenacidade com excelente soldabilidade em relação ao aço carbono convencional. Estas características aliadas com os avanços no processo de laminação o tornaram uma boa opção para a produção de perfis estruturais (MEESTER, 1997).

Os perfis estruturais I e H são encontrados comercialmente no Brasil em aço ASTM A36, ASTM A572 grau 50 e ASTM A572 grau 60. De acordo com a empresa GERDAU S.A., os perfis no padrão W tipo I e H mais procurados, são em aço ASTM A572 grau 50.

Este aço se enquadra nos aços ARBL e o incremento da resistência mecânica e tenacidade são obtidos pela adição de até 0,10 % de elementos de liga. O elemento de liga responsável pelo incremento dessas propriedades neste aço é o Nióbio (Nb), que promove o refino do tamanho do grão na microestrutura durante o processo de laminação utilizando TMCP (SILVESTRE, 2012).

O efeito de controle do tamanho do grão do nióbio se dá pela precipitação do mesmo, com diâmetros próximos de 300 nm, causando a restrição do crescimento do grão no início da laminação. Na etapa de laminação intermediária o nióbio precipitado, com diâmetros próximos a 50 nm, retarda a recristalização, é obtida uma austenita deformada. Na etapa final de resfriamento, o Nb precipitado, então com diâmetros próximos a 10 nm, promove a deformação da rede cristalina (ICHIKAWA, 2011). Este efeito está apresentado de maneira gráfica na figura 6 com temperatura de reaquecimento acima de 1200 °C.

Figura 7 – Efeito da precipitação do Nióbio em cada etapa do processo de laminação com TMCP.

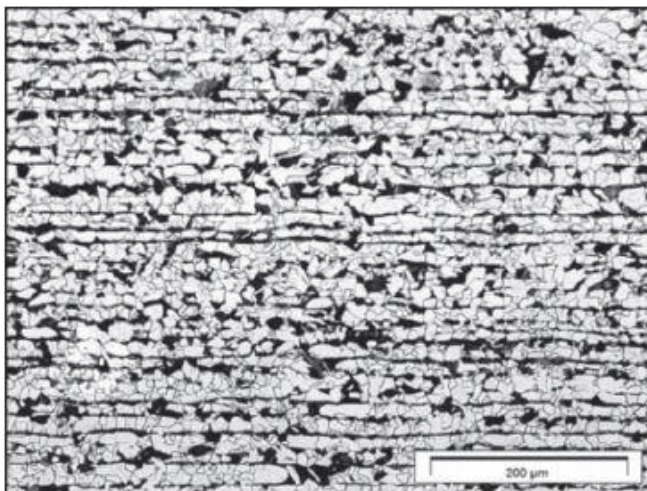


Fonte: Ichikawa, 2011, adaptado pelo autor, 2017.



A figura 8 representa a micrografia da microestrutura do aço ASTM A572 grau 50 laminado a quente. Nota-se, que a mesma possui matriz de ferrita com a presença de perlita orientada no sentido da laminação. O diâmetro médio dos grãos, de acordo com o procedimento descrito na ASTM E112-3, é classificado como o n. 7,5, sendo equivalente a aproximadamente 26  $\mu\text{m}$  (Silvestre, 2012).

Figura 8 – Microestrutura aço ASTM A572 grau 50 com ataque nital 3%.



Fonte: Silvestre, 2012.

Lan (2011) comenta que as propriedades mecânicas obtidas através da microestrutura obtida pelo aço ASTM A572 com laminação de temperatura controlada, podem ser perturbadas durante o processo de soldagem, que provoca um rápido aquecimento e um resfriamento descontrolado. A microestrutura na zona termicamente afetada (ZTA) torna-se variada, podendo surgir regiões ou subzonas de baixa tenacidade, regiões em que os grãos passam de refinados a grosseiros com grande heterogeneidade.

O aço ASTM A572 grau 50 é classificado pela NBR 7007:2016 através das tabelas 2 e 3, como um aço AR 350, em que a sigla AR significa alta resistência e o número 350 é o valor mínimo requerido de tensão de escoamento em MPa.

A soldabilidade do aço ASTM A572 grau 50, quando verificada através do cálculo de carbono equivalente contido na norma AWS D1.1-2010, mostra-se satisfatório e com percentual de carbono equivalente ainda menor que aços carbono comuns, como o ASTM A36 (AMRAL, 2016).

### 3.2 SOLDAGEM GMAW

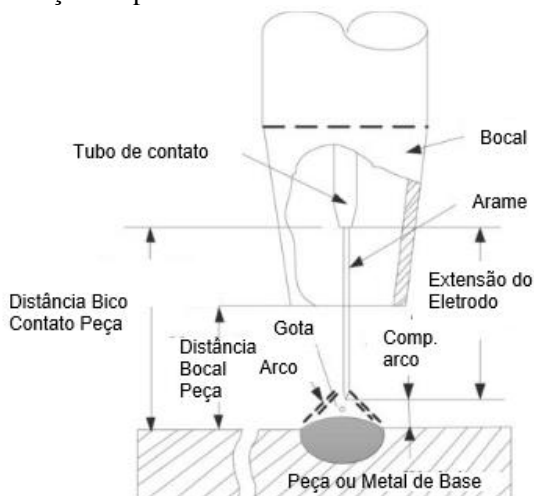
A soldagem GMAW é o processo realizado por arco elétrico, em que um arame eletrodo é alimentado continuamente como metal de adição e cátodo. Ao mesmo tempo, um gás é injetado de forma contínua a fim de proporcionar proteção atmosférica à poça de metal fundido e estabilizar o arco elétrico através de sua ionização. Então, parte do gás de proteção que está em torno do arame eletrodo é ionizado, formando a coluna do arco estabilizado e o restante irá proporcionar uma atmosfera, para que não ocorra reações de oxidação entre o metal fundido e o ambiente (ZHANG, 2011).

O processo consiste em destacar o metal do arame eletrodo fundido e depositá-lo em uma poça fundida do metal de base. Este fenômeno é controlado primordialmente pela força eletromagnética, que é influenciada pelos parâmetros de soldagem. Os parâmetros de maior influência podem ser listados como a corrente de soldagem, o diâmetro do eletrodo, o gás de proteção, a polaridade, a distância entre bico de contato e peça (DBCP) e o metal utilizado. Dentre estes parâmetros, a corrente de soldagem é a variável mais significativa de controle da força eletromagnética (ZHANG, 2011).

A trajetória da gota destacada segue a direção axial do arame eletrodo, pois as formas eletromagnéticas que são geradas em torno do arame eletrodo seguem a direção somada do fluxo de gás de proteção ionizado e a direção da alimentação do arame. O formato e o tamanho da gota e a velocidade de sua trajetória, estão diretamente relacionados à corrente de soldagem, que por sua vez é intrínseca da velocidade de alimentação. De acordo com a faixa de corrente de soldagem utilizada, as mudanças físicas na gota e no processo de transferência, alteram significativamente o calor imposto, a geometria do cordão de solda e a influência das forças eletromagnéticas e gravitacionais envolvidas. Desta forma, no processo GMAW têm-se diferentes tipos de transferência metálica (SCOTTI, 2014).

A figura 9 apresenta esquematicamente o processo GMAW.

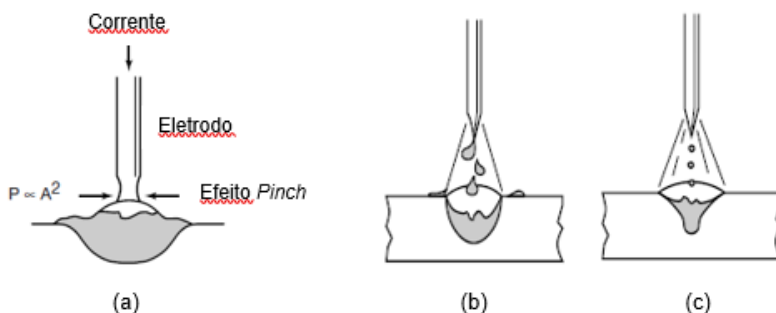
Figura 9 – Ilustração do processo GMAW.



Fonte: ZHANG, 2011, adaptado pelo autor, 2017.

Na figura 10 está ilustrado 3 tipos de transferência metálica comumente utilizados nos processos de soldagem.

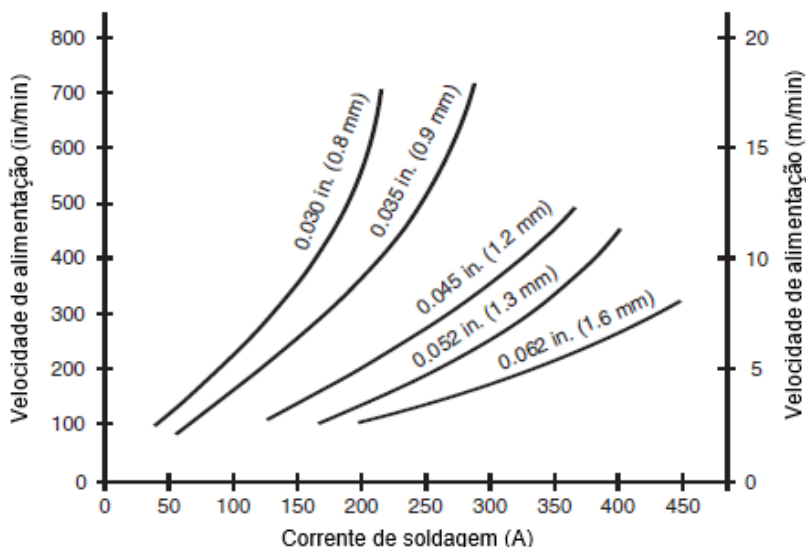
Figura 10 – Tipos de transferência metálica (a) curto-circuito, (b) globular e (c) spray.



Fonte: LINCOLN ELETRIC, 2014, adaptado pelo autor, 2017.

A figura 11 mostra graficamente, a relação entre a corrente de soldagem e a velocidade de alimentação, para diversos diâmetros de arames utilizados comercialmente.

Figura 11 – Curvas típicas de velocidade alimentação em função da corrente de soldagem.



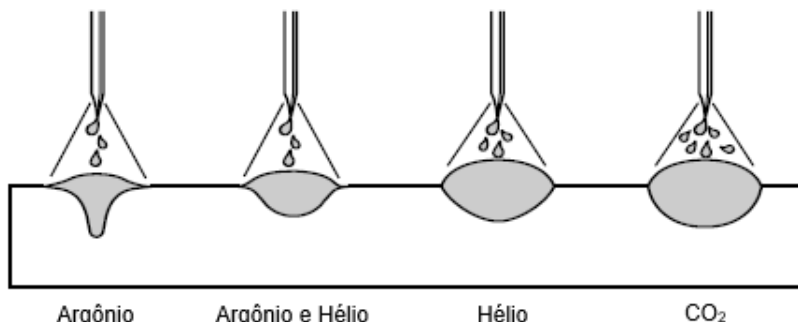
Fonte: LINCOLN ELETRIC, 2014, adaptado pelo autor, 2017.

Outra variável que têm influência direta na geometria do cordão de solda, tanto no acabamento, altura do cordão e penetração, é o gás de proteção utilizado. Esta influência diretamente na estabilidade do arco elétrico e na tensão superficial da gota, sendo um fator importante no tipo de transferência metálica. Pode-se utilizar gases inertes, gases ativos e misturas. Utilizando gases inertes, a soldagem GMAW passa a ser do tipo *Metal Inert Gas* (MIG), se utilizado gases ativos ou misturas, a mesma passa a ser do tipo *Metal Active Gas* (MAG) (SCOTTI, 2014).

Na prática, são comumente empregadas correntes de soldagem de 50 a 600 amperes e tensões entre 15 e 32 volts. Atualmente o processo GMAW é aplicável à soldagem de todos os metais comercialmente importantes como os aços carbono, aços inoxidáveis, alumínio, cobre e em produtos com espessura acima de 0,76 mm, tendo a possibilidade de serem soldados em todas as posições, utilizando diferentes tipos de transferência metálica (LINCOLN ELETRIC, 2014).

A figura 12 ilustra as diferenças no cordão de solda utilizando diferentes gases de proteção.

