



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

JOSHUA ALYSON FREITAS RIBEIRO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE ALTERAÇÃO DE PROCESSO DE
SOLDAGEM DE FCAW PARA GMAW PARA POSSÍVEL REDUÇÃO
DE CUSTOS EM INDÚSTRIA DE ESTRUTURAS METÁLICAS**

FORTALEZA

2017

JOSHUA ALYSON FREITAS RIBEIRO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE ALTERAÇÃO DE PROCESSO DE
SOLDAGEM DE FCAW PARA GMAW PARA POSSÍVEL REDUÇÃO
DE CUSTOS EM INDÚSTRIA DE ESTRUTURAS METÁLICAS**

Monografia submetida ao Corpo Docente do
Curso de Engenharia Metalúrgica da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
para obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na
Publicação Universidade
Federal do Ceará
Biblioteca
Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R369e Ribeiro, Joshua Alyson Freitas Ribeiro.
ESTUDO DA VIABILIDADE DE ALTERAÇÃO DE PROCESSO DE SOLDAGEM DE
FCAW PARA GMAW PARA POSSÍVEL REDUÇÃO DE CUSTOS EM INDÚSTRIA DE
ESTRUTURAS METÁLICAS /
Joshua Alyson Freitas Ribeiro Ribeiro. – 2017.
64 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de
Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta.

1. Custo de Soldagem. 2. FCAW. 3. GMAW. 4. Aço Estrutural. I. Título.

CDD 669

JOSHUA ALYSON FREITAS RIBEIRO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE ALTERAÇÃO DE PROCESSO DE
SOLDAGEM DE GMAW PARA FCAW PARA POSSÍVEL REDUÇÃO
DE CUSTOS EM INDÚSTRIA DE ESTRUTURAS METÁLICAS**

Monografia submetida ao Corpo Docente do
Curso de Engenharia Metalúrgica da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
para obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta

Aprovada em ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Cleiton Carvalho Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Willys Machado Aguiar
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pelo dom da sabedoria.

Aos meus pais e minha irmã por todo o amor, dedicação e, principalmente, pelo apoio incondicional.

À minha família que sempre acreditou e depositou toda a confiança no meu trabalho.

À minha namorada, Mirella Maia, pela motivação incessante, por todos os conselhos, pelo companheirismo e por toda ajuda.

À família da minha namorada, por ter me acolhido como parte dela, me orientando com palavras de sabedoria e incentivo.

À todos os professores e prestadores do Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará.

À empresa Projeart - Indústria de Estruturas Metálicas pela colaboração no projeto e pela concessão de parte do material empregado na pesquisa, além da oportunidade de aprendizado sem igual oferecida durante o período de estágio.

Ao Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta, pelos ensinamentos, pela confiança depositada e por não medir esforços para ajudar no que fosse preciso.

Aos bolsistas Matheus, Ronald, Yanka, Bruno Ribeiro, Marília e Aglailton do LPTS – UFC, pela imensa ajuda realizada e aos demais bolsistas por todo auxílio oferecido.

Aos colegas de curso e em especial aos amigos Davi, Diego, Emmanuel, Pedro, Roberto, Isaac, Bernardo e Israel por todos os momentos de alegria e por todo o conhecimento compartilhado ao longo desses anos.

Aos amigos Raissa, Yago, Mariana, David e João Pedro pelas palavras de apoio e incentivo nos momentos mais difíceis e nos momentos de felicidade compartilhados.

RESUMO

O processo de soldagem na indústria de estruturas metálicas é um dos mais importantes, pois é fundamental para a segurança das estruturas e para o custo final. Por ser um processo com várias alternativas no mercado e possuir muitas variáveis envolvidas, nem sempre as empresas escolhem a melhor metodologia para cada aplicação. Os processos mais utilizados são o GMAW e FCAW, pela alta produtividade, fácil implantação de equipamentos na empresa, entre outros fatores. A empresa em que foi realizada esta pesquisa utiliza-se do processo FCAW para soldagem de juntas sobrepostas de pilares metálicos fabricados a partir do aço ASTM A572GR42. Para analisar a viabilidade de mudança de processo, foram estudadas duas condições alternativas: soldagem com arame maciço ER70S-6 e gás de proteção CO₂ utilizando transferência por curto-circuito e soldagem com o mesmo arame utilizando como gás de proteção Ar +4%CO₂. Após a realização de alguns testes e levantamento de preços de consumíveis, foi constatado que mesmo o arame tubular sendo mais caro, ele ainda é mais vantajoso economicamente para esta aplicação, já que o gás utilizado na condição que permitiu maior velocidade de soldagem para o arame maciço é muito mais caro que o CO₂ puro.

Palavras-chave: Custo de soldagem; FCAW; GMAW; Aço Estrutural

ABSTRACT

The welding process in the metal structures industry is one of the most important, as it is fundamental for the safety of the structures and for the final cost. Because it is a processes with several alternatives in the market and has many variables involved companies not always choose the best methodology for each application. The most used processes are GMAW and FCAW, because of their high productivity, easy deployment of equipment at the company, among other factors. The industry in wich this research was carried out, uses the FCAW process for welding overlapping joints of metallic pillars made from ASTM A572GR42 steel. In order to analyze the feasibility of changing the process, two alternative conditions were studied: welding with the solid wire ER70S-6 and CO₂ as shield gás, using the short circuit transfer and welding with the same wire, but using the Ar + 4%CO₂ as shield gas. After conducting some tests and taking some prices of the consumables, it was found that even the FCAW process uses a more expensive wire, it still more economically viable for this application, since the gas used in the condition that allowed a competitive speed of welding is much more expensive than the CO₂

Key words: Welding, FCAW, GMAW, welding cost, structural steel

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Secções de perfis laminados - padrão americano	7
Figura 2 – Exemplos de perfis soldados	7
Figura 3 – Exemplos de perfis estruturais formados a frio.	8
Figura 4 – Tipos de juntas de acordo com norma AWS D1.1.....	9
Figura 5 – Posições de soldagem conforme AWS.....	10
Figura 6 – Esquemático do processo GMAW.....	11
Figura 7 – Ilustração do processo de soldagem FCAW.....	13
Figura 8 – Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW.....	15
Figura 9 – Etapas da transferência por curto-circuito: A e B – Arco existente; C – Momento de curto-circuito; D – restabelecimento do arco.....	16
Figura 10 – Fluxograma das etapas do Trabalho.....	20
Figura 11 – Bancada automatizada utilizada na empresa. (1) tocha (2) carro tartaruga (3) suporte das peças (4) alimentador de arame.....	21
Figura 12 – Fonte de soldagem utilizada na empresa.	22
Figura 13 – a) (1)Fonte de soldagem IMC – Digiplus A7 DCDU (2) sistema de resfriamento. b) Aspecto da junta sobreposta.	24
Figura 14 – Bancada Robotizada I do LPTS – UFC (1) tocha (2) alimentador de arame (3) cilindro de gás de proteção (4) corpo de prova (5) exaustor. Erro! Indicador não definido.	
Figura 15 – Bancada Robotizada I do LPTS – UFC (1) tocha (2) alimentador de arame (3) cilindro de gás de proteção (4) corpo de prova (5) exaustor.	24
Figura 16 – Aparato para realização de macrografias (1) câmera fotográfica (2) suporte para câmera (3) iluminação.....	25
Figura 17 – Microdurômetro Leco LM110AT disponibilizado pelo LPTS-UFC..... Erro! Indicador não definido.	
Figura 18 – Microdurômetro Leco LM110AT disponibilizado pelo LPTS-UFC..... Erro! Indicador não definido.	
Figura 19 – Microdurômetro Leco LM110AT disponibilizado pelo LPTS-UFC.....	29
Figura 20 – Cordões de solda realizados no LPTS - UFC para Etapa II.	30
Figura 21 - Perfil de penetração dos ensaios a) realizado na empresa (E01) b)L1 c) L2 d)L3 e)L4	30
Figura 22 – Gráfico de IVcc x Tensão (V) para as velocidades de alimentação a) 4,0m/min b) 4,5m/min c) 5,0m/min.....	32

Figura 23 – Cordões de solda com velocidade de alimentação de 3,5 m/min e tensão de a) 18V b) 19V c)20V d) 21V.....	33
Figura 24 - Cordões de solda com velocidade de alimentação de 4,0 m/min e tensão de a) 19V b) 20V c)21V d) 22V	33
Figura 25 - Cordões de solda com velocidade de alimentação de 4,5 m/min e tensão de a) 19V b) 20V c)21V d) 22V e) 23V f) 24V	33
Figura 26 - Cordões de solda com velocidade de alimentação de 5,0 m/min e tensão de a) 19V b) 20V c)21V d) 22V e) 23V.....	34
Figura 27 – Cordões de solda a) T01 b) T02 c) T03 d) T04	35
Figura 28 – Cordões de solda a) T05 b) T06 c) T07 d) T08	36
Figura 29 – Cordões de solda a) T09 b) T10 c) T11 d) T12	36
Figura 30 – Cordões de solda a) T013 b) T014 c) T15 d) T16	37
Figura 31 – Cordões de solda na junta sobreposta com transferência por curto-circuito a) DCC1 b) DCC2	38
Figura 32 - Gráficos de tensão e corrente para o ensaio DCC1a) Intervalo de 7 – 7,18s b) Intervalo de 7 – 9,5s.....	38
Figura 33 - Gráficos de tensão e corrente para o ensaio DCC2 a) Intervalo de 7 – 7,18s b) Intervalo 4 – 6,5s	39
Figura 34 – Macrografias de a) ensaio E01 b) ensaio DCC2.....	39
Figura 35 - Cordões de solda na junta sobreposta com arame tubular (E01).....	40
Figura 36 - Cordões de solda na junta sobreposta com transferência goticular e arame sólido a) DGT1 b)DGT2	41
Figura 37 – Gráficos de tensão e corrente para o ensaio E01 a) Intervalo de 9 – 9,3s e b) Intervalo de 8 – 10s.....	41
Figura 38 – Gráficos de tensão e corrente para o ensaio DGT1 a) Intervalo de 7 – 7,18s b) 3 – 6,5s.	41
Figura 39 - Gráficos de tensão e corrente para o ensaio DGT2 a) Intervalo de 7 – 7,18s b) Intervalo de 4,5 – 7,5s.....	42
Figura 40 - Macrografias de a) ensaio E01 b) ensaio DGT1	42
Figura 41 – Micrografias no aumento de 200X da região da Zona Fundida, Zona Termicamente Afetada e Metal de Base da peças a) E01 b) DCC2 c) DGT1	43
Figura 42 - Micrografias da peça E01 no aumento de 500X representando a) Zona Fundida b) Zona Termicamente Afetada de Grãos Grossos c) Zona Termicamente Afetada de Grãos Finos.....	44