Figura 12 – Representação esquemática da geometria do cordão de solda para diferentes tipos de gases de proteção.



Fonte: LINCOLN ELETRIC, 2014, adaptado pelo autor, 2017.

### 3.2.1 Soldagem MAG com transferência metálica por curto-circuito

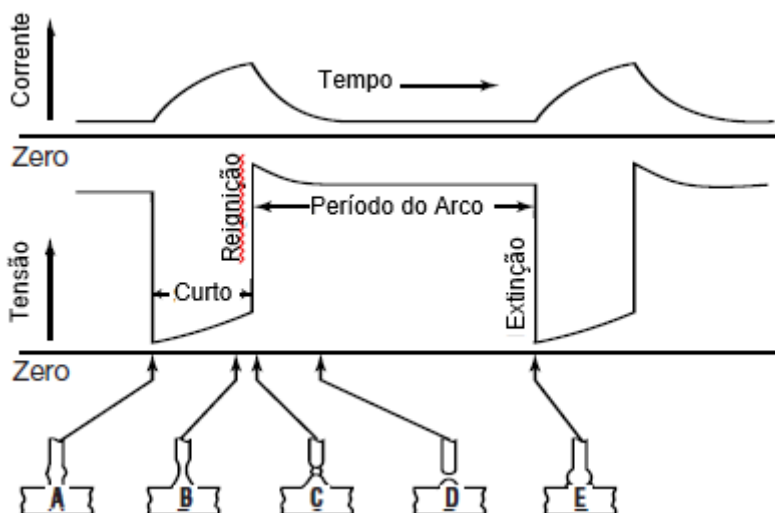
A soldagem de aço carbono pelo processo GMAW sempre ocorre pelo tipo MAG, devido aos fatores metalúrgicos necessários a serem atingidos. São utilizados como gás de proteção o CO<sub>2</sub> puro ou a mistura de Ar com CO<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub>. A soldagem com CO<sub>2</sub> é escolhida quando se deseja maior economia com o custo do gás e as misturas são escolhidas para melhorar os aspectos metalúrgicos do cordão de solda, acabamento e penetração (SCOTTI, 2014).

O modo de transferência metálica por curto circuito é o mais utilizado, pois permite que a soldagem seja realizada em todas as posições e por ter como característica a produção de uma poça de fusão relativamente pequena e de rápida solidificação. A faixa de tensão utilizada é a menor dentre os modos de transferência, como consequência é a que impõe menos calor no processo. Esta transferência é realizada basicamente por tensão superficial, em que, durante o curto circuito o calor gerado pelo arco forma uma poça fundida no metal de base e o arame eletrodo funde formando uma gota em sua ponta, que cresce até tocar a poça do metal de base. A tensão superficial gera um esforço que produz constricção entre a gota fundida e o arame sólido, é o chamado efeito pinch, que ocorre na parte superior da mesma, destacando-a do arame eletrodo. O efeito pinch está associado a força eletromagnética, que é proporcional ao quadrado da corrente máxima alcançada no curto circuito, que é corrente de pico. O arame eletrodo

entra em curto circuito com a peça em uma frequência de 20 a 200 Hz (MENESES, 2014).

A figura 13 representa esquematicamente as curvas de corrente e tensão em função do tempo, típicas para o processo de destacamento de uma gota por transferência metálica de curto circuito.

Figura 13 – Representação esquemática das curvas típicas de corrente e tensão em função do tempo e o modo de transferência.



Fonte: LINCOLN ELETRIC, 2014, adaptado pelo autor, 2017.

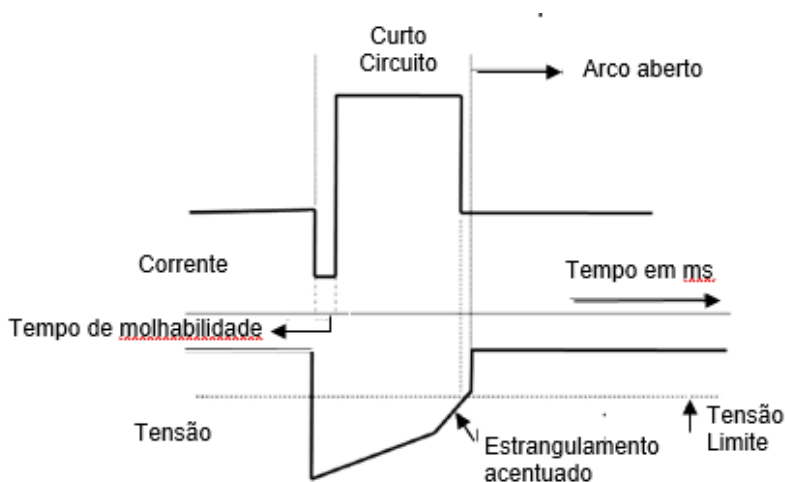
### 3.2.2 Soldagem MAG com curva controlada e transferência metálica por *surface tension transfer* (STT)

A soldagem com curva controlada para o modo de transferência metálica por curto circuito, é capaz de reduzir consideravelmente os respingos e possibilitar o ajuste incremental da corrente de pico e a velocidade de destacamento, bem como controlar o comprimento do arco, a forma de onda da corrente, e os tempos associados ao arco e ao curto circuito. Essas novas possibilidades geram novas variáveis do processo, responsáveis por ajustar o calor imposto, diminuir a reação axial do arame eletrodo e o formato da gota destacada. Estes fatores permitem alterar a microestrutura e a geometria do cordão de solda,

como penetração, altura e largura, para uma mesma velocidade de alimentação (NORRISH, 2013).

A figura 14 apresenta a curva de corrente e tensão através do princípio de controle eletrônico para um curto circuito. Nela pode-se perceber que a curva de corrente está linearizada em cada estágio e, por consequência, é conseguido estabilizar o efeito *pinch* que produz o estrangulamento da gota através do esforço de constrictão observado na curva de tensão (NORRISH, 2013).

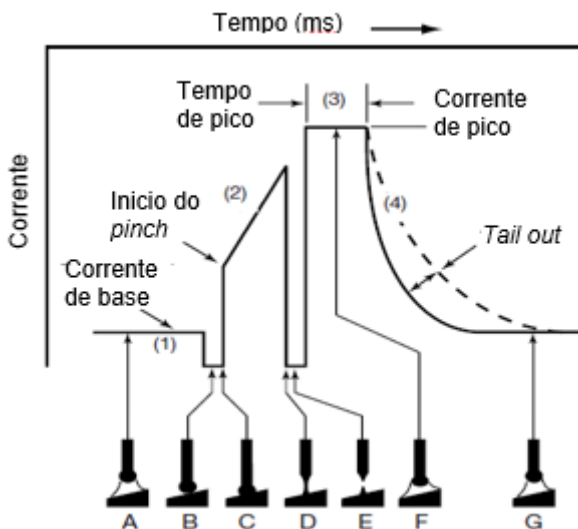
Figura 14 – Representação esquemática do conceito das curvas típicas de corrente e tensão em função do tempo controlados eletronicamente.



Fonte: NORRISH, 2013, adaptado pelo autor, 2017.

O fabricante Lincoln Electric possui o sistema STT patenteado que possui a curva de controle apresentada na figura 15. Esta permite de maneira sinérgica a regulação da corrente de base, corrente de pico, o controle do efeito *pinch* e a suavidade na formação da gota (*Tail out*). É possível alterar o ajuste sinérgico da corrente de pico, corrente de pico e a corrente de base, esta curva também permite o ajuste fino no foco do arco. Isto possibilita a otimização nos processos de passe de raiz para juntas de topo, utilizadas em soldagem de tubulações e também nos demais tipos de junta, otimizando a geometria do cordão de solda, diminuindo os respingos e minimizando as mudanças microestruturais (CABRAL, 2013).

Figura 15 – Representação esquemática da curva controlada pelo modo STT e o modo de transferência.



Fonte: LINCOLN ELETRIC, 2014, adaptado pelo autor, 2017.

### 3.2.3 Energia de soldagem

A otimização da perturbação microestrutural, visando a formação de uma microestrutura regular mesmo na ZTA, está condicionada às propriedades físicas e químicas do aço, bem como o interesse de aplicar menor energia no processo de soldagem. Minimizar a energia de soldagem, implica diretamente em economia e um melhor ambiente de trabalho (DAVID, 2012).

Um aspecto de importância que se pode controlar, através dos ajustes do foco da coluna do arco e a amplitude entre as correntes de pico e de base, é a energia de soldagem, uma vez que a mesma está diretamente relacionada ao calor imposto. Experimentalmente é possível prever que energias de soldagem menores, provoquem uma ZTA menor, porém com grãos mais refinados e mais heterogêneos, quando comparada a energias de soldagem mais elevadas. Isto porque com menor energia de soldagem, menor é o calor imposto na peça e a mesma resfria em menor tempo. Por outro lado, energias de soldagem mais elevadas, provocam áreas de ZTA prejudiciais às propriedades



mecânicas da ligação soldada, como a suscetibilidade à inclusões e a formação de microestruturas menos dúcteis que a original (HUTCHINSON, 2015).

### **3.2.4 Geometria da solda**

O conceito da geometria do cordão de solda é possuir penetração mínima necessária para formar a união das peças. A resistência mecânica é garantida pela garganta do cordão, que junto a seu comprimento forma a área resistente efetiva. Uma penetração maior que a necessária implica em gasto desnecessário de energia, ocorrência de mordeduras, facilita o surgimento de inclusões e gera uma perturbação desnecessária na microestrutura do metal de base. Desta forma, a otimização da geometria do cordão é realizada para maximizar e uniformizar a garganta e a perna do cordão ao mesmo passo que diminui, até a medida mínima necessária, a penetração (BENYOUNIS, 2008).

Visando a resistência mecânica, a ligação soldada com filetes, a penetração desejada é a mínima necessária para formar a união das peças, pois uma penetração maior implica em gasto desnecessário de energia, além de aumentar as ocorrências de defeitos metalúrgicos, como a mordedura, o surgimento de inclusões e aumentar a ZTA. A resistência mecânica é garantida pela garganta do cordão, que junto a seu comprimento forma a área resistente efetiva (MACHADO, 2011, BENYOUNIS, 2008).

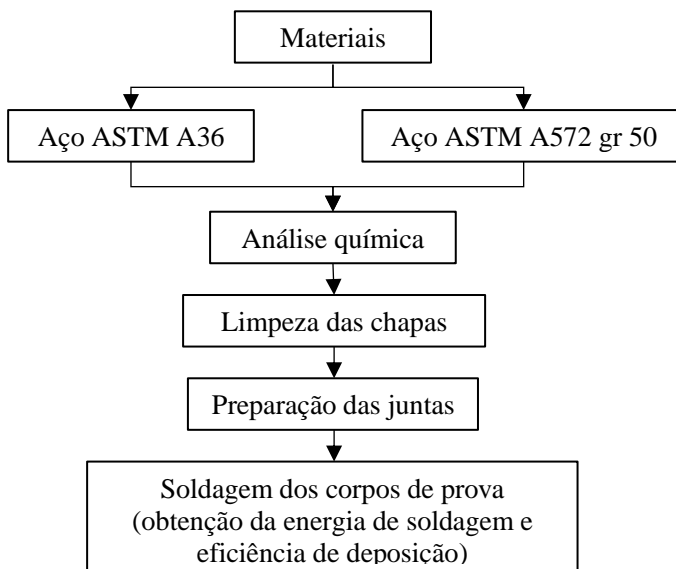


## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para estudar e avaliar os parâmetros de controle de curva na execução e no projeto da solda de filete, foram avaliadas, a microestrutura, a geometria da solda, a eficiência de deposição e sua resposta frente a corrosão, utilizando um planejamento experimental fatorial de  $2^3$  completo com ponto central em réplica. Montgomery (2001), comenta que planejamentos fatoriais, são ideais para experimentos que possuam mais de um fator envolvido e que permitem ao pesquisador, estimar os efeitos de um fator sobre outros níveis dos demais fatores. Com isto, é possível aplicar o método de superfície de respostas para otimizar o processo de soldagem que está sendo estudado e avaliado. A partir dos resultados experimentais, modelos de regressão linear foram desenvolvidos para prever uma menor tendência à corrosão, menores perturbações microestruturais e estimar a geometria da solda.

A figura 16 apresenta o fluxograma adotado para a realização da caracterização e soldagem dos materiais.

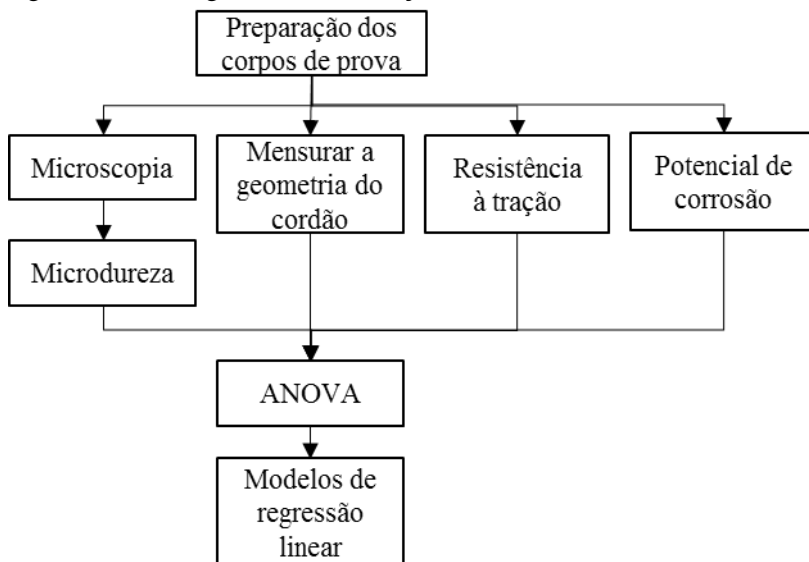
Figura 16 – Fluxograma da caracterização e soldagem dos materiais.



Fonte: Do autor, 2017.

Na figura 17, é apresentado o fluxograma regente da realização dos ensaios experimentais e análise dos dados, na qual inclui a análise de variância ANOVA.

Figura 17 – Fluxogramas da realização dos ensaios e análise dos dados.



Fonte: Do autor, 2017.

#### 4.1 MATERIAIS

Como metal de base foram utilizados os aços laminados ASTM A36 e ASTM A572 grau 50. As análises químicas foram efetuadas utilizando um equipamento Spectro, modelo Spectromaxx. Estas foram realizadas pela Fundação Monferrato Ltda. A tabela 4 apresenta os resultados das composições químicas para cada aço. O arame eletrodo que será utilizado segue as recomendações de fabricação da norma americana AWS A5.28-2015 e sua composição química está discriminada na tabela 4 (dados do fabricante).

Tabela 4 – Composição química dos aços utilizados.

Aço → Elementos ↓	ASTM A36	ASTM A572 grau 50	AWS ER70-S
C (%)	0,214	0,145	0,06-0,15
Mn (%)	0,52	0,85	1,40-1,85
Si (%)	0,140	0,186	008-1,15
P (%)	0,018	0,017	0,025
S (%)	0,0051	0,025	0,035
Cu (%)	0,017	0,045	0,50
V (%)	< 0,0010	0,014	-
Nb (%)	< 0,0030	0,0030	-
Cr (%)	0,013	0,044	-
Ni (%)	0,0038	0,100	-
Mo (%)	< 0,0020.	0,020	-

Fonte: Do autor, 2017.

O arame eletrodo escolhido foi o arame sólido AWS ER70-S com 1,2 mm de diâmetro, seguindo as recomendações da norma AWS D1.1-2010, para a união de aços com resistências mecânicas distintas e o processo de soldagem GMAW MAG, com gás em mistura de Ar e CO<sub>2</sub>.

Como gás de proteção, foi utilizado uma mistura de Ar e CO<sub>2</sub> comercial, o percentual de cada gás nesta mistura está em torno de 80% de Ar e 20% de CO<sub>2</sub>, sendo satisfatório para a transferência metálica por curto circuito com baixo respingo e alta penetração (SCOTTI, 2014).

## 4.2 MÉTODOS

Para o projeto de união soldada, foram utilizados os métodos de cálculo adotados pela norma brasileira NBR 8800:2008.

Os corpos de prova foram soldados em formatos cruciformes, o qual é satisfatório para a análise de soldas de filete, largamente adoto em estudos da resistência mecânica da ligação soldada (XING, 2017).

Os dados obtidos experimentalmente passaram pela análise de variância ANOVA. Com a utilização do planejamento experimental, foram desenvolvidos modelos de regressão linear e superfícies de resposta.

### 4.2.1 Dimensionamento da solda

O cordão de solda foi dimensionado para possuir resistência superior à resistência de ruptura dos metais de base, seguindo os procedimentos de cálculo descritos pela norma de projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios NBR8800:2008, que prevê como área resistente de cálculo, o resultado obtido pela Equação 3.

$$A_w = 0,7.b.l \quad (3)$$

Onde:

$A_w$  = área resistente de cálculo em  $\text{cm}^2$ .

$b$  = perna da solda em cm.

$l$  = comprimento da solda em cm.

O produto  $0,7.b$  é conhecido como garganta do filete (Pfeil, 2009).

A resistência de cálculo para a solda de filete é então obtida através da Equação 4.

$$R_d = A_w.(0,60.f_w)/\gamma_w2 \quad (4)$$

Onde:

$R_d$  = resistência de cálculo da solda de filete em kN.

$A_w$  = área resistente de cálculo em  $\text{cm}^2$  obtida pela equação 3 e demonstrada na figura 18.

$f_w$  = tensão resistente do metal da solda em  $\text{kN}/\text{cm}^2$ .

$\gamma_w2$  = coeficiente de minoração, que foi tomado como 1,15 para combinações excepcionais.

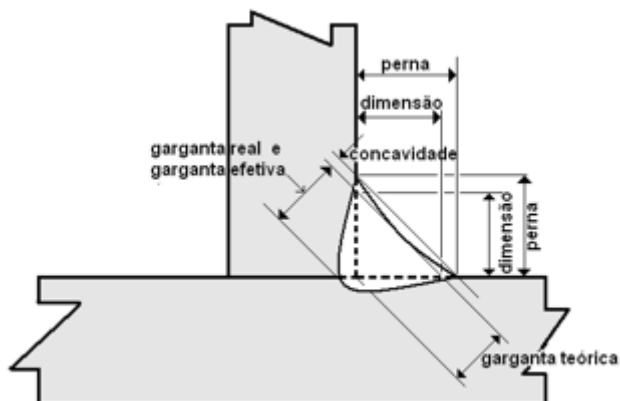
### 4.2.2 Soldagem

A ligação soldada utilizada, foi do tipo filete, que possivelmente representa 80% de todas as ligações soldadas no mundo. Ela pode ser executada com chapas sobrepostas ou com as chapas em “T”. Nesta última a solda estará circunscrita formando um ângulo entre  $60^\circ$  e  $120^\circ$

com a face de fusão (MACHADO, 2011). Para facilitar a verificação da resistência à tração, a configuração adotada é do tipo “T” formando um ângulo de  $90^\circ$  com a face de fusão. As chapas posicionadas no sentido paralelo ao esforço de tração são do aço ASTM A572 grau 50 e a chapa que está no sentido perpendicular ao esforço de tração é do aço ASTM A36.

Desta forma a perna de solda mínima adotada para os experimentos foi igual a 6 mm. A figura 18 mostra o detalhe em seção transversal de um cordão de solda de filete.

Figura 18 - Detalhe do cordão de solda de filete.



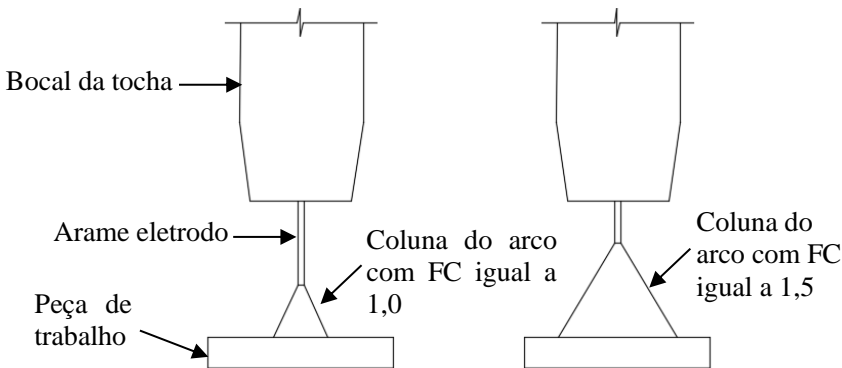
Fonte: Cunha, 2008.

Para efetuar a soldagem foi utilizada uma máquina de soldagem multiprocessos da marca Lincoln Electric modelo Power Wave S-350 com o módulo STT, responsável por realizar o controle da curva de soldagem. A velocidade de soldagem ( $V_s$ ) foi controlada através da mecanização do processo com o auxílio de um carro de soldagem da marca Sumig modelo Autotrack 30A, utilizando  $V_s$  igual a 25 cm/min para  $V_a$  igual a 350 cm/min,  $V_s$  igual a 35 cm/min para  $V_a$  igual a 500 cm/min e  $V_s$  igual a 30 cm/min para a  $V_a$  igual a 425 cm/min. A vazão de gás fixa em 15 L/min. A DBCP foi fixada em 12 mm por recomendação verificada na literatura e no manual de soldagem da Lincoln Electric. O ângulo entre a tocha e a peça também é um parâmetro de soldagem que está fixado, sendo  $45^\circ$  para proporcionar igualdade nas pernas do cordão. As chapas a serem soldadas passarão por um jato de

areia para retirar a carepa, evitando sua influência tanto no processo de soldagem, como na avaliação da corrosão.

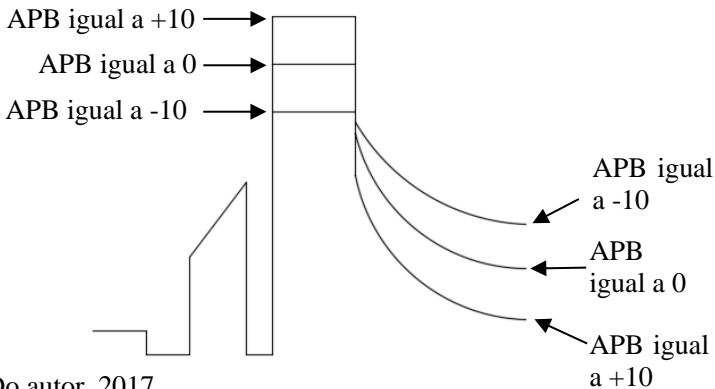
A transferência metálica será por STT, onde os parâmetros, velocidade de alimentação ( $V_a$ ), foco da coluna do arco elétrico (FC) e Amplitude entre a corrente de pico e a corrente de base (APB), serão os fatores analisados. A figura 19 e 20 representam esquematicamente, as alterações no processo de soldagem, causadas pelos parâmetros FC e APB respectivamente.

Figura 19 – Representação esquemática da alteração no processo de soldagem causada pelo parâmetro FC.



Fonte: Do autor, 2017.

Figura 20 – Representação esquemática da alteração no processo de soldagem causada pelo parâmetro APB.



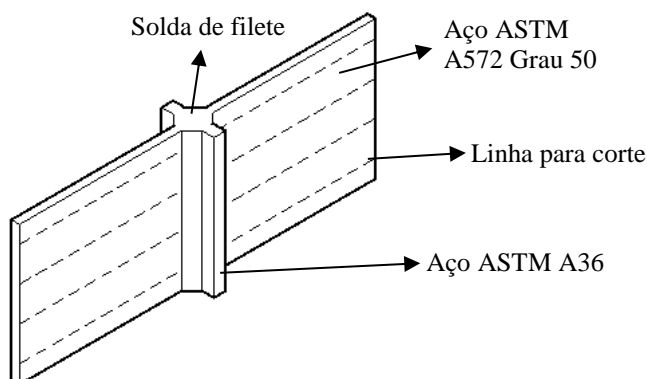
Fonte: Do autor, 2017.