Figura 43 - Micrografias da peça DCC2 no aumento de 500X representando a) Zona Fundida b) Zona Termicamente Afetada de Grãos Grossos c) Zona Termicamente Afetada de Grãos Finos.....	44
Figura 44 – Micrografias da peça DGT1 no aumento de 500X representando a) Zona Fundida b) Zona Termicamente Afetada de Grãos Grossos c) Zona Termicamente Afetada de Grãos Finos.....	45
Figura 45 – Perfil de microdureza das peças a) E01 e b) DGT1	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Influência dos elementos de adição em algumas propriedades do aço.....	5
Quadro 2 – Exemplos de aços microligados e suas respectivas características.	6
Quadro 3 - Compatibilidade do metal de base com o metal da solda.....	10
Quadro 4 – Formas comuns de transferência metálica segundo a IIW.....	14
Quadro 5 – Composição química do aço	19
Quadro 6 – Composição química dos arames.	19
Quadro 7 – Parâmetros fixos para soldagem realizada na empresa.....	22
Quadro 8 – Dados experimentais para Etapa II.....	23
Quadro 9 – Parâmetros fixos na Etapa II	23
Quadro 10 – Dados experimentais para Etapa III.....	26
Quadro 11 – Dados experimentais para Etapa IV	27
Quadro 12 – Parâmetros fixos para solda em laboratório na Etapa IV.....	27
Quadro 13 – Análise dos sinais das soldas sobre chapa quanto ao índice de Vilarinho.....	31
Quadro 14 – Comparação entre os menores IVcc.	34
Quadro 15 – Análise dos sinais de solda sobre chapas com transferência goticular.....	35
Quadro 16 – Resultados obtidos com a soldagem na junta sobreposta no modo de transferência por curto-circuito.	38
Quadro 17 – Resultados obtidos com a soldagem na junta no modo de transferência goticular.	40
Quadro 18 – Levantamento de custo por centímetro de solda na soldagem realizada no laboratório com transferência por curto-circuito, arame maciço ER70S-6 e CO ₂	48
Quadro 19 – Levantamento de custo por centímetro de solda na soldagem realizada no laboratório com transferência goticular, arame maciço ER70S-6 e Ar + 4%CO ₂	49
Quadro 20 – Levantamento de custo por centímetro de solda na soldagem realizada na indústria com transferência goticular, arame tubular E71T-1 e CO ₂	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Aços Estruturais	4
3.2. Aços para construção civil	5
3.3. Tipos de perfis estruturais	7
3.4. Juntas soldadas	8
3.5. Processo MIG/MAG (GMAW)	11
3.5.1. Vantagens do processo MIG/MAG (GMAW)	12
3.5.2. Desvantagens do processo MIG/MAG (GMAW)	12
3.6. Processo Arame tubular (FCAW)	12
3.6.1. Vantagens do processo (FCAW)	13
3.6.2. Desvantagens do processo (FCAW)	13
3.7. Transferência metálica e gases de proteção	14
3.7.1. Tipos de transferências metálicas	14
3.7.2. Transferência por curto-circuito	15
3.7.3. Transferência goticular	16
3.7.4. Influência do Ar e CO₂ na soldagem	17
3.8. Cálculo do custo de soldagem	18
4. MATERIAIS E METODOLOGIA	19
4.1. Preparação das amostras	20
4.1.1. Etapa I – Preparação da amostra soldada na metodologia abordada pela empresa 20	
4.1.2. Etapa II – Avaliação de penetração da junta soldada com transferência por curto-circuito	22
4.1.3. Determinação da melhor condição de soldagem por curto-circuito	25

4.1.4.	<i>Etapa IV – Solda sobre chapas em transferência goticular</i>	26
4.1.5.	<i>Etapa V – Comparativo entre as soldagens abordadas</i>	27
4.1.6.	<i>Metalografia</i>	27
4.2.	Microdureza	28
4.3.	Cálculo de Custo	29
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5.1.	Análise do perfil de penetração das soldagens realizadas na Etapa II	30
5.2.	Etapa III – Escolha da melhor condição para curto-circuito	31
5.3.	Etapa IV – Escolha da melhor condição para transferência goticular	34
5.4.	Etapa V – Comparação das soldagens na junta sobreposta	37
5.4.1.	<i>Soldagem em curto-circuito na junta sobreposta</i>	37
5.4.2.	<i>Soldagem em transferência goticular na junta sobreposta</i>	40
5.5.	Microestruturas	42
5.6.	Microdureza	46
5.7.	Custos	47
6.	CONCLUSÕES	50
7.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	51

1. INTRODUÇÃO

Surgida na Inglaterra, há cerca de 200 anos, a construção em aço aprimora cada vez mais sua tecnologia e contribui para o desenvolvimento do setor siderúrgico em todo o mundo. A história deste tipo de construção no Brasil é mais recente, tendo início no final do século XX, ainda na forma de estruturas pré-fabricadas e importadas que atendiam às demandas crescentes de pontes e edifícios. Foi apenas após a implantação da primeira siderúrgica integrada instalada no país, em 1946, que o aço importado começou a ser substituído pelo produto de fabricação nacional.

A construção civil corresponde ao setor que mais consome produtos siderúrgicos no Brasil, bem como no resto do mundo. Em 2013, por exemplo, correspondia a aproximadamente 37% do total do consumo aparente de aço no Brasil. Pesquisas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística indicam que a construção em aço cresceu no país ao ritmo de 11% ao ano, em média, no período entre 2002 e 2012, alcançando o consumo de 1,7 milhões de toneladas. (CBCA, 2015)

A objeção cultural da aplicação do aço na construção civil brasileira, aliada com o crescimento tardio deste seguimento são responsáveis pelo atraso do país neste campo, atualmente em fase de expansão, devido, em parte, aos esforços dos produtores de aço que buscam inserir o material no mercado da construção civil e elevar sua aplicabilidade. (TEOBALDO, 2004)

Os aços utilizados na construção civil ou aços estruturais possuem certas propriedades específicas de resistência mecânica, resistência à corrosão, entre outras. Estes tipos de propriedades variam de acordo com a presença de alguns elementos de liga que conferem características próprias aos diferentes tipos de aço. São apresentados em diferentes normas de dimensionamento, como: NBR 8800, AISC/LRFD e AISI/LRFD.

Um dos principais fatores da produção de estruturas em aço é a soldagem. Os elementos soldados são responsáveis por proporcionar maior rigidez e, em algumas situações, por reduzir o custo de fabricação.

Pensando na redução dos custos, as empresas atuais buscam sempre processos que tenham alta produtividade, dentre eles, os que mais se destacam são os processos GMAW (Gas Metal Arc Welding) e FCAW (Flux Cored Arc Welding), que foram desenvolvidos para

possuírem alimentação contínua de eletrodo e proporcionarem uma otimização tanto no tempo quanto na qualidade de soldagem.

Ambas as operações de soldagem envolvem um grande número de variáveis que podem influenciar no custo final, algumas delas são: o uso de consumíveis (eletrodos, gases de proteção, fluxos, entre outros), os custos de equipamentos, os custos de manutenção, as ferramentas e a depreciação dos equipamentos. Devido à semelhança entre os processos, a decisão de qual metodologia adotar torna-se bastante complicada.

A diferença entre os custos do processo FCAW e do processo GMAW está basicamente no investimento gasto nos consumíveis e na produtividade alcançada com cada processo. A indústria em questão utiliza o processo FCAW com proteção gasosa para todos os tipos de soldagem com a justificativa que a produtividade do processo é maior e o gás de proteção é mais barato para se obter o mesmo modo de transferência no processo GMAW. Porém, também existem desvantagens como o maior risco de obtenção de inclusões de escória, o maior custo por quilograma de arame, além de a necessidade de uma maior velocidade de alimentação para o mesmo volume de metal adicionado no processo GMAW.

Na expectativa de diminuir os custos na de soldagem de perfis em caixa para pilares metálicos fabricados na empresa, foi realizado um estudo comparativo entre o atual processo empregado (FCAW) e a soldagem GMAW, empregando um eletrodo de custo inferior.

O presente trabalho fornecerá informações técnicas e resultados referentes ao comportamento metalúrgico, mecânico e, principalmente, econômico sobre a aplicação dos processos de soldagem por MIG/MAG (material de adição ER70S-6) e arame tubular (material de adição E71T-1), em juntas sobrepostas, tendo como metal de base a liga ASTM A572 GR42, de 4,75mm de espessura.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a possibilidade de alteração do processo de soldagem de FCAW para GMAW em juntas sobrepostas de pilares metálicos formados por perfis dobrados a frio, comparando a solda realizada na indústria com duas variações de transferência e proteção gasosa para o processo GMAW.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Determinar os parâmetros mais adequados para soldagem das juntas com o processo GMAW utilizando o arame sólido ER70S-6 no modo de operação tensão constante e transferência por curto-circuito e goticular utilizando, respectivamente, os gases CO₂ puro e Ar + 4%CO₂.
- Obter cordões com características parecidas com as presentes na soldagem realizada na empresa e que possuam uma produtividade alta e competitiva.
- Comparar as microestruturas presentes nas diferentes zonas adjacentes à zona fundida em todos os processos abordados pelo trabalho.
- Avaliar a possibilidade de redução de custos pela mudança de consumível utilizado

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aços Estruturais

Por combinar boas características como resistência mecânica, trabalhabilidade, disponibilidade e baixo custo, o aço ocupa uma posição bastante importante entre os materiais de construção. Portanto, é compreensível a importância e a vasta aplicabilidade dos aços em todos os campos da engenharia.

Em certas aplicações dos aços estruturais, a importância da resistência mecânica é relativamente pequena, assim como o fator peso. Nestes casos, os aços-carbono comuns, simplesmente laminados, sem tratamentos térmicos, possuem propriedades satisfatórias.

Porém, em outras situações, a relação resistência mecânica/peso deve ser mais satisfatória. Além disso, deve-se ter mais atenção na resistência à corrosão, já que em seções mais leves, a perda de resistência por ação corrosiva pode ser fatal. Para estas aplicações, os aços indicados são os de baixo teor em liga.(CHIAVERINI,1998)

Com a tendência de se utilizar estruturas cada vez maiores, o uso de aços mais resistentes é fundamental para evitar o uso de estruturas cada vez mais pesadas. Isto se aplica tanto em estruturas fixas como em estruturas móveis. Portanto, a utilização deste material é fundamental quando se deseja propriedades como maior resistência mecânica, melhorar a resistência à corrosão atmosférica, melhorar a resistência ao choque e o limite de fadiga e elevar a relação do limite de escoamento para o limite de resistência à tração, sem grandes perdas de ductilidade. (CHIAVERINI, 1998)

As principais características dos aços estruturais são determinadas pela composição química. A elevação no teor de carbono constitui a maneira mais econômica para obtenção de resistência mecânica dos aços, para que o aço seja classificado como resistente à corrosão atmosférica, o teor limite de carbono é de 0,20%.

O manganês é outro elemento que confere alta resistência mecânica, mas afeta negativamente a soldabilidade do material. O silício favorece sensivelmente a resistência mecânica e a resistência à corrosão, porém, também reduz a soldabilidade.

O enxofre, em geral, se caracteriza como um elemento prejudicial aos aços, pois diminui a ductilidade, em especial o dobramento transversal, além de reduzir a soldabilidade. Nos aços comuns, o teor de enxofre é limitado a valores abaixo de 0,05%. O fósforo aumenta o limite de resistência, aumenta a resistência à corrosão e a dureza, porém, prejudica a

ductilidade e a soldabilidade, além disso, acima de determinados teores, o fósforo torna o aço quebradiço.

O cobre aumenta a resistência à corrosão atmosférica, em adições de até 0,35%, aumenta, também, a resistência à fadiga e reduz de forma discreta propriedades como a ductilidade, a tenacidade e a soldabilidade. O titânio aumenta o limite de resistência, a resistência à abrasão e melhora o desempenho do aço em altas temperaturas, além de ajudar a evitar o envelhecimento precoce. O cromo aumenta a resistência mecânica à abrasão e à corrosão atmosférica, mas também reduz a soldabilidade. (PRAVIA e DREHMER, 2004)

Quadro 1 – Influência dos elementos de adição em algumas propriedades do aço.

PROPRIEDADES	ELEMENTOS								
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ti	Cr	Nb
RESISTÊNCIA MECÂNICA	+	+	+	-	+		+	+	+
DUCTILIDADE	-	-		-	-	-		-	-
TENACIDADE	-			-					+
SOLDABILIDADE	-	-	-	-	-	-		-	
RESISTÊNCIA À CORROSÃO	-		+		+	+	+	+	
DESOXIDANTE		+	+						

LEGENDA: (+) efeito positivo (-) efeito negativo

Fonte: (PRAVIA e DREHMER, 2004)

3.2. Aços para construção civil

Existem inúmeras vantagens dos aços na construção civil, podendo ser citado o fato de serem pré-fabricados, possuírem dimensões reduzidas com uma boa resistência, isotropia mecânica. Além disso, os elementos são produzidos em fábricas onde a produtividade pode ser otimizada, sendo padronizada e executada com maior agilidade e quantidade. As dimensões das peças podem ser bastante precisas e o material é enviado à obra em seu estado final, pronto para ser montado. Existe também uma maior facilidade de transporte, instalação das peças e de execução da obra (TEOBALDO, 2004)

Os aços para construção civil estão classificados entre os de média e alta resistência mecânica, que devido às suas propriedades são adequados para a utilização em elementos da construção sujeitos a algum tipo de carga.(CCBA, 2014)

Os aços de alta resistência mecânica e baixa liga são os principais materiais utilizados para a construção de estruturas metálicas. Segundo Pannoni (2005), são desenvolvidos a partir de alguns aços de baixo carbono com adições de até 2% de Mn e outros elementos em níveis muito baixos. Apresentam maior resistência mecânica que o mesmo aço sem as adições citadas, mantendo a ductilidade e soldabilidade, sendo destinados às estruturas onde a

soldagem é fundamental, assim como a resistência. Algumas informações sobre este tipo de aço estão presentes no Quadro 2. (PANNONI, 2005)

Quadro 2 – Exemplos de aços microligados e suas respectivas características.

Aços microligados comumente ofertados			
Graus ASTM	Limite de escoamento (mínimo, Mpa)	Principais elementos de liga	Formas Típicas
A 242 (2 graus)	290 - 345	Mn, Cu, Cr, Ni	Chapas grossas, perfis laminados a quente
A 440	290 - 345	Mn, Cu, Si	Chapas grossas, perfis laminados a quente
A 441	275 - 345	Mn, V, Cu, Si	Chapas grossas, perfis pesados, laminados a quente
A 572 (6 graus)	290 - 450	Mn, Nb, V, N	Chapas grossas, perfis, laminados a quente
A 588 (10 graus)	290 - 345	Mn, Nb, Cu, Cr, Si, Ti	Chapas grossas, perfis, laminados a quente
A 606 (4 graus)	240 - 345	Mn	Tiras a quente e chapas finas
A 607 (6 graus)	290 - 485	Mn, Nb, V, Ni, Cu	Tiras a quente e chapas finas
A 618 (3 graus)	345	Mn, Nb, V, Si	Tubos estruturais
A 633 (5 graus)	320 - 410	Mn, V, Cr, N, Cu	Perfis para serviço em baixas temperaturas
A 656 (2 graus)	550	Mn, V, Al, N, Ti	Chapas grossas para veículos
A 715 (4 graus)	345 - 550	Mn, V, Cr, Nb, N	Tiras a quente e chapas finas

Fonte: (PANNONI, 2004)

Existem vários produtos oferecidos pelas siderúrgicas como elementos ou componentes estruturais, entre eles estão: chapas finas laminadas a frio, chapas zincadas, chapas finas laminadas a quente, chapas grossas, fios trefilados, cabos, perfis laminados estruturais, tubos estruturais, barras redondas e cordoalhas.

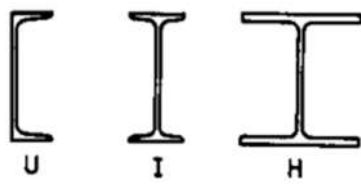
As chapas finas laminadas a frio são produtos com espessura de 0,30mm a 2,65mm, oferecidas em bobinas e usadas, principalmente, como complementos em construções, como venezianas, calhas, rufos, esquadrias e dobradiças. As chapas zincadas possuem espessura entre 0,25mm a 1,95mm, fornecidas em bobinas e utilizadas na fabricação de elementos de cobertura e tampamentos, calhas, rufos, dutos de ar condicionado e divisórias. Já as chapas finas a quente são oferecidas em espessuras de 1,20mm a 5,0mm, embobinadas e utilizadas para fabricação de chapas dobradas, terças e vigas de tampamento. As chapas grossas são produtos com espessuras de 6,30mm a 102mm, fornecidas em chapas com diversas larguras-padrão e comprimentos de 6000mm ou 12000mm. São utilizadas para confecção de perfis soldados e sapatas de vigas e pilares. (PRAVIA e DREHMER, 2004)

3.3. Tipos de perfis estruturais.

Os perfis estruturais são diferenciados pelo tipo de fabricação, as principais classificações são: perfis laminados, perfis soldados, perfis estruturais formados a frio e os perfis tubulares.

Os perfis laminados são obtidos a partir do processo sequencial entre lingotamento contínuo e perfilação, onde laminadores com cilindros conformadores deformam o material até o estado final. No Brasil, utiliza-se do padrão americano e os diferentes formatos são: perfil “H”, que são indicados em aplicações com solicitação predominante na compressão axial, pois possui boa resistência à flexão em relação ao eixo y-y, o que torna este tipo de peça mas resistente à flambagem; perfil “I”, melhor aproveitado como peça fletida em torno do eixo x-x, pois atinge tensões altas de forma acelerada quando flexionados em relação ao eixo y-y; perfis “U”, usualmente aproveitado em colunas de estruturas com carga reduzida, onde a solicitação não é tão significativa. A Figura 1 ilustra os perfis citados. (TEOBALDO, 2004)

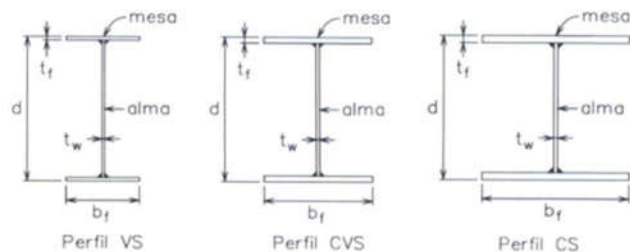
Figura 1 – Secções de perfis laminados - padrão americano



Fonte: (PRAVIA e DREHMER, 2004)

Os perfis soldados são fabricados a partir do corte, composição e soldagem de chapas planas de aço, possuem grande versatilidade quanto à forma e dimensão de seções e são sempre planejados visando a redução de custos. Usualmente, são projetados quando os perfis laminados não possuem as características necessárias para a aplicação em questão, vejamos na Figura 2. (TEOBALDO, 2004)

Figura 2 – Exemplos de perfis soldados



Fonte: (ANDRADE, 1994. p. 5.)

Os perfis estruturais formados a frio, exemplificados na Figura 3, são fabricados pelos processos de dobramento a frio de chapas finas de aço. A conformação a frio do material resulta em um produto de diferentes propriedades mecânicas, aumentando a tensão limite de escoamento e reduzindo a ductilidade. Quanto às bordas, podem ser normais ou enrijecidas, mas sempre com os cantos arredondados, onde o raio varia em função da espessura e das propriedades mecânicas do aço. São recomendados para construções leves, sendo mais utilizados em elementos estruturais como terças e barras de treliças. (TEOBALDO, 2004)

Figura 3 – Exemplos de perfis estruturais formados a frio.






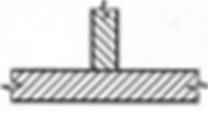





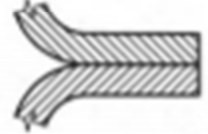

Fonte: (RODRIGUES, 2000. p. 12.)

3.4. Juntas soldadas.

Os elementos soldados conferem maior rigidez das ligações, redução de custos de fabricação, melhor acabamento final e facilidade de limpeza e pintura. Porém, possui algumas desvantagens devido a dificuldade para montagem e desmontagem e dificuldade para reforma de certos componentes. As ligações têm como requisito possuir resistência às tensões de tração, compressão e cisalhamento.

Existem cinco tipos básicos de juntas soldadas, são divididas de acordo com as diferentes posições relativas das peças a serem unidas. Cada uma é representada por uma letra de identificação, de acordo com a norma AWS D1.1. (ANDRADE, 1994)

Figura 4 – Tipos de juntas de acordo com norma AWS D1.1.

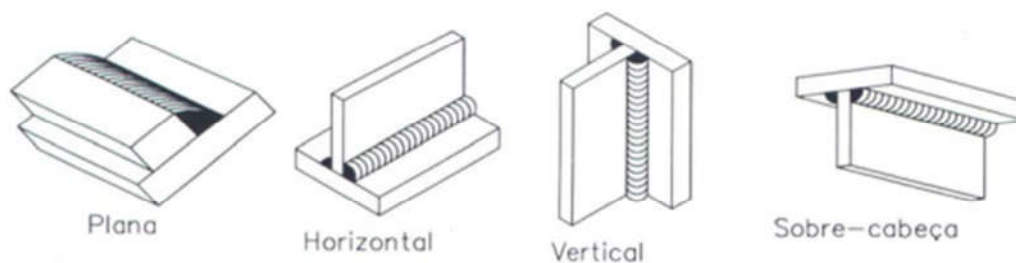
Tipo de Junta		 CÓDIGO
Topo (Butt Joint)		
"T" (Tee Joint)		
Canto (Corner Joint)		
Sobreposta (Lap Joint)		
Borda (Edge Joint)		

Fonte: (ANDRADE, 1994. p. 139)

A junta sobreposta é o tipo mais comum de junta nas estruturas metálicas e possui duas grandes vantagens: facilidade de montagem, pois as peças têm maior mobilidade, podendo acomodar pequenos erros de fabricação e também facilidade de ligação, pois as peças a serem soldadas não necessitam de preparação especial em suas bordas. Neste tipo de solda, utiliza-se solda de filete, o que a torna viável para aplicações em fábrica e em campo. Outra característica importante deste tipo de solda, é a possibilidade de unir chapas de diferentes espessuras. (ARGENTA, 2016)

Além dos tipos de juntas, deve ser levado em consideração a posição de soldagem (Figura5). Existem quatro posições básicas, são elas: a plana, a horizontal, a vertical e a sobre cabeça. (ANDRADE, 1994). A posição plana possui melhores resultados, enquanto a sobre cabeça possui os piores, apenas sendo utilizada em casos especiais. (TEOBALDO, 2004)

Figura 5 – Posições de soldagem conforme AWS.



Fonte: (ANDRADE, 1994, p. 141.)

Outros fatores que influenciam bastante na solda são a compatibilidade e a resistência dos eletrodos utilizados. Ou seja, o material do eletrodo deve ser compatível com o metal de base, com propriedades equivalentes às do metal de base. O Quadro 3 reproduz a tabela 7 da norma NBR 8800, apresentando os principais aços estruturais e os respectivos metais de solda compatíveis. (ARGENTA, 2016)

Quadro 3 - Compatibilidade do metal de base com o metal da solda.

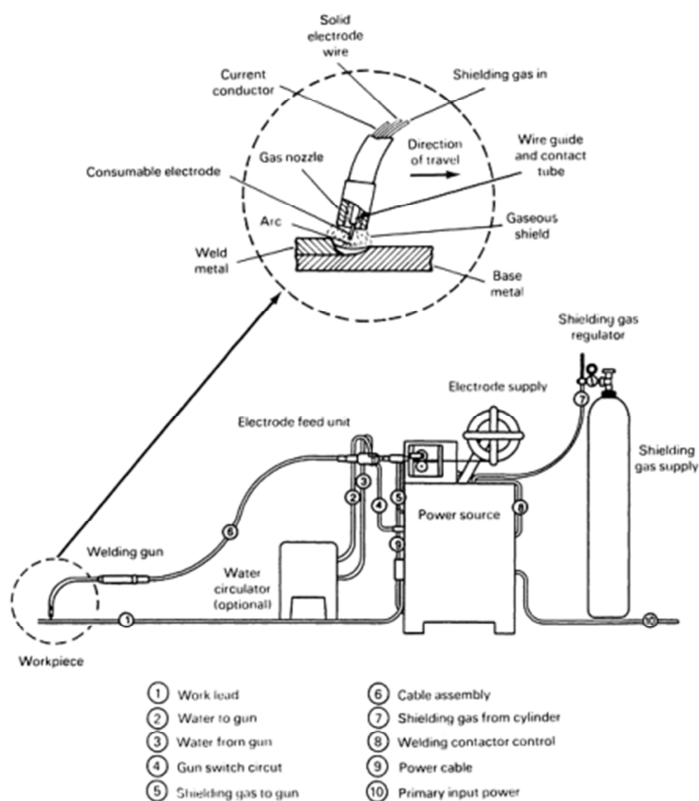
	Metal-base		Metal da solda compatível			
	ABNT	ASTM	Arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW)	Arco submerso (SAW)	Arco elétrico com proteção gasosa (GMAW)	Arco elétrico com fluxo no núcleo (FCAW)
Grupo I	NBR 6648 (CG-26 - $t \leq 20$ mm) NBR 6649 (CF-26) NBR 6650 (CF-26) NBR 7007 (MR 250 - $t \leq 19$ mm)	A36 ($t \leq 19$ mm) A500 Grau A A500 Grau B	AWS A5.1 - E60XX, E70XX AWS A5.5* - E70XX-X	AWS A5.17 - F6XX-EXXX, F6XX-ECXXX, F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX AWS A5.23* - F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX	AWS A5.18 - ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (exceto -GS) AWS A5.28* - ER70S-XXX, E70C-XXX	AWS A5.20 - E6XT-X, E6XT-XM, E7XT-X, E7XT-XM (exceto -2, -2M, -3, -10, -13, -14 e -GS e exceto -11 com espessura superior a 12 mm) AWS A5.29* - E6XTX-X, E6XT-XM, E7XTX-X, E7XTX-XM
Grupo II	NBR 5000 (G-30) NBR 5000 (G-35) NBR 5004 (F-32/Q-32) NBR 5004 (F-35/Q-35) NBR 5004 (Q-40) NBR 5008 (CGR 400) ^d NBR 5008 (CGR 500) ^d NBR 5008 (CGR 500A) ^d NBR 5920 (CFR 500) ^d NBR 5921 (CFR 400) ^d NBR 5921 (CFR 500) ^d NBR 6648 (CG-26 - $t > 19$ mm) NBR 6648 (CG-28) NBR 6649 (CF-28) NBR 6650 (CF-28) NBR 6650 (CF-30) NBR 7007 (MR 250 - $t > 19$ mm) NBR 7007 (AR-350) NBR 7007 (AR-350 COR) NBR 8261 (Graus B e C)	A36 ($t > 19$ mm) A242 ^{d1} A572 Grau 42 A572 Grau 50 A572 Grau 55 A992 A588 ^d	AWS A5.1 - E7015, E7016, E7018, E7028 AWS A5.5* - E7015-X, E7016-X, E7018-X	AWS A5.17 - F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX AWS A5.23* - F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX	AWS A5.18 - ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (exceto -GS) AWS A5.28* - ER70S-XXX, E70C-XXX	AWS A5.20 - E7XT-X, E7XT-XM (exceto -2, -2M, -3, -10, -13, -14 e -GS e exceto -11 com espessura superior a 12 mm) AWS A5.29 ^{d1} - E7XTX-X, E7XTX-XM
Grupo III	NBR 5000 (G-42) NBR 5000 (G-45) NBR 5004 (Q-42) NBR 5004 (Q-45) NBR 7007 (AR-415)	A572 Grau 60 A572 Grau 65 A913 ^c	AWS A5.5* - E8015-X, E8016-X, E8018-X	AWS A5.23* - F8XX-EXXX-XX, F8XX-ECXXX-XX	AWS A5.28* - ER80S-XXX, E80C-XXX	AWS A5.29* - E8XTX-X, E8XTX-XM