### 4.2.3 Obtenção dos corpos de prova

A figura 21 mostra o desenho da ligação soldada do espécime. A partir dele foram seccionados 3 corpos de prova com cortes longitudinais, representados pelas linhas tracejadas, utilizando uma serra fita automatizada da marca Starrett modelo S1101. As bordas são descartadas com uma largura de 10 mm. Para cada rodada experimental, realizou-se a soldagem de dois espécimes, um para obter os corpos de prova para o ensaio de tração, o outro para obter os corpos de prova dos demais ensaios.

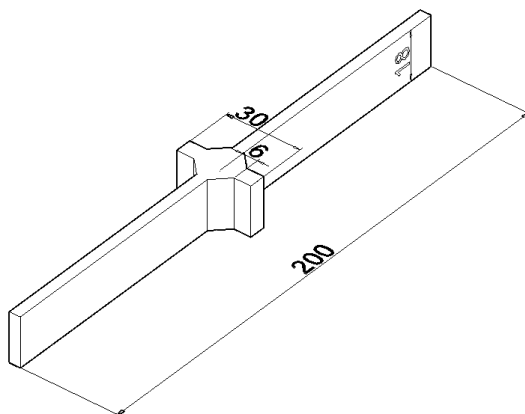
Figura 21 – Desenho do espécime.



Fonte: Do autor, 2017.

O corpo de prova cruciforme obtido após o seccionamento do espécime, possui as dimensões em milímetros, conforme mostrado na figura 22.

Figura 22 - Desenho do corpo de prova curciforme.



Fonte: Do autor, 2017.

#### 4.2.4 Planejamento Experimental

Inicialmente foram realizados experimentos exploratórios para avaliar a relação entre a velocidade de alimentação ( $V_a$ ) e a velocidade de soldagem ( $V_s$ ), para adotar a que apresentou maior estabilidade do arco elétrico. A relação  $V_a/V_s$  foi então fixada em aproximadamente 14, então a velocidade de soldagem é igual a 25 cm/min para a  $V_a$  igual a 350 cm/min, 30 cm/min para a  $V_a$  igual a 425 cm/min e 35 cm/min para a  $V_a$  igual a 500 cm/min.

A velocidade de alimentação foi avaliada em 3,50 m/min e 5,00 m/min. Esta faixa de trabalho garante a perna mínima de 6 mm e abrange os valores recomendados nos manuais de soldagem da Lincoln Electric. O APB terá como nível inferior -10,0 e superior 10,0 e o FC em 1,0 e 1,5.

Foi utilizado um planejamento com ponto central em réplica, para se minimizar o erro, caso os níveis apanhem uma área fenomenológica não linear (SRIVASTAVA, 2017).

A tabela 5 apresenta os fatores  $V_a$ , FC, APB em dois níveis, contemplando um planejamento fatorial  $2^3$  completo com ponto central em réplica.

Tabela 5 – Planejamento fatorial  $2^3$  completo com ponto central em réplica.

Fatores → Casos ↓	Va	APB	FC	Va (m/min)	APB	FC
1	-1	-1	-1	3,5	-10	1,0
2	1	-1	-1	5	-10	1,0
3	-1	1	-1	3,5	10	1,0
4	1	1	-1	5	10	1,0
5	-1	-1	1	3,5	-10	1,5
6	1	-1	1	5	-10	1,5
7	-1	1	1	3,5	10	1,5
8	1	1	1	5	10	1,5
9	0	0	0	4,25	0	1,25
10	0	0	0	4,25	0	1,25

Fonte: Do autor, 2017.

#### 4.2.5 Energia de soldagem

Em cada caso, foram realizadas 8 soldas de filete, 4 em cada espécime. A energia de soldagem foi calculada utilizando a Equação 5, com os dados de tensão elétrica e corrente, obtidos através da média aritmética dos dados coletados automaticamente pela máquina de solda.

$$E = 60.U.I.S^{-1} \quad (5)$$

Onde:

E = energia de soldagem em J/mm;

U = Tensão elétrica em V;

I = Corrente elétrica em A;

S = velocidade de soldagem em mm/min.

Foi aplicada a Equação 6 para gerar os resultados de energia de soldagem referentes a cada cordão.

$$E_{1c} = 0,06.U.I.S^{-1}.L \quad (6)$$

Onde:

$E_{1c}$  = Energia de soldagem em kJ;

U = Tensão elétrica em V;

I = Corrente elétrica em A;

S = Velocidade de soldagem em mm/min;

L = Comprimento do cordão em mm.

#### 4.2.6 Eficiência de deposição

Avaliar o processo de soldagem quanto à ocorrência de respingos, é crucial, visto que o principal motivado da utilização da soldagem com curva controlada, é a minimização de respingos (SCOTTI, 2014).

Para mensurar a ocorrência de respingos, foi realizada a quantificação de massa do espécime, antes e após a soldagem. Sabendo a velocidade de alimentação, a massa específica do arame eletrodo e o tempo de soldagem para cada cordão, foram obtidas a massa depositada e a massa de respingos. Os cálculos efetuados na obtenção destes resultados, seguiram as Equações 8, 9 e 10. Cada caso possui dois espécimes, desta forma, os experimentos foram realizados em duplicata.

$$md = mf - mi \quad (8)$$

Onde:

md = Massa depositada em g;

mf = Massa final em g;

mi = Massa inicial em g.

$$ma = \rho.\pi.r^2.Va.t \quad (9)$$

Onde:

ma = Massa alimentada em g;

$\rho$  = Massa específica do arame eletrodo em g/cm<sup>3</sup>;

r = Raio do arame eletrodo em cm;

Va = Velocidade de alimentação em cm/s;

$t$  = Tempo de soldagem em s.

$$m_r = m_a - m_d \quad (10)$$

Onde:

$m_r$  = Massa de respingos em g;

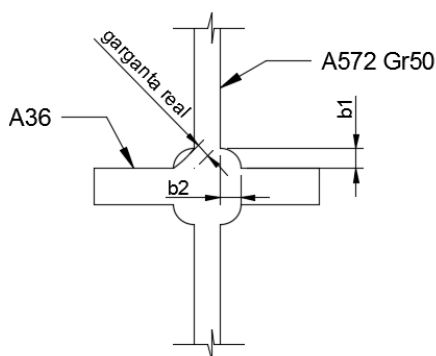
$m_a$  = Massa alimentada em g;

$m_d$  = Massa depositada em g.

#### 4.2.7 Geometria do cordão da solda

A geometria do cordão da solda foi obtida utilizando o software ImageJ, com imagens macroscópicas. As dimensões aferidas estão representadas na figura 23, onde  $b_1$  e  $b_2$  representam as pernas do cordão, que são utilizadas no cálculo da garganta efetiva. A garganta real ( $gr$ ) também foi aferida para comparação.

Figura 23 – Representação da geometria do cordão de solda no corpo de prova cruciforme.



Fonte: Do autor, 2017.

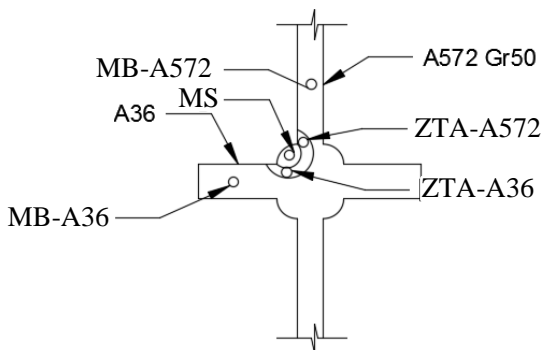
Estes ensaios foram realizados nos laboratórios de metalografia e microscopia, do Instituto de Engenharia e Tecnologia (i.dt), da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), localizado no i.parque, parque científico e tecnológico.

#### 4.2.8 Caracterização da região soldada

A metalografia foi realizada com base na norma ASTM E3-11. Utilizou-se as lixas d'água com grãos na sequência ascendente de 80, 120, 320, 400, 500, 600, 800, 1200 mesh e por fim foi realizado o polimento da amostra, com pano de polimento e uma suspensão de água destilada e alumina 1  $\mu\text{m}$ . Foi realizado o ataque químico com nital 3% durante 5 segundos de imersão, posteriormente com um microscópio óptico (Olympus, BX41RF/LED), com câmera digital acoplada, foram obtidas as imagens das microestruturas.

A figura 24, mostra esquematicamente os locais de análise microestrutural, identificados como MB-A572, MB-A36, ZTA-A572, ZTA-A36, e MS. A tabela 6 mostra o significado de cada identificação.

Figura 24 – Locais para análise microestrutural.



Fonte: Do autor, 2017.

Tabela 6 – Significado das identificações na análise microestrutural.

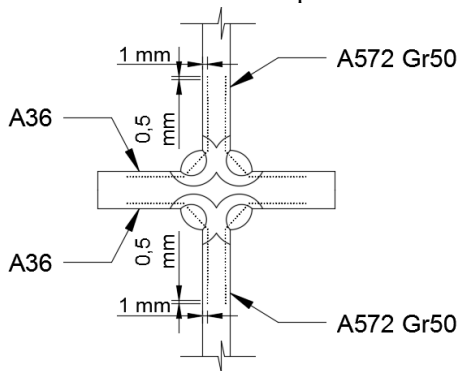
Identificação	Significado
MB-A572	Aço ASTM A572-Gr50 não afetado termicamente
ZTA-A572	ZTA do Aço ASTM A572-Gr50
MS	Metal de solda
ZTA-A36	ZTA do Aço ASTM A36
MB-A36	Aço ASTM A36 não afetado termicamente

Fonte: Do autor, 2017.

Com o mesmo corpo de prova utilizado na análise da microestrutura, realizou-se o ensaio de microdureza, utilizando um

microdurômetro (Future-Tech, FM 700), de acordo com a norma ASTM E384-16. Foram obtidas medidas com espaçamento de 0,5 mm desde os metais de base, passando pela ZTA e metal de solda, a fim de obter o perfil de microdureza da região soldada. O levantamento do perfil de microdureza, foi realizado conforme o desenho do corpo de prova com as indentações, mostrado na figura 25.

Figura 25 – Desenho do levantamento do perfil de microdureza.

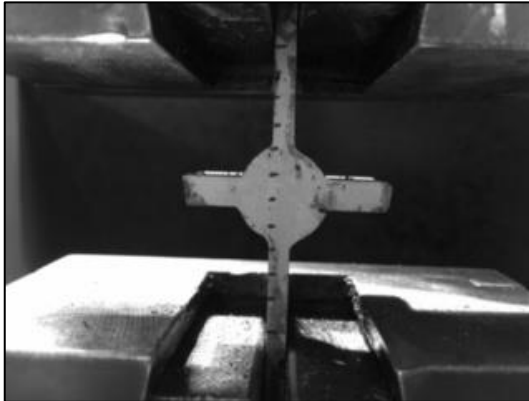


Fonte: Do autor, 2017.

#### 4.2.9 Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração foi realizado com base na norma ASTM E8/E8M-16a, aplicando uma taxa constante de deslocamento igual a 10 mm/min. Foi utilizada uma máquina universal de ensaios da marca EMIC modelo dl 10000, os dados foram obtidos através do software TESC. A figura 26 mostra um corpo de prova posicionado na máquina para ensaio.

Figura 26 – Corpo de prova em ensaio de resistência à tração.



Fonte: Do autor, 2017.

Este ensaio foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos, do instituto de engenharia e tecnologia (i.dt), da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), localizado no i.parque, Parque Científico e Tecnológico.

#### **4.2.10 Potencial de corrosão**

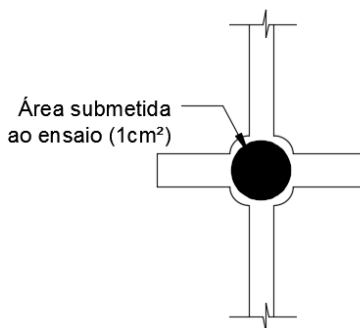
Para relacionar os aspectos microestruturais com a tendência à corrosão, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de potencial de corrosão. Para o ensaio de potencial de corrosão utilizou-se um potenciostato BioLogic SP-200, realizando uma corrosão eletroquímica.

A finalidade é obter as curvas de potencial de equilíbrio de reação catódica e anódica. Para cada caso é possível identificar a tendência à corrosão de cada experimento, como é comentado por Wolyneec (2002).