Fonte: (ABNT, 2008)

3.5. Processo MIG/MAG (GMAW)

A soldagem do tipo MIG/MAG, também conhecida como soldagem a arco com proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding – GMAW) é um processo em que a união é realizada a partir do aquecimento das peças com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico consumível e a peça de metal base, como mostra a Figura 6. A proteção contra contaminantes da atmosfera do arco e da região a ser soldada é realizada por um gás ou uma mistura de gases, podendo ser inertes ou ativos. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011)

Figura 6 – Esquemático do processo GMAW.



Fonte: (HANDBOOK GMAW)

O processo pode ser semiautomático ou automático, no primeiro, a alimentação do arame é realizada através de uma pistola e o soldador que controla a inclinação, a distância, a velocidade de soldagem e a técnica de deposição. Já no segundo, todo o processo é realizado através de máquinas, com os parâmetros ajustados pelo soldador. (FBTS, 1987)

3.5.1. Vantagens do processo MIG/MAG (GMAW)

A escolha deste método é realizada de acordo com suas vantagens, as mais importantes são: (ASM HANDBOOK, 1993)

- O comprimento do eletrodo não é tão limitado quanto no processo de soldagem por eletrodo revestido, por exemplo;
- A solda pode ser realizada em qualquer posição, desde que se usem os parâmetros adequados;
- O processo permite velocidade de soldagem relativamente alta;
- A alimentação contínua do eletrodo evita paradas durante o processo;
- Permite taxas de deposição relativamente altas;
- As características da solda semiautomática não são tão dependentes da habilidade do soldador, pois o comprimento do arco é mantido mesmo com variações razoáveis da distância do bico de contato para a peça.

3.5.2. Desvantagens do processo MIG/MAG (GMAW)

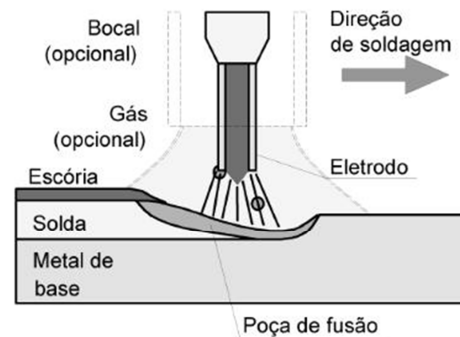
O processo GMAW, como qualquer processo otimizado para alta produção e aplicações automatizadas de solda tem suas limitações, como exemplo, temos: (ASTM HANDBOOK, 1993)

- O equipamento utilizado é mais complexo e mais caro do que o material utilizado em processo mais simples, como a soldagem a eletrodo revestido;
- Existe uma maior dificuldade de alcançar lugares de acesso mais complicado, devido às dimensões da pistola, pois é necessário que a distância seja de 10 mm a 19 mm, para garantir que a proteção da solda será apropriadamente realizada.
- O arco elétrico deve ser protegido de áreas com muitos ventos, pois pode ocorrer a dispersão do gás de proteção. Isto dificulta a soldagem em campo.

3.6. Processo Arame tubular (FCAW)

O processo arame tubular (Flux-Cored Arc Welding ou FCAW) possui duas variações básicas: uma em que a proteção é gerada a partir do fluxo contido no eletrodo, chamado de arame autoprottegido e a outra em que a proteção é complementada por uma nuvem de gás, geralmente o CO₂. A Figura 7 detalha o processo. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011)

Figura 7 – Ilustração do processo de soldagem FCAW.



Fonte: (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011)

Normalmente utilizada com o método semiautomático, é muito semelhante ao processo GMAW quando se trata de equipamentos e princípios de funcionamento. A soldagem com arames tubulares acumula tanto as principais vantagens da soldagem GMAW, como alguns dos citados anteriormente quanto às vantagens da soldagem por eletrodos revestidos. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011)

3.6.1. Vantagens do processo (FCAW)

Por combinar a produtividade de uma solda contínua e os benefícios de obter a presença de fluxo, o processo FCAW tem muitas vantagens frente aos outros processos de soldagem, algumas delas são: (ASTM HANDBOOK, 1993)

- Alta taxa de deposição, principalmente em soldagem fora da posição plana;
- A solda depende ainda menos que no processo GMAW da habilidade do soldador;
- Mais simples e mais adaptativo que o processo de soldagem a arco submerso;
- Penetração da solda relativamente alta;

3.6.2. Desvantagens do processo (FCAW)

Assim como o processo GMAW, o processo FCAW também possui algumas limitações, entre elas: (ASTM HANDBOOK, 1993)

- Necessidade de remoção de escória após a soldagem;

- Uma alta quantidade de fumos é produzida, necessitando, geralmente, de um sistema de exaustão;
- Os equipamentos são mais complexos, menos portáteis e mais caros que outros processos, como soldagem a eletrodo revestido;
- Assim como a soldagem GMAW, possui dificuldade de alcançar certos locais, já que utiliza o mesmo sistema de pistola.

3.7. Transferência metálica e gases de proteção

3.7.1. Tipos de transferências metálicas

O fenômeno da transferência metálica acontece quando o material de adição é transferido do eletrodo para a poça de fusão por meio do arco elétrico. O IIW (International Institute of Welding) classificou os tipos de transferência metálica que ocorrem nos processos a arco voltaico em três grupos principais. (CARNEIRO, 2005)

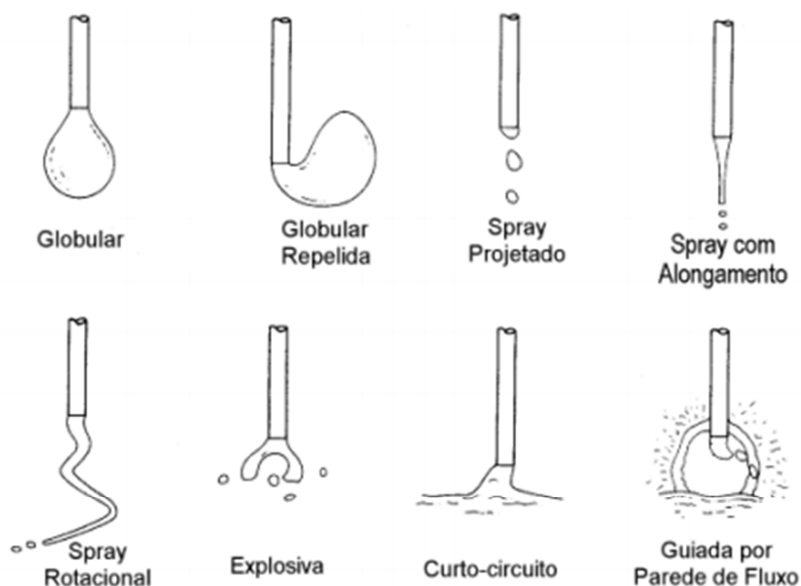
O modo de transferência depende de diversos fatores, entre eles estão: tipo de corrente, valor de corrente, tensão de solda, polaridade, diâmetro e composição do metal de adição, tipo e composição do meio de proteção, comprimento energizado do eletrodo, pressão atmosférica, entre outros. Vejamos no Quadro 4.

Quadro 4 – Formas comuns de transferência metálica segundo a IIW

Tipo de Transferência	Exemplo de Processo de Soldagem
1. Queda Livre (Free Flight Transfer):	
1.1. Globular (Globular)	
1.1.1. Globular (Drop)	GMAW - baixa corrente
1.1.2. Repelida (Repelled)	GMAW com proteção de CO ₂
1.2. Goticular ou Aerossol (Spray)	
1.2.1. Axial (Projected)	GMAW - corrente intermediária
1.2.2. Com Alongamento (Streaming)	GMAW - corrente média
1.2.3. Rotacional (Rotating)	GMAW - corrente elevada
1.3. Explosiva (Explosive)	SMAW (eletrodos revestidos)
2. Por Contato (Bridging Transfer)	
2.1. Curto-circuito (Short-circuiting)	GMAW - arco "curto"
2.2. Contínua (Without Interruption)	GTAW com alimentação contínua
3. Protegida por Escória (Slag Protected Transfer):	
3.1. Guiada pela parede (Flux-Wall Guided)	SAW
3.2. Outros modos (Other modes)	SMAW, FCAW, ESW, etc

Existem várias técnicas que podem ser utilizadas para o estudo da transferência metálica, porém existem três métodos mais usuais, sendo eles: mecânicos, fotográficos e através de medição de efeitos secundários. As técnicas mecânicas baseiam-se em coletar os respingos em alguma superfície diferente do metal de base. O método fotográfico, ou cinematografia, é uma das técnicas mais adequadas para observação da transferência metálica, é realizado por meio de câmeras capazes de filmar entre 10^3 e 10^4 quadros por segundo. O processo deve ser auxiliado por filtro especial para reduzir os efeitos causados pela radiação do arco. Os métodos indiretos levam em consideração sinais relacionados com o processo, por exemplo, a corrente ou tensão de soldagem, luminosidade, som, entre outros. A figura 8 mostra alguns dos tipos possíveis de transferência metálica. (MODENESI, 2011)

Figura 8 – Modos de transferência de acordo com a classificação do IIV



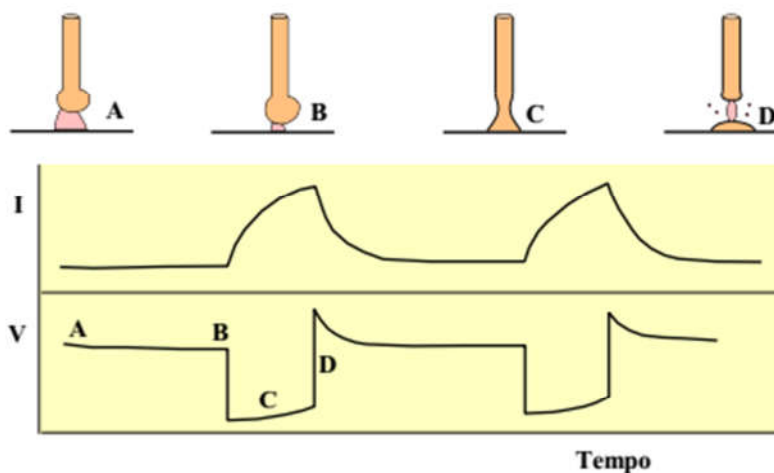
Fonte: (MODENESI, 2011)

3.7.2. *Transferência por curto-circuito*

A transferência por curto-circuito ocorre em situações de comprimento do arco suficientemente curto que possibilita o contato entre a poça de fusão e a gota de metal de adição, formada na ponta do eletrodo, antes mesmo que ocorra o seu destacamento. Este tipo de transferência é mais utilizado na soldagem de baixa corrente. Ao ocorrer o contato entre a poça de fusão e a ponta do eletrodo, ocorre um curto-circuito. Este fenômeno faz com que a corrente seja elevada rapidamente, causando uma maior fusão do eletrodo por meio do efeito Joule e, ao mesmo tempo, o metal de adição fundido tende a se transferir para a poça de fusão através da ação da tensão superficial e de forças de origem magnética. Logo após, o curto é

interrompido devido à vaporização de parte do material entre o eletrodo e a poça de fusão, o que causa a formação de respingos e o arco é restabelecido. A corrente que era alta se reduz progressivamente e a fusão da ponta do eletrodo ocorre mais lentamente, iniciando um novo ciclo. (MODENESI, 2011)

Figura 9 – Etapas da transferência por curto-circuito: A e B – Arco existente; C – Momento de curto-circuito; D – restabelecimento do arco.