Os corpos de prova foram submetidos à corrosão em uma solução de cloreto de sódio (NaCl) em concentração de volume de 3,5%. Para o equilíbrio da reação, o monitoramento se deu por 30 minutos e após foi realizada a polarização linear. O ensaio se deu à temperatura de 25 °C, foi utilizado o eletrodo SCE Saturated Calomel Electrode (0,241 V) como referência e uma área de 1 cm<sup>2</sup> com dimensão circular, no centro da seção cruciforme (figura 27), para avaliar a heterogeneidade provocada pela soldagem. Os dados foram obtidos através do software EC-Lab.



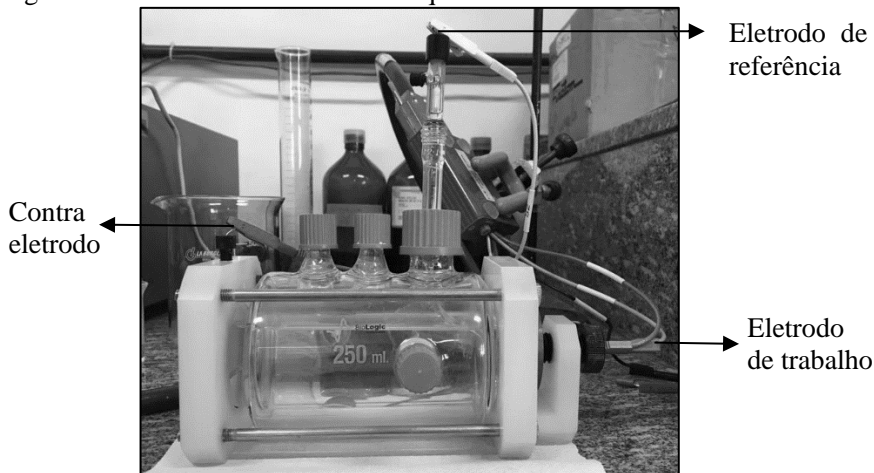
Figura 27 – Área submetida à corrosão eletroquímica no corpo de prova cruciforme.



Fonte: Do autor, 2017.

Na figura 28, é apresentada a célula do ensaio.

Figura 28 – Ensaio de corrosão eletroquímica.



Fonte: Do autor, 2017.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Fenômenos de Superfície e Tratamentos Térmicos, do Instituto de Engenharia e Tecnologia (i.dt), da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), localizado no i.parque, Parque Científico e Tecnológico.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais, de forma a avaliar os parâmetros de soldagem estudados na energia de soldagem, eficiência de deposição, geometria do cordão, alterações microestruturais e na microdureza, tendência à corrosão e resistência mecânica à tração.

### 5.1 ENERGIA DE SOLDAGEM

Na tabela 7 é apresentada a energia de soldagem, obtida pela Equação 5 e a energia de soldagem por cordão de solda, considerando a Equação 6. Os valores apresentados referem-se às médias, na tabela também consta o desvio padrão.

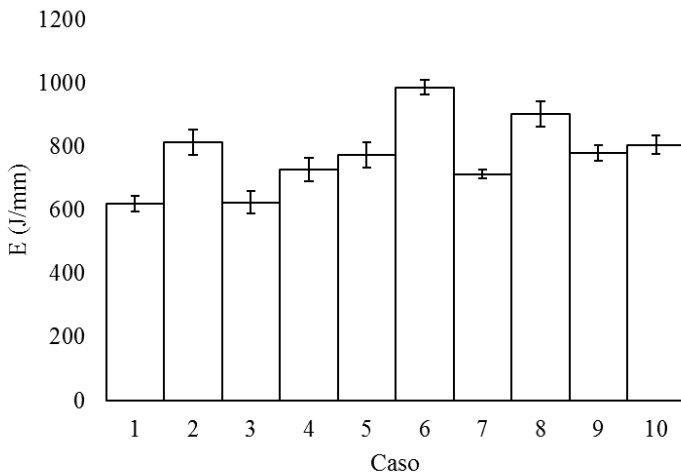
Tabela 7 – Energia de soldagem e energia de soldagem por cordão.

Caso	Va (m/min)	APB	FC	E (J/mm)		E <sub>c1</sub> (kJ)	
				Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1	3,5	-10	1,0	619,97	25,00	49,60	2,0
2	5	-10	1,0	814,37	39,40	65,15	3,2
3	3,5	10	1,0	623,97	35,60	49,92	2,8
4	5	10	1,0	729,29	36,87	58,34	2,9
5	3,5	-10	1,5	772,79	39,60	61,82	3,2
6	5	-10	1,5	986,85	22,00	78,95	1,8
7	3,5	10	1,5	713,89	14,50	57,11	1,2
8	5	10	1,5	903,11	41,00	72,25	3,3
9	4,25	0	1,25	779,30	24,60	62,34	2,0
10	4,25	0	1,25	805,97	29,32	64,48	2,3

Fonte: Do autor, 2017.

A figura 29 mostra os resultados da energia de soldagem média, com o desvio padrão representado pelas barras de erro.

Figura 29 – Representação gráfica da média da energia de soldagem em cada caso.



Fonte: Do autor, 2017.

O caso que apresentou maior energia de soldagem, foi o caso 6, em que se utilizou a  $V_a$  igual a 5,0 m/min, APB igual a -10,0 e FC igual a 1,5. Percebemos que valores negativos de APB aumentam a energia de soldagem, assim como valores positivos de FC.

A energia de soldagem apresentou comportamento linear, onde os fatores  $V_a$  e FC acrescem seu valor e o fator APB decresce o mesmo. Realizando a análise de variância ANOVA para a variável energia de soldagem, verificamos que todos os fatores possuem um valor  $p$  abaixo de 0,05, constatando que são fatores estatisticamente significantes para a resposta da variável dependente com 95% de certeza. No entanto, as interações entre os fatores não apresentam significância estatística, apresentando valores  $p$  acima de 0,05.

A partir da análise ANOVA, foram efetuadas regressões lineares para encontrar o modelo de regressão, que melhor descreve o comportamento da energia de soldagem, dentro do espaço experimental escolhido. As interações entre os fatores, prejudicaram o modelo de previsão, como melhor ajuste, obteve-se a Equação 11 onde, os parâmetros de velocidade de alimentação ( $V_a$ ) e foco da coluna do arco elétrico (FC) incrementam a energia de soldagem. A velocidade de alimentação exerce este efeito, pois está diretamente relacionada ao

aumento da corrente de soldagem, enquanto o foco da coluna do arco elétrico aumenta o volume de descarga elétrica, por aumentar o perfil do arco. O parâmetro de amplitude entre a corrente de pico e a corrente de base, não produziu alterações relevantes nos dados de energia de soldagem, sendo descartado seu efeito na equação de regressão (Equação 11).

$$E = 105.V_a - 2,8.APB + 263.FC \quad (11)$$

Onde:

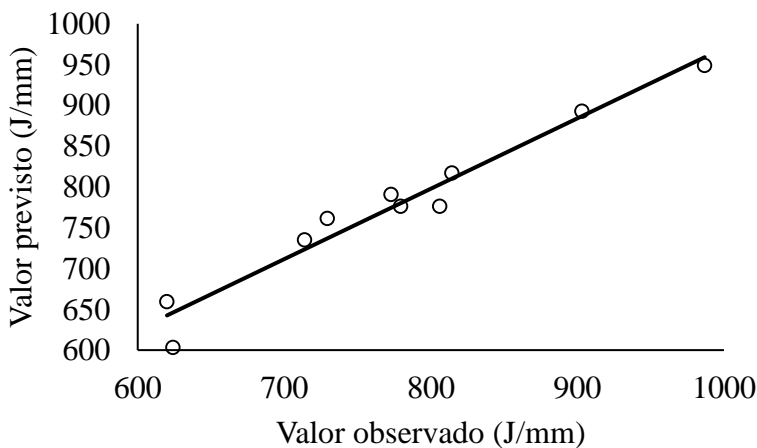
E = Energia de soldagem em J/mm;

V<sub>a</sub> = Velocidade de alimentação em m/min;

FC = Foco da coluna do arco elétrico.

Os valores previstos em comparação com os valores observados, estão plotados no gráfico apresentado na figura 30. O R<sup>2</sup> da Equação 7 é igual a 0,999 e erro padrão igual a 29,85, mostrando que o modelo apresentado tem excelente assertividade.

Figura 30 – Valores previstos versus valores observados para a variável energia de soldagem.



Fonte: Do autor, 2017.

## 5.2 EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO

Os resultados de massa depositada e massa de respingos médios, estão apresentados na tabela 9 para cada caso.

Tabela 8 – Massa depositada e massa de respingos para cada caso.

Caso	Va (m/min)	APB	FC	md (%)	mr (%)
1	3,5	-10	1,0	91,34	8,66
2	5	-10	1,0	91,57	8,43
3	3,5	10	1,0	91,68	8,32
4	5	10	1,0	92,09	7,91
5	3,5	-10	1,5	92,04	7,96
6	5	-10	1,5	91,97	8,03
7	3,5	10	1,5	92,41	7,59
8	5	10	1,5	92,03	7,97
9	4,25	0	1,25	92,76	7,24
10	4,25	0	1,25	92,62	7,38

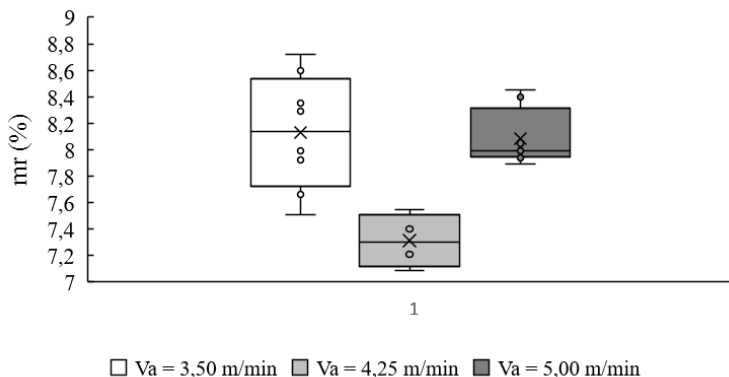
Fonte: Do autor, 2017.

O caso 1 que possui os fatores nos níveis mínimos, apresentaram o maior percentual de massa de respingos e o caso 9, que é um ponto central, possui todos fatores no nível intermediário, apresentou o menor percentual de respingos. É possível explicar através a verificação de energia de soldagem, pois energias mais baixas produzem um arco com menor potencial eletromagnético, dificultando o controle da gota do metal fundido. Por sua vez, energias de soldagem mais elevadas, promovem um arco elétrico instável, causando perturbação na formação da gota, criando gotas irregulares que se tornam de difícil transferência por tensão superficial (ZHANG, 2011).

Dentro dos pontos de contorno escolhidos no planejamento experimental, todos os pontos obtiveram eficiência de deposição acima de 90%, o que segundo Scotti (2014), é considerado como um baixo percentual de respingos.

Com o intuito de avaliar a variabilidade do processo, os dados referentes a massa de respingos, foram agrupados pela velocidade de alimentação. Para apresentar graficamente esta comparação, um gráfico do tipo *box plot* foi confeccionado, figura 32.

Figura 31 – *Box Plot* da massa de respingos agrupada em função da velocidade de alimentação ( $V_a$ ).



Fonte: Do autor, 2017.

Podemos perceber que os casos utilizando  $V_a$  maior, teve uma variabilidade menor no processo e que o ponto central do espaço experimental escolhido, obteve os menores valores de massa de respingos.

Zhang (2011) e Scotti (2014), comentam que a taxa de respingos está relacionada diretamente ao equilíbrio de forças, desta forma a curva controlada exerce influência direta. Os parâmetros da curva analisados nesta dissertação, não promoveram uma relação estatisticamente significativa para a previsão por um modelo de regressão, mas mostram que a região ótima está localizada nos parâmetros do ponto central, estabelecendo também, como uma energia de soldagem adequada que pode ser prevista como igual a 775 J/mm, através da Equação 11.

## 5.3 GEOMETRIA DO CORDÃO

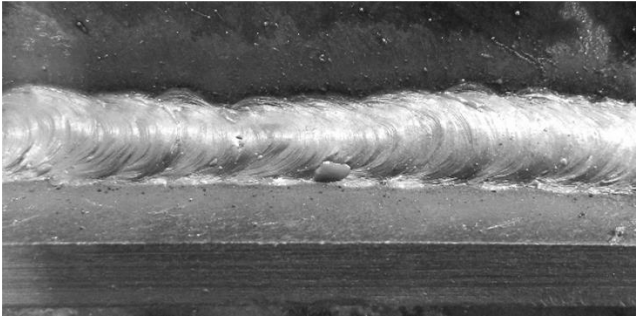
### 5.3.1 Aspecto visual

O aspecto visual é esteticamente importante além de indicar possíveis defeitos na soldagem, como, porosidade e mordeduras. Também é possível identificar parâmetros desajustados ou ineficientes, como reforço acima do necessário ou reforço côncavo (BENYOUNIS, 2008, SCOTTI, 2014, ZHANG, 2011).

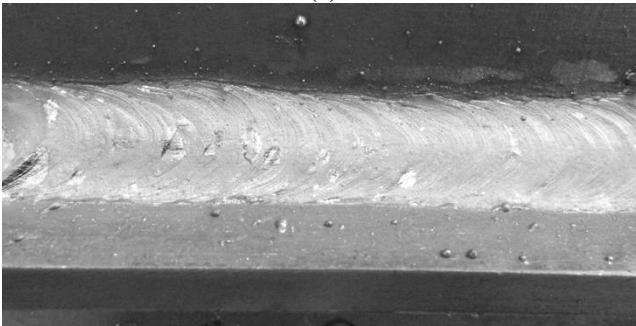
As imagens foram obtidas com uma câmera fotográfica modelo iSight da marca Apple. O smartphone foi posicionado em um tripé e os espécimes colocados em uma altura padrão, assim as fotografias possuem escala aproximada.

Comparando a convexidade dos cordões juntamente com a energia de soldagem, fica evidente que quanto maior a energia de soldagem, menos convexo é o cordão e mais uniforme. Na figura 33, é comparado o caso 1 e o caso 6, menor e maior energia de soldagem, respectivamente.

Figura 32 – Cordão de solda do caso 1 (a) e cordão de solda do caso 6 (b).



(a)



(b)

Fonte: Do autor, 2017.

As fotos para os demais casos estão no apêndice A.

### 5.3.2 Dimensões das pernas e garganta real



As dimensões foram aferidas em cada cordão de solda, de cada espécime em duplicata. Na tabela 10, é apresentada a média de cada caso para cada dimensão, com seu respectivo desvio padrão.

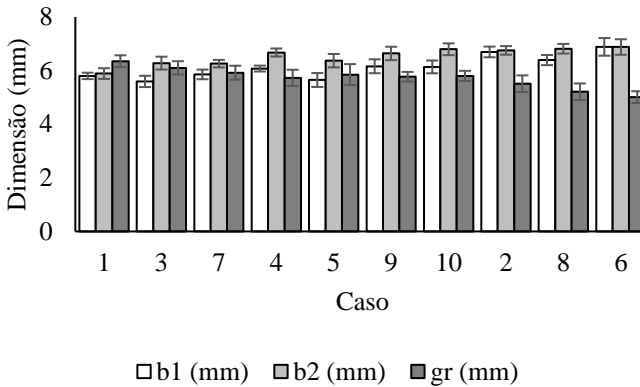
Tabela 9 – Dimensões do cordão em cada caso.

Caso	b1 (mm)	Desvio Padrão (mm)	b2 (mm)	Desvio Padrão (mm)	gr (mm)	Desvio Padrão (mm)
1	5,80	0,12	5,89	0,20	6,35	0,22
2	6,70	0,20	6,75	0,16	5,51	0,31
3	5,60	0,21	6,28	0,24	6,10	0,25
4	6,08	0,11	6,67	0,15	5,73	0,30
5	5,65	0,26	6,37	0,25	5,85	0,39
6	6,88	0,33	6,88	0,29	5,01	0,22
7	5,86	0,18	6,26	0,14	5,92	0,26
8	6,39	0,19	6,81	0,18	5,21	0,31
9	6,16	0,26	6,64	0,25	5,77	0,18
10	6,14	0,24	6,80	0,22	5,80	0,19

Fonte: Do autor, 2017.

Organizando os dados da tabela 10, colocando os casos de forma crescente em relação a energia de soldagem, nota-se que existe uma tendência de aumentar os valores das pernas (b1 e b2) e diminuir o valor da garganta real (gr). É a característica observada na figura 33. Os dados organizados de tal forma, estão representados graficamente na figura 34, as barras de erro indicam o desvio padrão.

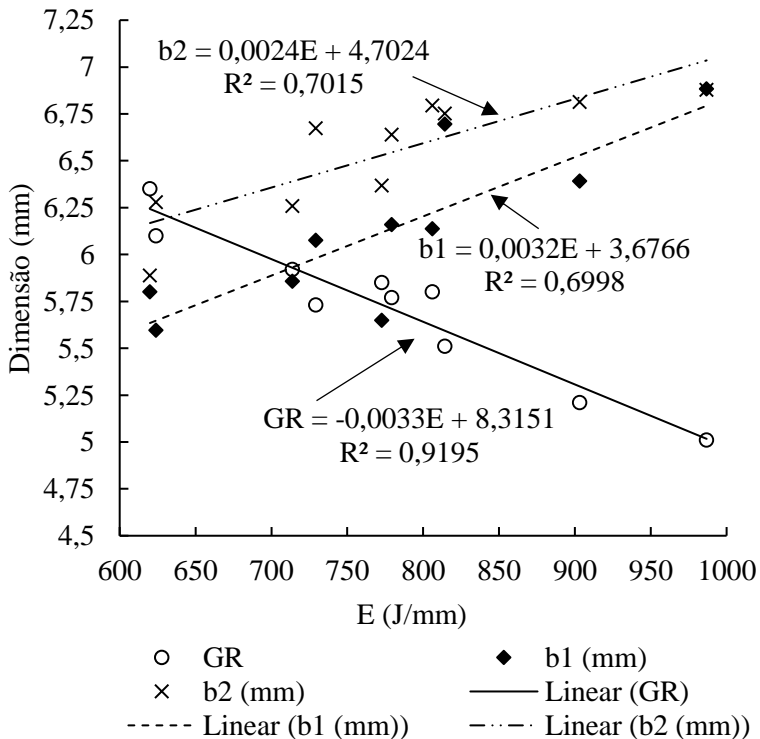
Figura 33 – Gráfico das dimensões em cada caso organizado em ordem crescente em relação a energia de soldagem.



Fonte: Do autor, 2017.

Observando a tendência do gráfico apresentado na figura 30 e o sinal dos coeficientes da Equação 10, é possível avaliar diretamente a relação da energia de soldagem sobre as dimensões do cordão. No gráfico de dispersão, figura 31, as dimensões estão apresentadas em função da energia de soldagem. Os coeficientes angulares para b1 e b2 são positivos, à medida que é incrementada a energia de soldagem, maiores são as pernas do cordão. Já o coeficiente angular para a garganta efetiva é negativo, indicando que esta decresce com o aumento da energia de soldagem.

Figura 34 – Gráfico de dispersão das dimensões geométricas do cordão em função da energia de soldagem.



Fonte: Do autor, 2017.

Realizando uma regressão linear múltipla, novamente são efeitos significativos, os observados pela ação dos parâmetros velocidade de alimentação ( $V_a$ ) e foco da coluna do arco elétrico ( $FC$ ). A velocidade de alimentação aumenta a corrente de soldagem, resultando em maior penetração, fato que diminui a garganta real. Já um perfil de arco mais aberto, favorece o aumento da garganta real por distribuir a soldagem em uma área maior. A interação linear entre estes dois parâmetros, foi observada como um fator que diminui a garganta real, fato explicado por ambos aumentarem a energia de soldagem, favorecendo a maior penetração e conseqüentemente diminuição da garganta real. A Equação

12 é apresentada como a regressão múltipla, que apresentou melhores relações entre os valores observados e os valores previstos, obtendo um  $R^2$  igual a 0,999.

$$gr = 1,54.Va + 5,91.FC - 1,55.Va.FC \quad (12)$$

Onde:

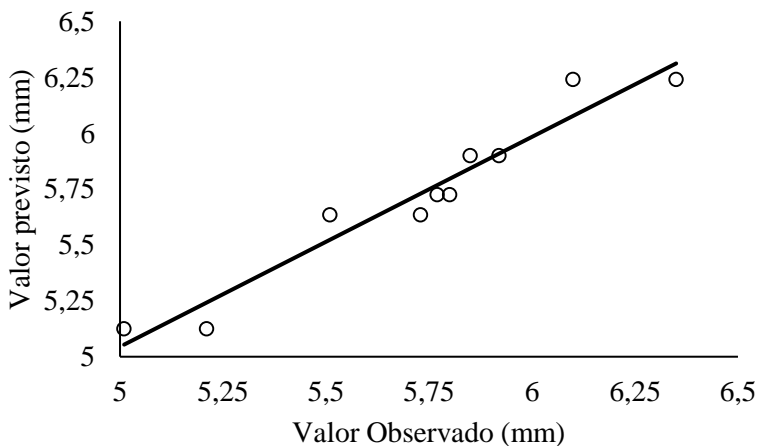
gr = Garganta real (mm);

Va = Velocidade de alimentação em m/min;

FC = Foco da coluna do arco elétrico.

Os valores previstos em comparação com os valores observados, estão plotados no gráfico apresentado na figura 36.

Figura 35 - Valores previstos versus valores observados para a variável garganta real.



Fonte: Do autor, 2017.

## 5.4 MICROSCOPIA ÓTICA

### 5.4.1 Fases formadas

No ensaio, foram registradas as imagens microestruturais com aumento de 100 vezes, a fim de verificar as fases formadas nas áreas

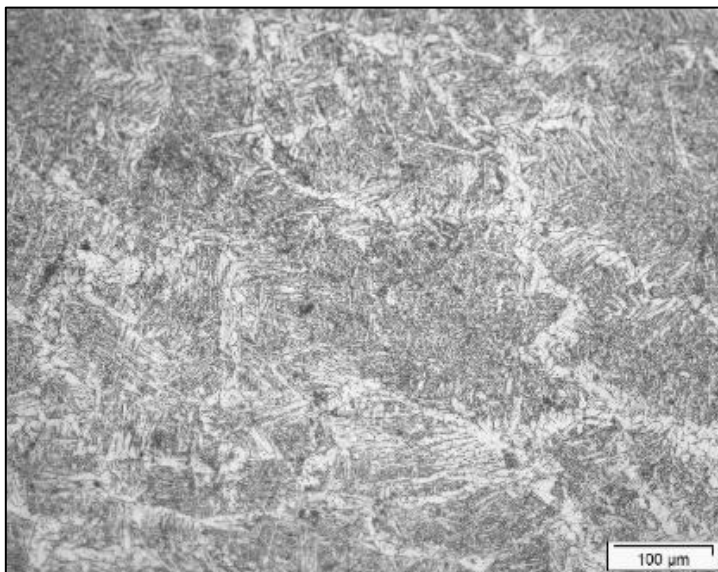
denominadas anteriormente MB-A572, ZTA-A572, MS, ZTA-A36 e MB-A36.

Os metais de base apresentaram matriz de ferrita com presença discreta de perlita, sendo que para o aço ASTM A572 Gr50, a perlita encontra-se orientada no sentido da laminação, como comentado por Silvestre (2012).