Fonte: (MODENESI, 2011)

3.7.3. *Transferência goticular*

Caracterizado por uma transferência de gotas pequenas a altas taxas e baixa incidência de respingos, apresenta alto aporte térmico e taxa de fusão, sendo recomendada para soldagem de chapas grossas na posição plana.

Esta transferência possui uma corrente de transição, um valor onde, acima dela, a transferência passa a ser goticular. Além disso, depende de uma série de fatores para ser obtida, como gás de proteção, extensão energizada de eletrodo, diâmetro, composição química e revestimento do arame. (SOUZA, 2010)

A soldagem por transferência goticular pode produzir altas taxas de deposição e é geralmente empregada para unir materiais com espessuras acima de 2,4 mm. (ESAB, 2005)

A transferência por aerossol, nos arames tubulares, pode ser subdividida em dois tipos. Quando se usa argônio como gás de proteção ou argônio e oxigênio, as gotas são muito finas e não tocam a poça de fusão, gerando curto-circuito. Quando é utilizado CO₂ ou mistura de Ar + CO₂, existe a tendência de se formar um glóbulo fundido na extremidade do arame, que

pode crescer e tocar a poça de fusão, causando curto-circuito. Este modo é conhecido como transferência por falso aerossol ou quase globular.

3.7.4. *Influência do Ar e CO₂ na soldagem*

A proteção gasosa é necessária para evitar a contaminação da poça de fusão por gases que podem ser nocivos à solda. Esta contaminação é causada principalmente pelo nitrogênio (N₂) e oxigênio (O₂), além do vapor d'água presente na atmosfera.

Os efeitos do nitrogênio no aço solidificado prejudicam propriedades como a ductilidade e a tenacidade, podendo causar fissurações.

O oxigênio em excesso pode se combinar com o carbono do aço, formando o monóxido de carbono (CO), que pode causar porosidade. Pode, também, gerar inclusões ao se combinar com elementos como o manganês ou o silício.

Já o hidrogênio, presente no vapor d'água ou em óleo, combina-se com o ferro ou com o alumínio, gerando porosidade e a possibilidade de ocorrer fissuração sob cordão no metal de solda. (ESAB, 2005)

Os gases de proteção são determinantes para algumas propriedades como o modo de transferência de metal e a penetração da poça de fusão. Por exemplo, a transferência por aerossol não é atingida quando o gás de proteção é rico em CO₂. Misturas contendo mais que 20% não apresentam uma verdadeira transferência por aerossol.

Devida a alta disponibilidade e à boa qualidade conferida à solda, além do seu baixo custo e instalação simples, o dióxido de carbono é amplamente utilizado na soldagem dos mais diversos tipos de aços.

Os modos de transferência obtidos pelo CO₂ são restritos ao curto-circuito e à transferência globular. Uma das maiores vantagens deste gás são: velocidades de soldagem maiores e penetração profunda. Entre os maiores inconvenientes estão a indesejável transferência globular e os altos níveis de respingos na solda. (ESAB, 2005)

As misturas de Ar com CO₂ são usadas, principalmente, para aços ao carbono e baixa-liga. A adição de CO₂ no Ar produz maiores teores de penetração conforme a quantidade de CO₂ é aumentada. As misturas mais comuns para transferência goticular são as que possuem de 5 a 25% de CO₂. (SOUZA, 2010)

3.8. Cálculo do custo de soldagem

O custo de material depositado por centímetro de cordão pode ser calculado a partir de uma pequena variação da metodologia apresentada por Marques, Modenesi e Bracarense, 2011. Relacionando o preço por grama de eletrodo (P_{ge}), a densidade do eletrodo utilizado (ρ_e), a área da seção transversal do arame (A_e), a velocidade de alimentação (V_{alim}) e a velocidade de soldagem (V_s).

$$CE(\text{R\$/cm}) = \frac{P_{ge}(\text{R\$/g}) \times \rho_e(\text{g/cm}^3) \times A_e(\text{cm}^2) \times V_{alim}(\text{cm/min})}{V_s(\text{cm/min})} \quad (2)$$

Para o cálculo do custo do gás de proteção por centímetro de solda, são relacionados a vazão de gás (v_{gas}), o preço por litro de gás (P_{lg}) e a velocidade de soldagem (V_s).

$$CG(\text{R\$/cm}) = \frac{v_{gas}(\text{l/min}) \times P_{lg}(\text{R\$/l})}{V_s(\text{cm/min})} \quad (3)$$

4. MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste trabalho foram utilizados corpos de prova fabricados a partir do aço ASTM A572GR42, no formato de perfis em “J” formados a frio de aproximadamente 250 mm x 250 mm x 250 mm. A composição presente no Quadro 4 foi verificada no certificado do material, disponibilizado pelo fornecedor.

Quadro 5 – Composição química do aço

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
ASTM 572 GR42	0,15	0,014	0,490	0,012	0,0062

Fonte: Autor

Os eletrodos utilizados foram o arame maciço ER70S-6 nas soldagens realizadas em laboratório e o arame tubular E71T-1 nas soldagens realizadas na indústria de estruturas metálicas em questão, ambos com diâmetro de 1,2 mm. A composição dos arames é apresentada no Quadro 6.

Quadro 6 – Composição química dos arames.

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)
ER70S-6	0,06 – 0,15	0,80 – 1,15	1,40 – 1,85	0,025	0,035	0,50
E71T-1	0,03	0,55	1,45	0,013	0,01	

Fonte: Autor

Foram realizadas soldas sobre chapas e em chapas sobrepostas. Os ensaios foram divididos em cinco etapas.

Na primeira etapa, foi realizada uma visita à empresa para verificação dos parâmetros utilizados no processo de soldagem das peças em questão. A união das peças foi realizada de acordo com o processo estabelecido pela empresa. As peças foram levadas ao laboratório para análises e comparações com os ensaios realizados posteriormente.

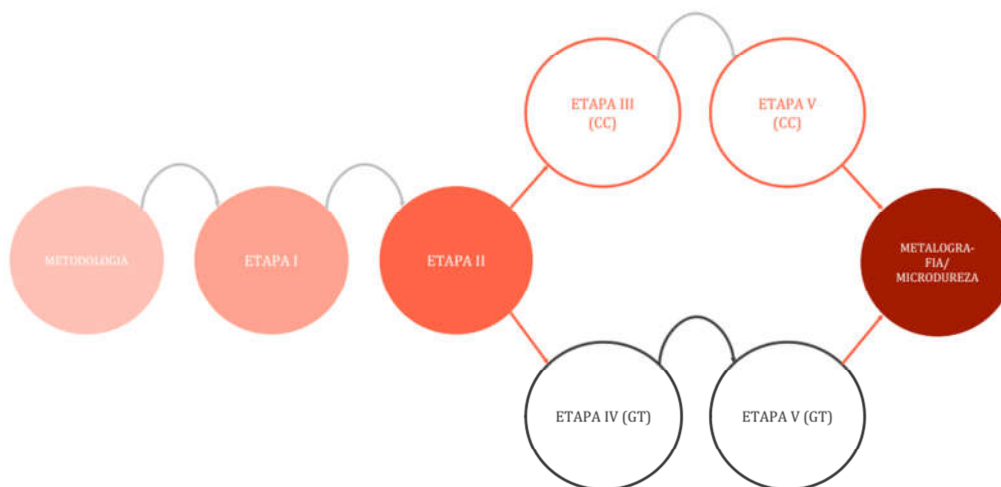
Na segunda etapa, foram realizadas soldas nos corpos de prova, apenas para a soldagem em curto-circuito, em chapas sobrepostas para avaliação do perfil de penetração da solda. A partir disso, foi escolhida a melhor relação entre velocidade de alimentação e velocidade de soldagem.

Na terceira etapa, foram realizadas soldas sobre chapas, partindo dos melhores parâmetros da etapa anterior, variando parâmetros de tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem para análises dos sinais de tensão e corrente e escolha das melhores combinações.

Na quarta etapa, foi utilizada a mesma relação entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação da peça escolhida na segunda etapa, logo, foram realizadas apenas as soldagens sobre chapas para a escolha dos parâmetros de tensão, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação a serem utilizados na quinta etapa.

As soldagens realizadas na junta sobreposta dos perfis dobrados a frio constituíram a quinta etapa, utilizando os parâmetros escolhidos nas duas etapas anteriores. Também foram realizadas análises dos sinais de tensão e corrente, além da micrografia das peças. A Figura 10 mostra um esquemático com todas as Etapas do trabalho.

Figura 10 – Fluxograma das etapas do Trabalho



Fonte: Autor

4.1. Preparação das amostras

4.1.1. Etapa I – Preparação da amostra soldada na metodologia abordada pela empresa

Nesta etapa, foi realizada a soldagem na empresa, utilizando o arame tubular E71T-1 de acordo com um método padrão feito em todas as peças com essa configuração. Dois perfis dobrados a frio no formato de J foram fixados por meio de pontos de solda com o mesmo arame utilizado na soldagem desta etapa para a formação do corpo de prova. Utilizou-se uma

bancada automatizada, ilustrada na Figura 11. Foi utilizada a fonte de soldagem Bambozzi TMC 400s. Trata-se de uma fonte eletromagnética e opera apenas no modo de tensão constante.

Figura 11 – Bancada automatizada utilizada na empresa. (1) tocha (2) carro tartaruga (3) suporte das peças (4) alimentador de arame.



Fonte: Autor

Figura 12 – Fonte de soldagem utilizada na empresa.



Fonte: Autor

Os parâmetros fixos utilizados na soldagem com arame tubular estão especificados no Quadro 7.

Quadro 7 – Parâmetros fixos para soldagem realizada na empresa

Arame	E71T-1
Tensão	33V
V_{alim}	12,5 m/min
Gás de proteção	CO ₂
Vazão de gás	23 l/min
Distância bico/peça	20 mm
Polaridade	CC+
Metal de Base	ASTM A572 GR42

Fonte: Autor

4.1.2. Etapa II – Avaliação de penetração da junta soldada com transferência por curto-circuito

Esta etapa constituiu na soldagem das peças para comparação inicial dos cordões de solda na junta sobreposta, foi verificado o padrão de penetração na junta soldada e determinou-se os parâmetros iniciais para a soldagem sobre chapas. As principais variáveis consideradas foram: velocidade de alimentação, velocidade de soldagem e tensão de soldagem. Como percebemos no Quadro 8.

Quadro 8 – Dados experimentais para Etapa II

Nome	Valim (m/min)	Vs (cm/min)	U (V)	Vs/Valim
L1	3,0	20,0	19,0	6,667
L2	3,5	20,0	19,5	5,714
L3	4,0	20,0	20,0	5,000
L4	5,5	32,0	22,0	5,818

Fonte: Autor

Alguns parâmetros foram mantidos constantes em todos os cordões realizados, tais parâmetros estão especificados no Quadro 9.

Quadro 9 – Parâmetros fixos na Etapa II

Arame	ER70S-6
Gás de proteção	CO ₂
Vazão de gás	17 l/min
Distância bico/peça	20mm
Polaridade	CC+
Metal de Base	ASTM A572 GR42

Fonte: Autor

Os testes foram realizados na bancada robotizada 1 do LPTS – UFC, como ilustra a Figura 13, utilizando uma fonte multiprocessos IMC Digiplus A7 ACDU no modo MIG/MAG Convencional. As soldas foram realizadas conforme ilustra a Figura 12.b e a Figura 12.a ilustra a fonte de soldagem.

Após a realização das soldas sobre a junta, os corpos de prova foram cortados em modo transversal aproximadamente no centro dos cordões, por meio de um disco de corte. Em seguida, as amostras foram lixadas, polidas e atacadas com solução de Nital 2% por aproximadamente vinte segundos.

Figura 13 – a) (1) Fonte de soldagem IMC – Digiplus A7 DCDU (2) sistema de resfriamento. b) Aspecto da junta sobreposta.



Fonte: Autor

Figura 14 – Bancada Robotizada I do LPTS – UFC (1) tocha (2) alimentador de arame (3) cilindro de gás de proteção (4) corpo de prova (5) exaustor.



Fonte: Autor

Para a realização das macrografias dos cordões, foi utilizado o aparato disponível no LPTS – UFC, ilustrado pela Figura 14.

Figura 15 – Aparato para realização de macrografias (1) câmera fotográfica (2) suporte para câmera (3) iluminação.



Fonte: Autor

4.1.3. Determinação da melhor condição de soldagem por curto-circuito

Nesta etapa, foi determinada a melhor condição de soldagem considerando a estabilidade do processo, avaliada pelo critério IV_{cc} , mostrado a seguir, no Quadro 10. Foram determinadas 4 velocidades de alimentação e para cada uma delas, foi variada a tensão de soldagem.

O índice de Vilarinho de regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IV_{cc}) é apresentado pela Equação 1. Quanto menor o valor do índice de regularidade, melhor a regularidade.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{tcc}}{tcc} + \frac{\sigma_{tab}}{tab} \quad (1)$$

Quadro 10 – Dados experimentais para Etapa III

Nome	DBCP (mm)	U (V)	Valim (m/min)	Vsolda (cm/min)
SSC01	20	18	3,5	20,0
SSC02	20	19	3,5	20,0
SSC03	20	20	3,5	20,0
SSC04	20	21	3,5	20,0
SSC05	20	19	4	22,9
SSC06	20	20	4	22,9
SSC07	20	21	4	22,9
SSC08	20	22	4	22,9
SSC09	20	19	4,5	25,7
SSC10	20	20	4,5	25,7
SSC11	20	21	4,5	25,7
SSC12	20	22	4,5	25,7
SSC13	20	19	5	28,6
SSC14	20	20	5	28,6
SSC15	20	21	5	28,6
SSC16	20	22	5	28,6

Fonte: Autor

Para aquisição de dados foi utilizado o Sistema de Aquisição de Dados para Soldagem (SAP V4.28s) interligado à fonte utilizada e os dados obtidos foram utilizados para se tomar a decisão dos parâmetros ótimos para a soldagem em definitivo na Etapa V. Associado a isso, foi analisado a quantidade de respingos e o aspecto do cordão.

4.1.4. Etapa IV – Solda sobre chapas em transferência goticular

Para a Etapa IV, foi utilizada uma metodologia semelhante à da etapa anterior, porém, foram utilizados parâmetros de velocidade de soldagem, velocidade de alimentação e tensão de soldagem mais altos, como mostra o Quadro 11. Para a obtenção do tipo de transferência desejado, o gás de proteção e a vazão utilizados neste tipo de soldagem não foram os mesmos que na etapa anterior. Os critérios para avaliação das melhores condições de soldagem foram a estabilidade do sinal de corrente, quantidade de respingo e o aspecto do cordão.

Quadro 11 – Dados experimentais para Etapa IV

Nome	DBCP (mm)	U (V)	Valim (m/min)	Vsolda (cm/min)
T01	20	31	7,0	40
T02	20	32	7,0	40
T03	20	31,5	7,0	40
T04	20	30,5	7,0	40
T05	20	31,5	7,5	42,8
T06	20	32	7,5	42,8
T07	20	32,5	7,5	42,8
T08	20	31	7,5	42,8
T09	20	31,5	8,0	45,7
T10	20	31,7	8,0	45,7
T11	20	32	8,0	45,7
T12	20	32,5	8,0	45,7
T13	20	32	8,5	48,6
T14	20	32,5	8,5	48,6
T15	20	33	8,5	48,6
T16	20	33,5	8,5	48,6

Fonte: Autor

Quadro 12 – Parâmetros fixos para solda em laboratório na Etapa IV

Arame	ER70S-6
Gás de proteção	96% Ar – 4%CO ₂
Vazão de gás	18 l/min
Distância bico/peça	20mm
Polaridade	CC+
Metal de Base	ASTM A572 GR42

Fonte: Autor

A aquisição de dados nesta etapa foi feita de modo semelhante ao da etapa anterior.

4.1.5. Etapa V – Comparativo entre as soldagens abordadas

Para esta etapa, foram utilizados os parâmetros ótimos resultantes das etapas III e IV, utilizando a junta semelhante à da Etapa II. Os resultados foram comparados com a soldagem realizada na Etapa I.

4.1.6. Metalografia

Com o objetivo de retirar as imperfeições mais grosseiras na superfície do material, realizou-se o lixamento. Para isso, foram utilizadas lixas de carboneto de silício,

seguindo a seguinte sequência: 100, 240, 320, 400, 600 mesh. O fluido usado para resfriamento e lubrificação foi água corrente. As peças foram posicionadas e pressionadas na lixadeira giratória, e a cada lixa, mudou-se a direção de lixamento em 90°, tendo o cuidado de secar as amostras após cada troca de lixa, evitando assim, a oxidação enquanto as lixas foram trocadas. Vale ressaltar que somente após a uniformidade de riscos ser atingida, as lixas foram trocadas.

As amostras foram polidas, na lixa de 1200 mesh e em alumina de granulometria 0,5 μm . O principal objetivo do polimento é retirar os riscos e preparar as amostras para serem atacadas e vistas ao microscópio com uma boa qualidade. O processo de polimento consistiu, no primeiro momento, em um processo semelhante ao lixamento, porém na lixa de grãos mais finos (1200 mesh). No segundo momento, usou-se o pano para polimento e nele aplicou-se alumina 0,5 μm , água e um pouco de detergente para reduzir a probabilidade de riscos na peça. A amostra foi movimentada lenta e suavemente no sentido contrário ao da máquina até os riscos não serem mais vistos com o aumento de 50X do microscópio no modo de iluminação campo escuro. O ataque químico foi realizado com Nital 2% (2% HNO_3 / 98% Álcool etílico) por aproximadamente 5 segundos para cada peça.

4.2. Microdureza

A avaliação da microdureza foi realizada através do método Vickers com carga de 1 N, aplicado na secção transversal dos cordões em pontos espaçados igualmente de 600 μm . Foram realizadas medidas no metal base, na zona termicamente afetada e no metal de adição. Os ensaios foram realizados no microdurômetro Leco LM110AT, como ilustra a Figura 15. Após o levantamento dos dados, as microdurezas foram comparadas.

Figura 16 – Microdurômetro Leco LM110AT disponibilizado pelo LPTS-UFC.



Fonte: Autor

4.3. Cálculo de Custo

Na comparação de custos entre os três diferentes tipos de soldagem realizados neste estudo, levaram-se em consideração apenas os custos de consumíveis (arame e gás) por cada centímetro de solda. Para isso, foram utilizadas duas equações que quantificam o custo por centímetro de solda.

Os valores utilizados foram considerados a partir dos preços das últimas compras de materiais realizadas pela empresa, exceto pela mistura Ar + 4%CO₂ que nunca foi comprada pela empresa, sendo utilizada, assim, a última cotação realizada pelo Laboratório de Pesquisa em Tecnologia em Soldagem da Universidade Federal do Ceará.

O custo de material depositado por centímetro de cordão foi calculado a partir das Equações 2 e 3.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise do perfil de penetração das soldagens realizadas na Etapa II

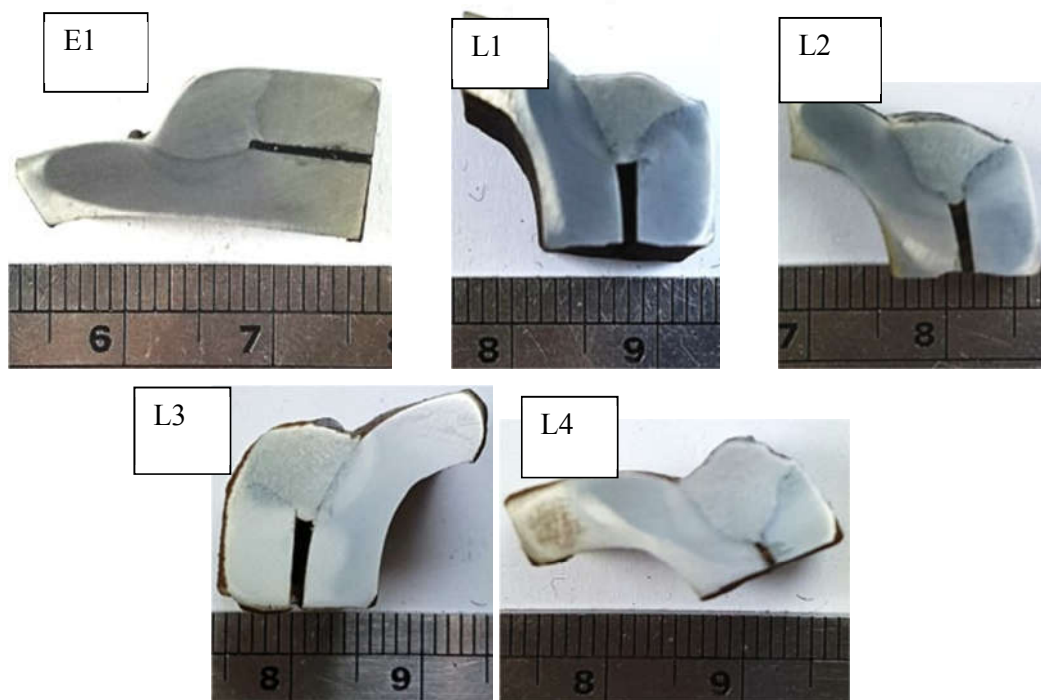
As soldas realizadas na Etapa II foram realizadas com o intuito de escolher a melhor relação entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação, ou seja, determinou-se um valor aproximado para manter-se constante o volume de material adicionado à junta. Os parâmetros utilizados estão detalhados no Quadro 7 e no Quadro 8. A escolha da melhor condição foi feita após análise do perfil de penetração de cada um dos cordões (L1, L2, L3 e L4) comparados ao perfil de penetração do cordão E1, realizado na Etapa I. As peças foram cortadas de acordo com a marcação da imagem, para a micrografia foram utilizadas as faces mais próximas ao centro da solda.

Figura 17 – Cordões de solda realizados no LPTS - UFC para Etapa II.



Fonte: Autor

Figura 18 - Perfil de penetração dos ensaios a) realizado na empresa (E01) b) L1 c) L2 d) L3 e) L4



Fonte: Autor

Após as análises, de aspecto do cordão e perfil de penetração, a soldagem L2 foi a selecionada para representar a melhor condição entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação, porém, como a velocidade de soldagem foi muito baixa com relação à soldagem E1, foram feitas novos experimentos para verificar a possibilidade de aumento de ambas as velocidades.

5.2. Etapa III – Escolha da melhor condição para curto-circuito

As soldas sobre chapas em curto-circuito foram realizadas a fim de analisar se existiria uma condição de velocidade de soldagem e de velocidade de alimentação que mantivessem a mesma razão da solda L2, porém com valores mais altos de velocidade de soldagem, para melhorar a produtividade. Além disso, foi analisado o IV_{cc} para cada cordão como mostra o Quadro 13.