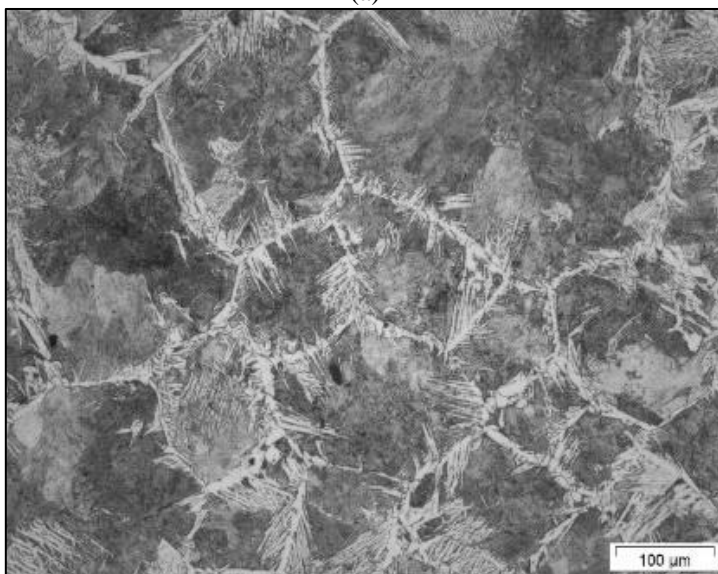
De acordo com Nathan et al. (2015), a microestrutura metálica de juntas soldadas por fusão é influenciada pela entrada de calor do processo. Em geral, maior entrada de calor leva a uma taxa de resfriamento mais lenta que resulta em grãos grosseiros. Contudo, um menor aporte térmico leva a uma taxa de arrefecimento rápida, que resulta em uma microestrutura refinada. Embora a entrada de calor mais baixa possa produzir grãos mais finos em comparação com maior entrada de calor, a natureza intrínseca do processo de soldagem também afeta no refinamento da microestrutura do metal de base.

As fases formadas não se diferenciam entre os casos para cada área analisada, seguindo um padrão de alteração microestrutural com regiões bem definidas, resultantes dos diferentes picos de temperatura atingidos ao longo das chapas. Verificou-se na zona fundida (ZF), Figura 38(a), a formação de ferrita de Widmanstätten. No início da ZTA, identificou-se uma região com tamanho de grão de perlita muito elevado, Figura 38(b), denominada zona de grão grosseiro (ZGG), condição que tende a resultar na perda de resistência mecânica do material e diminuição da tenacidade. São observadas também, no percurso longitudinal em cada chapa, uma região com grãos de perlita intermediários, Figura 38(c), proporcionais as temperaturas atingidas, passando pela região de refino, Figura 38(d), na qual uma menor temperatura de pico proporcionou uma pequena difusão do carbono da ferrita dando origem a pequenas colônias de perlita.

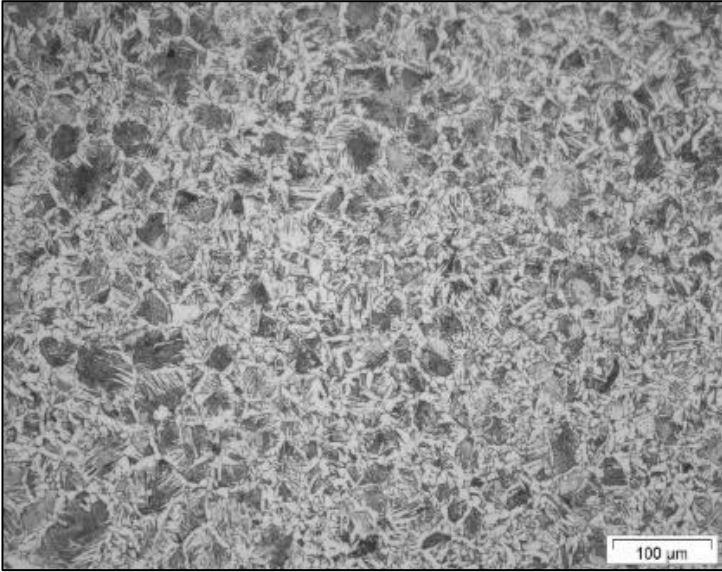
Figura 36 – Padrão observado de alteração microestrutural na região soldada.



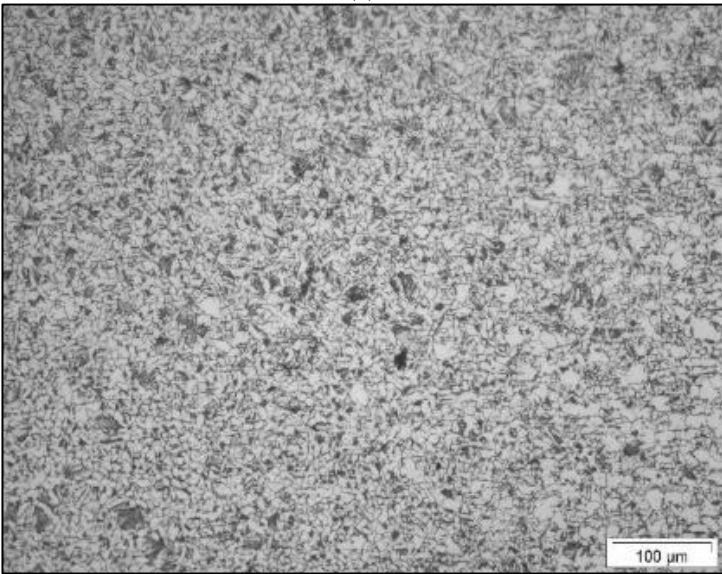
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Do autor, 2017.

Liu et al. (2017), avaliou a microscopia da região soldada em um aço ARBL, com composição química e classe de resistência equivalente ao aço ASTM A572 Gr50. Em sua análise, observaram a mesma alteração microestrutural, sendo que a ferrita e a perlita contidas na ZGG possuem o formato poligonal, o que também foi observado nesta dissertação.

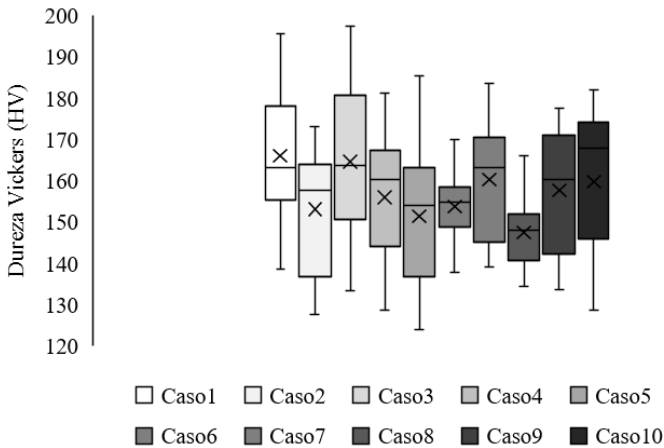
## 5.5 MICRODUREZA

A dureza encontra-se mais baixa no aço ASTM A36, aumenta gradativamente conforme é avançado pela ZTA, atinge seu ponto máximo no metal de solda próximo ao aço ASTM A572 Gr50 e diminui gradativamente conforme se afasta do metal de solda passando pela ZTA, porém o valor final é maior que o inicial, pois a microestrutura do aço ASTM A572 Gr50 possui menor diâmetro médio em comparação ao ASTM A36.

Com os dados de dureza Vickers, foi confeccionado um gráfico de *box-plot*, agrupando em 10 séries, cada série apresenta os dados dos casos. Este gráfico está representado na figura 39, é observado que a dureza está relacionada intrinsecamente ao tamanho de grão, esta influência de forma direta na resistência mecânica e na ductilidade. Percebe-se que as microestruturas com maior tamanho de grão médio, entre as áreas MB-A572, ZTA-A572, ZTA-A36 e MB-A36, apresentaram menor dureza. Lembrando que o tamanho médio de grão e sua desuniformidade foi afetada pela energia de soldagem, a figura 39 mostra que os casos com menor energia de soldagem, obtiveram maiores valores de dureza e maiores dispersões. O inverso é verdadeiro.



Figura 37 - *Box Plot* da dureza agrupada nos casos



Fonte: Do autor, 2017.

## 5.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

No ensaio de resistência à tração, todos os corpos de prova dos casos 1 e 3 romperam na interface da solda com o metal de base ASTM A36, como mostra a figura 40, caracterizando baixa penetração. Os demais corpos de prova romperam no metal de base ASTM A36, mantendo a região soldada íntegra. Desta forma, o ensaio de resistência à tração eliminou os casos 1 e 3 para a verificação da resposta à corrosão eletroquímica, pois representam uma área experimental que não é válida para a aplicação prática. Os resultados de tensão máxima obtidos no ensaio estão descritos na tabela 11.

Figura 38 – Ruptura na interface da solda com o metal de base ASTM A36.



Fonte: Do autor, 2017.

Tabela 10 – Tensões máximas e local da ruptura.

Caso	Va (m/min)	APB	FC	Tensão Máxima (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	3,5	-10	1,0	369,01	74,54
2	5	-10	1,0	499,15	0,94
3	3,5	10	1,0	292,26	103,49
4	5	10	1,0	499,58	8,89
5	3,5	-10	1,5	505,60	2,20
6	5	-10	1,5	493,73	5,12
7	3,5	10	1,5	495,32	3,98
8	5	10	1,5	498,09	7,01
9	4,25	0	1,25	479,15	13,95
10	4,25	0	1,25	501,46	12,89

Fonte: Do autor, 2017.

## 5.7 CORROSÃO ELETROQUÍMICA

A avaliação da corrosão eletroquímica não apresentou correlações significativas neste planejamento experimental, apesar de

que a literatura relaciona o tamanho de grão com a tendência à corrosão. Porém, os valores obtidos mostram diferenças estatisticamente significativas, com 95% de certeza. Desta forma, é importante levar em consideração a taxa de corrosão obtida com os diferentes parâmetros, no momento da otimização do processo.

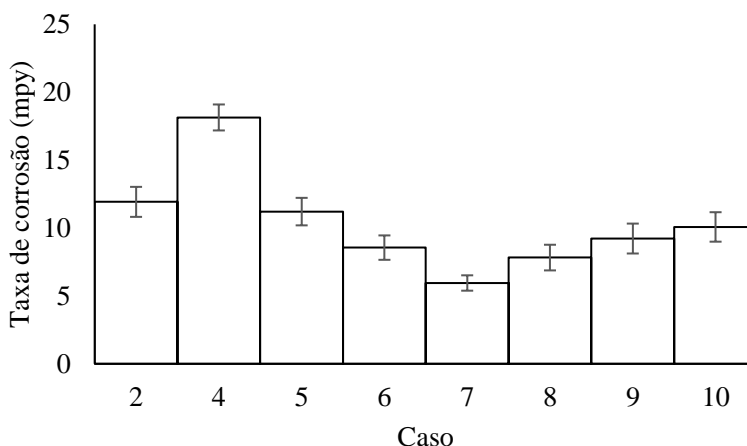
A seguir é apresentada a tabela 12 com os resultados experimentais e a figura 41, que mostra facilmente as diferenças de cada ponto experimental.

Tabela 11 – Resultados da taxa de corrosão em cada caso.

Caso	Taxa de corrosão (mpy)	Desvio Padrão (mpy)
2	11,925	1,105
4	18,141	0,956
5	11,208	1,012
6	8,556	0,899
7	5,95	0,566
8	7,823	0,945
9	9,224	1,101
10	10,079	1,085

Fonte: Do autor, 2017.

Figura 39 – Taxa de corrosão em cada caso.



Fonte: Do autor, 2017.



## 6 CONCLUSÃO

A geometria do cordão de solda pode ser prevista em função da energia de soldagem, esta por sua vez é função da velocidade de alimentação e dos parâmetros de controle da curva de soldagem. De tal forma, é possível prever através das Equações 11 e 12 a energia de soldagem e a garganta real.

Utilizando as equações 11 e 12, pode-se alcançar a otimização da área resistente do filete de solda e da energia gasta, mantendo a microestrutura com propriedades satisfatórias e a penetração suficiente. Para isto, é necessário restringir as equações à uma energia de soldagem mínima de 714 J/mm e a utilização dos ajustes de curva APB entre -10 e 10 e o FC entre 1,0 e 1,5.

A energia de soldagem próxima a 775 J/mm foi responsável por apresentar menor massa de respingos e maior homogeneidade da microestrutura gerada pela soldagem, influenciando diretamente em menores variações de dureza Vickers.



## REFERÊNCIAS

AISC – American Institute of Steel Construction, **Sustainability**. Disponível em: < <https://www.aisc.org/why-steel/sustainability/>>. Acesso em 28 de Fevereiro de 2017.