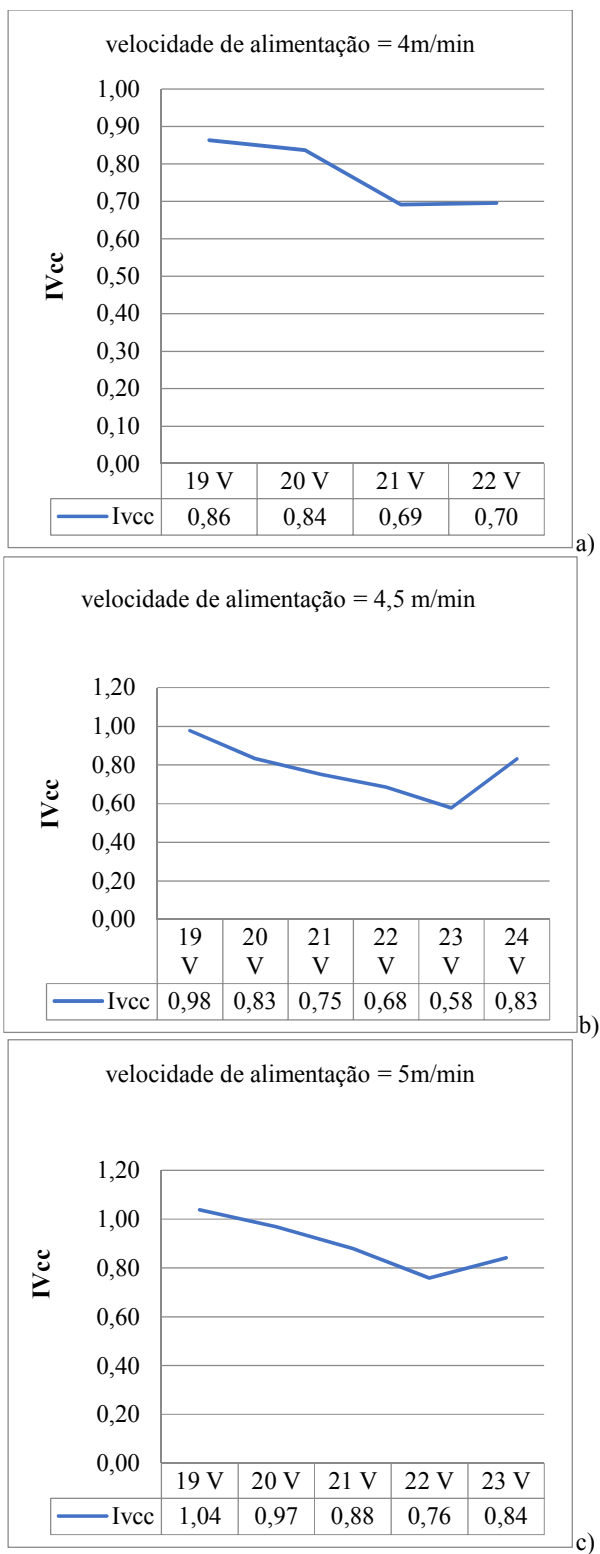
Quadro 13 – Análise dos sinais das soldas sobre chapa quanto ao índice de Vilarinho.

Nome	DBCP (mm)	U (V)	Valim (m/min)	Vsolda (cm/min)	tempo analisado (5s)	U média	Im (A)	d.p da média do tempo de curto	média do tempo de curto circuito	d.p da média do tempo de arco aberto	média do tempo de arco aberto	Ivcc
SSC01	20	18	3,5	20,0	3 a 8	18,70	124,5	1,5	4,4	3,8	9,8	0,73
SSC02	20	19	3,5	20,0	3 a 8	19,40	122,5	1,5	3,6	3,5	9,7	0,78
SSC03	20	20	3,5	20,0	7 a 12	20,1	125,6	1,1	2,8	3,3	8,3	0,79
SSC04	20	21	3,5	20,0	10 a 15	21,10	127,4	0,8	2,4	3,1	8,1	0,72
SSC05	20	19	4	22,9	2 a 7	19,30	130	1,6	4	4,4	9,5	0,86
SSC06	20	20	4	22,9	3 a 8	20,20	129,4	1,2	3,4	4,5	9,3	0,84
SSC07	20	21	4	22,9	6 a 11	21,10	134,8	0,9	2,7	2,9	8,1	0,69
SSC08	20	22	4	22,9	5 a 10	22,10	139,8	0,8	2,5	3,3	8,8	0,70
SSC09	20	19	4,5	25,7	15 a 20	19,5	138,4	1,5	4,4	6,3	9,9	0,98
SSC10	20	20	4,5	25,7	3 a 8	20,2	147,8	1,3	3,6	4,2	8,9	0,83
SSC11	20	21	4,5	25,7	6 a 11	21,1	152,8	1	3	3,6	8,6	0,75
SSC12	20	22	4,5	25,7	4 a 9	22,1	141,9	0,8	2,5	3,1	8,1	0,70
SE01	20	23	4,5	25,7	2,5 a 7,5	23,00	151,8	0,6	3	4,8	12,7	0,58
SE02	20	24	4,5	25,7	5 a 10	24,00	143,5	1,2	3,3	10,2	21,8	0,83
SSC13	20	19	5	28,6	2 a 7	19,8	145,5	2,2	5,1	9,1	15	0,88
SSC14	20	20	5	28,6	2,5 a 7,5	20,2	152,5	1,7	4,1	5,7	10,3	0,76
SSC15	20	21	5	28,6	4 a 9	21,3	154,8	1,5	3,9	4,7	9,5	0,88
SSC16	20	22	5	28,6	3 a 8	22,1	158,3	1	3	4	9,4	0,76
SE03	20	23	5	28,6	4 a 9	23	161,5	1	3	6,6	13	0,84

As análises demonstraram que o índice de Vilarinho tem uma tendência a diminuir de valor de acordo com a variação da tensão. Porém, nas condições de velocidade de alimentação igual a 4,0m/min, percebeu-se que após uma certa voltagem, o índice voltava a aumentar. Este padrão está ilustrado na Figura 18.

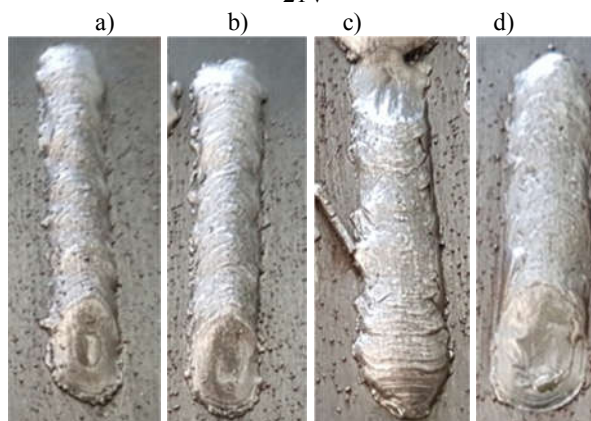
Um padrão diferente foi verificado nos cordões de velocidade de alimentação igual a 3,5m/min, contudo, não foram realizados novos ensaios, pois foram encontradas condições melhores com velocidade de soldagem mais altas.

Figura 19 – Gráfico de I_{Vcc} x Tensão (V) para as velocidades de alimentação a) 4,0m/min b) 4,5m/min c) 5,0m/min.



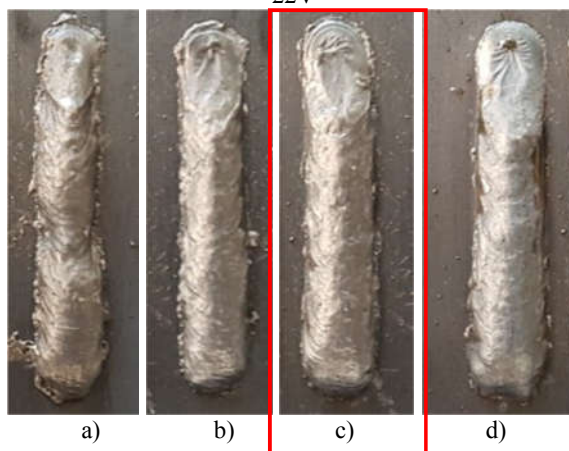
Fonte: Autor

Figura 20 – Cordões de solda com velocidade de alimentação de 3,5 m/min e tensão de a) 18V b) 19V c)20V d) 21V



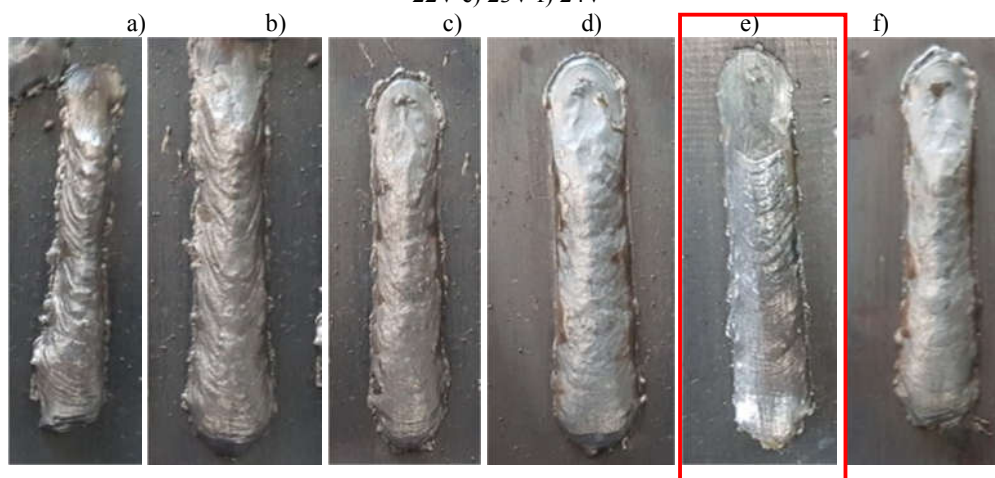
Fonte: Autor

Figura 21 - Cordões de solda com velocidade de alimentação de 4,0 m/min e tensão de a) 19V b) 20V c)21V d) 22V



Fonte: Autor

Figura 22 - Cordões de solda com velocidade de alimentação de 4,5 m/min e tensão de a) 19V b) 20V c)21V d) 22V e) 23V f) 24V



Fonte: Autor

Figura 23 - Cordões de solda com velocidade de alimentação de 5,0 m/min e tensão de a) 19V b) 20V c) 21V d) 22V e) 23V



Fonte: Autor

Os cordões considerados como os melhores, foram selecionados para a Etapa V estão marcados pelo retângulo vermelho. É possível perceber que não foi selecionado algum cordão com velocidade de alimentação de 5m/min, pois, além de os cordões não possuírem bons aspectos, o I_{Vcc} de todos os testes com esta velocidade apresentaram um valor muito alto, indício de que a transferência já passava por uma transição de curto-circuito para goticular. O quadro abaixo ilustra este comportamento.

Quadro 14 – Comparação entre os menores I_{Vcc} .

Valim (m/min)	U (V)	I_{Vcc}
4	21	0,69
4,5	23	0,58
5	22	0,76

Fonte: Autor

5.3. Etapa IV – Escolha da melhor condição para transferência goticular

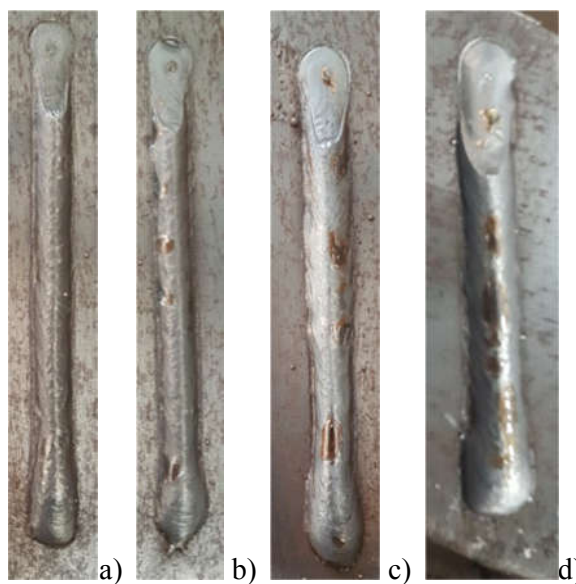
A partir dos parâmetros selecionados, como mostra o Quadro 9, foram realizadas as soldagens para a Etapa IV. Para a avaliação da melhor condição de soldagem, foi levado em consideração a menor relação entre desvio padrão dos picos de corrente e a média de picos de corrente. Como a fonte foi utilizada no modo de tensão constante, situação semelhante à da soldagem realizada na Etapa I, o critério para avaliação da estabilidade da soldagem foi a razão entre a média de variação da corrente e o desvio padrão desta média, obtendo-se, assim, um índice em que a estabilidade é maior quando o índice é menor.