AMARAL, T. S. **Atlas microestrutural para otimização de procedimentos de soldagem**. 2016. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A36**: Standard Specification for Carbon Structural Steel. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E3**: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8**: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384**: Standard Test Methods for Microindentation Hardness of Materials. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G102**: Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1:2013** Materiais metálicos – Ensaio de tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7007:2016** Aços-carbono e microligados para uso estrutural e geral. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800:2008** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.28:2015** Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. 2015.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1:2015** Structural Welding Code - Steel. 2015.

BAJARES, R. DI MELLA, L. Study of the corrosion rate in the couple of steels ASTM A36 and AISI/SAE 304 in a water-coke of petroleum system. **Proced. Mater. Sci**, v. 8, p. 702-711, 2015.

BARBOSA, **Curso de metalurgia física na laminação de aços microligados**. 50º Seminário de Laminação da ABM, 2013.

BARRA, S. R. **Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida**. 2003. 220 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

BENYOUNIS, K. Y., OLAB, A. G. Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches – A reference guide. **Advances in Engineering Software**, v. 39, p. 483-496, 2008.

CABRAL, T. S. et al. Influência dos procedimentos e modos no processo MAG na redução de deformações em painéis de estruturas navais. **Soldagem e Inspeção**, v. 18, p. 339 – 348, 2013.

CBCA – Centro Brasileiro da Construção em Aço, **Aços estruturais**. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-acos-estruturais.php>>. Acesso em 4 de Janeiro de 2017.

CBCA – Centro Brasileiro da Construção em Aço, **Estatísticas**. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-estatisticas.php>>. Acesso em 4 de Janeiro de 2017.



CBCA – Centro Brasileiro da Construção em Aço, **Sustentabilidade**. Disponível em: < <http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-sustentabilidade.php>>. Acesso em 4 de Janeiro de 2017.

DAVID, S. A. **Proceedings Trends in Welding Research**. ASM International, 2012.

GERDAU – Gerdau S.A., **Perfis estruturais Gerdau**. Disponível em: < <https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/perfis-estruturais-gerdau#ad-image-0>>. Acesso em 7 de Julho de 2017.

GORNI, A. A. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. **Corte & Conformação de Metais**, p.26 – 57, 2008.

HE, J. **Q235 steel welding joint organization structure on the properties of weld corrosion impact study**. 2014. Ph.D. Dissertation Northeast Petroleum University, Daqing, China.

HUTCHINSON, B., KOMENDA, J., ROHRER, G. S., BELADI, H. Heat affected zone microstructures and their influence on toughness in two microalloyed HSLA steels. **Acta Materialia**. v. 97 p. 380-391, 2015.

ICHIKAWA, K. FUJIOKA, M. UEMORI, R. YOSHIE, A. Progress in Thermomechanical Control Process Steel Plates. **International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels, AIST**, 2011.

INSTITUTO AÇO BRASIL, **Parque siderúrgico**. Disponível em: < <http://www.acobrasil.org.br/site2015/parque.asp>>. Acesso em 29 de Agosto de 2017.

LAN, L. et al. Microstructural characteristics and toughness of the simulated coarse grained heat affected zone of high strength low carbon bainitic steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 529, p. 192-200, 2011.

LINCOLN ELETRIC. **Gas Metal Arc Welding Product and Procedure Selection**. 2009. 96 p.

- LIU, W. et al. Corrosion behavior of the high strength low alloy steel joined by vertical electro-gas welding and submerged arc welding methods. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 25, p. 418-425, 2017.
- MACHADO, I. G. Dimensionamento de juntas soldadas de filete: uma revisão crítica. **Soldagem e Inspeção**, v. 16, p. 189-201, 2011.
- MEESTESER, B. The Weldability of Modern Structural TMCP Steels. **ISIJ International**, v. 37, p. 537 – 551, 1997.
- MENESES, V. A., GOMES, J. F. P., SCOTTI, A. The effect of metal transfer stability (spattering) on fume generation, morphology and composition in short-circuit MAG welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, p. 1388 – 1397, 2014.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. Quinta edição J. W. Inc, 2014. 284 p.
- MORRISON, W. **Overview of Microalloying in Steel**. The Proceedings of the Vanitec Symposium, 2000.
- M, R. E. The effect of corrosion on the structural reliability of steel offshore structures **Corrosion Science** 47, p. 2391 – 2410, 2005.
- NATHAN, S. R.; Balasubramanian, V.; Malarvizhi, S.; Rao, A. G. Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints. **Defence Technology**, v. 11, n. 3, p. 308-317, 2015.
- NORRISH, J., CUIURI, D. The controlled short circuit GMAW process: A tutorial. **Journal of Manufacturing Process**, v. 16, p. 86 – 92, 2013.
- PFEIL, W. **Estruturas de Aço Dimensionamento Prático**. 8ª edição. Rio de Janeiro, RJ. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2009. 357 p.
- SCOTTI, A., LI, H., MIRANDA, R. M. Um Round-Robin Teste com Simulação Térmica da ZAC de Soldagem para Obtenção de Diagramas

CRC: a necessidade de procedimentos e terminologia de microconstituintes harmonizados. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 19, p. 279 - 290, 2014.

SCOTTI, A., PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG Melhor entendimento Melhor desempenho**. Rio de Janeiro, RJ. Artliber, 2014. 284 p.

SILVESTRE, L. et al. High Strength Steel as a Solution for the Lean Design of Industrial Buildings. **jmr&t Journal of Materials Research and Technology**, p. 35 – 41, 2014.

SRIVASTAVA, S., GARG, R. K. Process parameter optimization of gas metal arc welding on IS:2062 mild steel using response surface methodology. **Journal of Manufacturing Process**, v. 25, p. 296 – 305, 2017.

SUN, Q. et al. A comparative study of the microstructure and properties of 800 MPa microalloyed C-Mn steel welded joints by laser and gas metal arc welding. **Materials Science & Engineering A**, v. 669, p. 150 – 158, 2016.

TURANI, L. O. **A Tecnologia CLC de produção de Chapas Grossas aplicada à indústria de Petróleo e Gás**. Apresentação ao II Seminário de Óleo, Gás e Energias Renováveis, 2010.

XING, S., DONG, P., WANG, P. A quantitative weld sizing criterion for fatigue design of load-carrying fillet-welded connections. **International Journal of Fatigue**, v. 101, p. 448 – 458, 2017.

XU, S. et al. Effects of corrosion on surface characterization and mechanical properties of butt-welded joints. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 126, p. 50 – 62, 2016.

ZENG, M., HUANG J., ZHANG, Y., Hu, P., Modeling for GMAW process with a current waveform control method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 240, p. 404-413, 2017.

ZHANG, Y. M. Arc Physics of Gas Tungsten and Gas Metal Arc Welding. **Welding Fundamentals and Process**, v. 6A, p. 249 – 259, 2011.

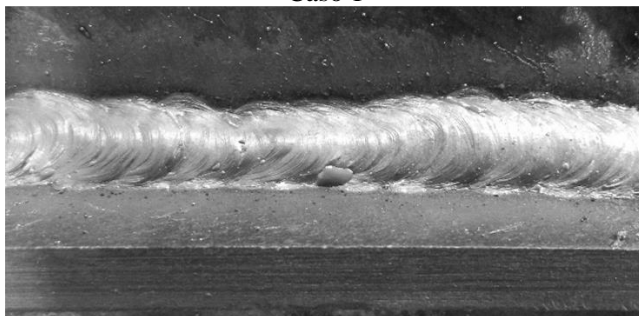
WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo, SP. Edusp, 2002. 163 p.

## APÊNDICES

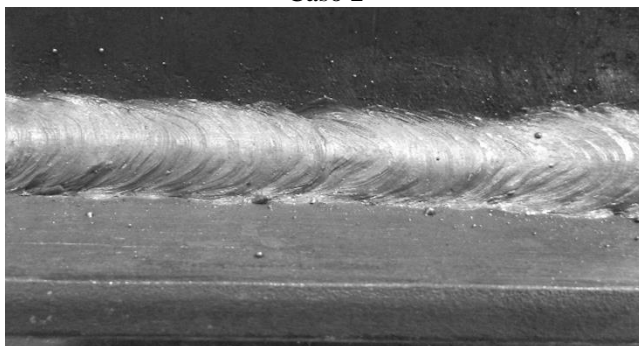


APÊNDICE A – Imagens de um cordão para cada caso.

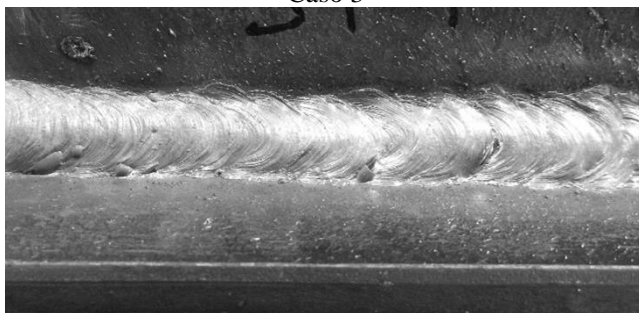
Caso 1



Caso 2



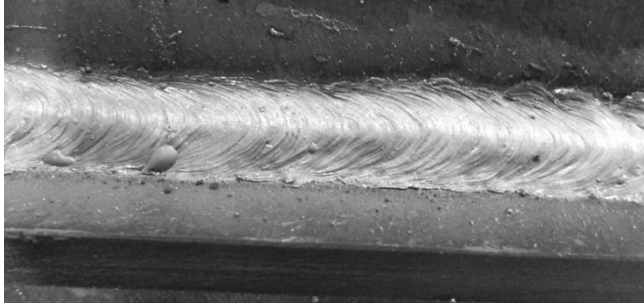
Caso 3



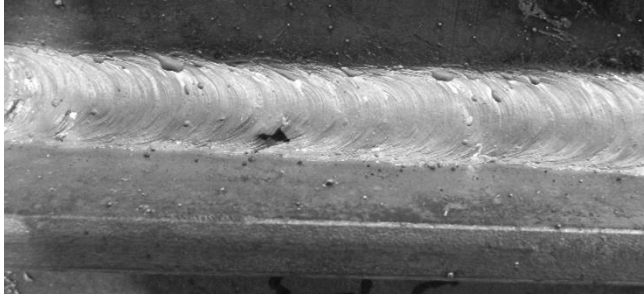




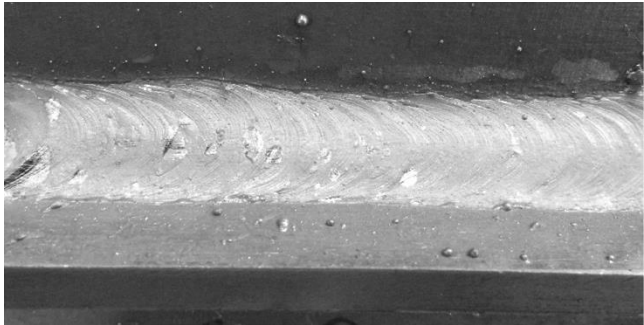
Caso 4



Caso 5

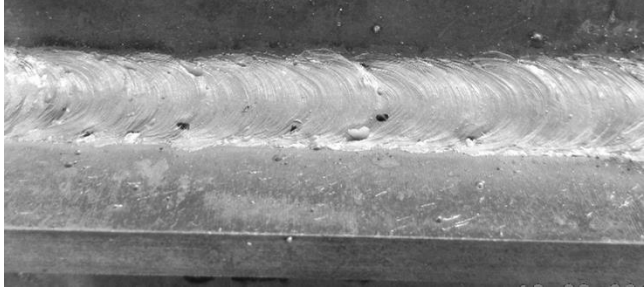


Caso 6

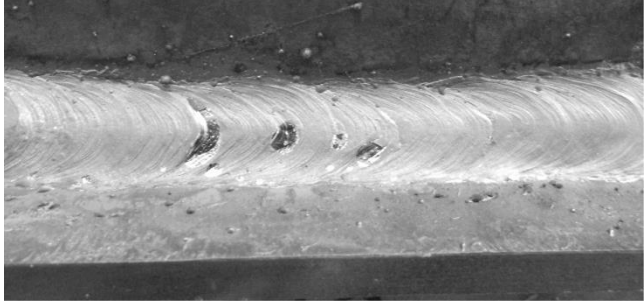




Caso 7



Caso 8



Caso 9 e 10