Quadro 15 – Análise dos sinais de solda sobre chapas com transferência goticular.

Nome	DBCP (mm)	U (V)	Valim (m/min)	Vsolda (cm/min)	tempo analisado (7s)	U média	d.p da média de picos de corrente (A)	corrente média (A)	d.r dos picos de corrente (%)
T01	20	31	7	40,0	7 a 14	31	3	253,9	1,2
T02	20	32	7	40,0	8,5 a 15,5	32,1	3,6	257,1	1,4
T03	20	31,5	7	40,0	3 a 10	31,6	3,4	247,3	1,4
T04	20	30,5	7	40,0	5 a 12	30,5	34,4	252,6	13,6
T05	20	31,5	7,5	42,9	3 a 10	31,6	3,8	257	1,5
T06	20	32	7,5	42,9	5 a 12	32,1	4,9	262,5	1,9
T07	20	32,5	7,5	42,9	4 a 11	32,6	4,2	257,3	1,6
T08	20	31	7,5	42,9	4 a 11	31	3,3	250,6	1,3
T09	20	31,5	8	45,7	3,5 a 10,5	31,6	3,8	266,9	1,4
T10	20	31,7	8	45,7	3 a 10	31,6	4,3	266,4	1,6
T11	20	32	8	45,7	5 a 12	32,1	3,6	269,4	1,3
T12	20	32,5	8	45,7	3,5 a 10,5	32,6	4,4	272,5	1,6
T13	20	32	8,5	48,6	7 a 14	32,1	3,3	277,3	1,2
T14	20	32,5	8,5	48,6	3,5 a 10,5	32,6	2,9	281,8	1,0
T15	20	33	8,5	48,6	5 a 12	33,1	2,7	281,7	1,0
T16	20	33,5	8,5	48,6	5 a 12	33,6	3,3	286,7	1,2

Após esta análise, foram escolhidas como melhores condições as combinações de parâmetros chamadas de T14 e T15, pois demonstraram menor padrão de variação da corrente de soldagem. As figuras abaixo ilustram os 16 ensaios realizados.

Figura 24 – Cordões de solda a) T01 b) T02 c) T03 d) T04



Fonte: Autor

Figura 25 – Cordões de solda a) T05 b) T06 c) T07 d) T08



Fonte: Autor

Figura 26 – Cordões de solda a) T09 b) T10 c) T11 d) T12



Fonte: Autor

Figura 27 – Cordões de solda a) T013 b) T014 c) T15 d) T16



Fonte: Autor

As condições obtidas para os cordões selecionados (marcados em vermelhos) apresentaram as melhores combinações das propriedades analisadas: estabilidade do arco durante a soldagem, comprimento de arco, som emitido pela soldagem, quantidade de respingos além de obterem os sinais de corrente mais estáveis. Aliado a isso, tais ensaios propiciaram as maiores velocidades de soldagem. Os cordões apresentaram indícios de que o metal de base estava oxidado, pela escória presente, tal situação ocorreu pois as peças foram soldadas da forma que foram recebidas, sem tratamento prévio, assim como na empresa.

5.4. Etapa V – Comparação das soldagens na junta sobreposta

5.4.1. Soldagem em curto-circuito na junta sobreposta

De acordo com os resultados obtidos na Etapa II, foram selecionadas as duas melhores condições de soldagem para serem reproduzidas na junta sobreposta das peças, como foi exemplificado na Figura 12.b.

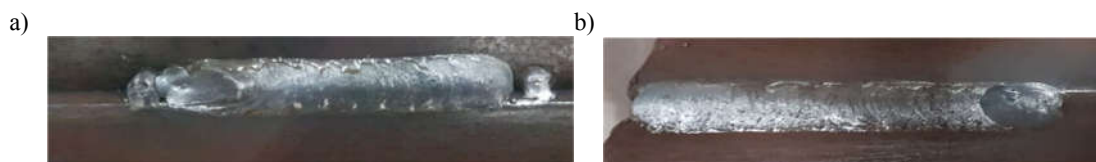
Os parâmetros escolhidos estão listados abaixo no Quadro 15. A escolha foi feita de acordo com os cordões que possuíram o menor valor do índice de Vilarinho. Foi realizada a aquisição de dados, como mostra o Quadro 15. Na Figura 27.b é possível perceber as características do perfil de penetração da melhor condição de soldagem de acordo com as macrografias realizadas após o corte, lixamento, polimento e ataque químico das peças. Assim como na Etapa II, as peças foram comparadas com a soldagem feita na indústria, indexada como E1. O critério de escolha da melhor condição foi semelhante ao realizado na Etapa III

Quadro 16 – Resultados obtidos com a soldagem na junta sobreposta no modo de transferência por curto-circuito.

Nome	DBCP (mm)	U (V)	Valim (m/min)	Vsolda (cm/min)	tempo analisado (5s)	U média	Im (A)	d.p da média do tempo de curto	média do tempo de curto circuito	d.p da média do tempo de arco aberto	média do tempo de arco aberto	Ivcc
DCC1	20	21	4	22,9	6 a 11	21,00	144,8	1	2,6	3,2	7,5	0,81
DCC2	20	23	4,5	25,7	3 a 8	23,00	154,8	0,8	2,8	3,9	10,5	0,66

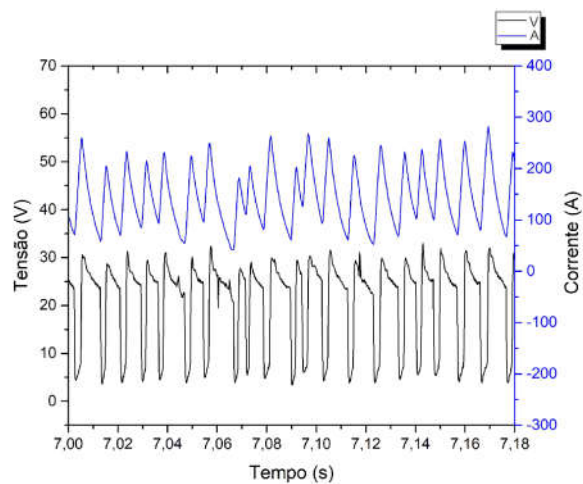
Fonte: Autor

Figura 28 – Cordões de solda na junta sobreposta com transferência por curto-circuito a) DCC1 b) DCC2

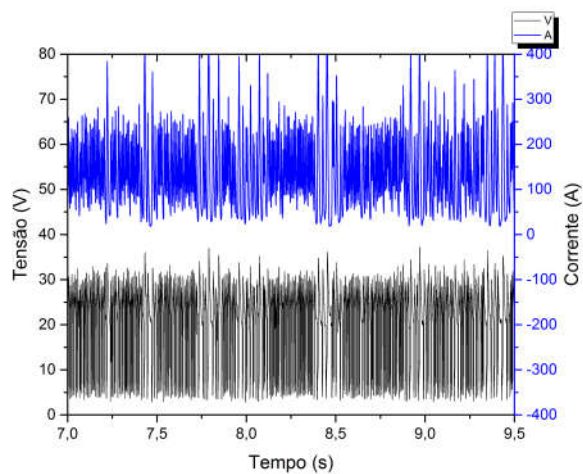


Fonte: Autor

Figura 29 - Gráficos de tensão e corrente para o ensaio DCC1 a) Intervalo de 7 – 7,18s b) Intervalo de 7 – 9,5s



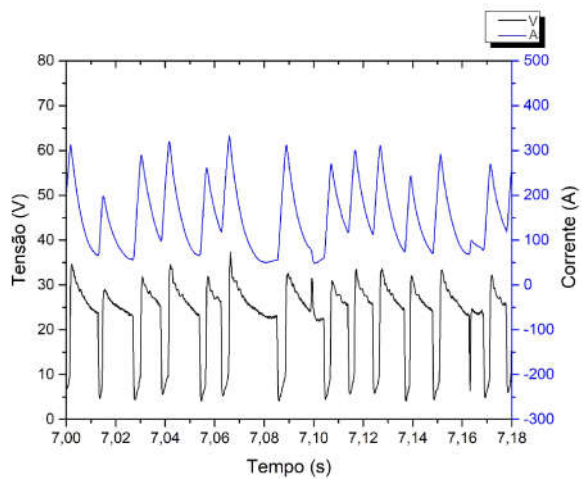
a)



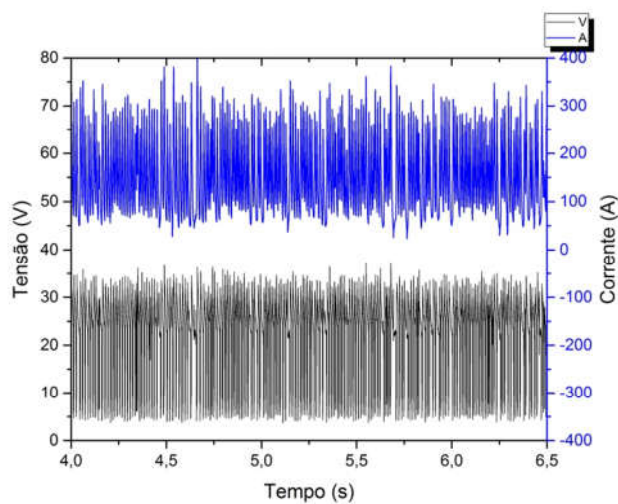
b)

Fonte: Autor

Figura 30 - Gráficos de tensão e corrente para o ensaio DCC2 a) Intervalo de 7 – 7,18s b) Intervalo 4 – 6,5s



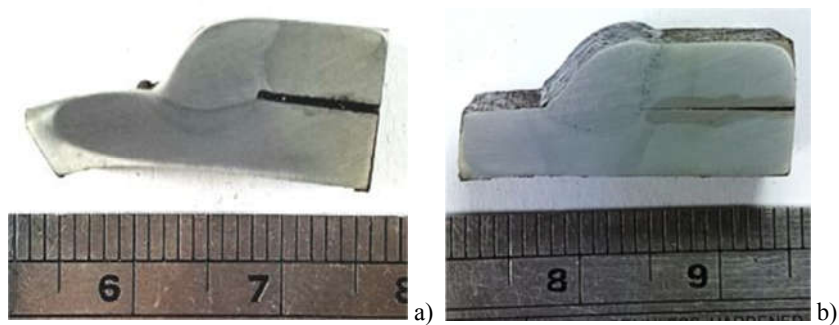
a)



b)

Fonte: Autor

Figura 31 – Macrografias de a) ensaio E01 b) ensaio DCC2



Fonte: Autor

Assim como na soldagem sobre chapa, os padrões escolhidos obtiveram bons indicadores, principalmente pelo IVcc que foi, na situação DCC2, menor que no processo de soldagem realizado pela Etapa III. A qualidade da solda foi percebida, também pelo padrão sonoro, estabilidade do arco e quantidade de respingos. Por estes motivos, a melhor soldagem com transferência por curto-circuito foi o ensaio DCC2. Para esta condição, foi realizado a análise de penetração e se confirmou que o padrão era bastante semelhante.

5.4.2. Soldagem em transferência goticular na junta sobreposta

A soldagem na junta por transferência goticular foi realizada de acordo com os critérios já explicitados, alterando-se apenas a velocidade de soldagem para 55 cm/min, pois o reforço nos cordões sobre chapa estava muito alto. No quadro abaixo estão listados os parâmetros variáveis escolhidos para a realização dos experimentos. Assim como as soldagens na junta sobreposta por curto-circuito, a macrografia da melhor condição foi comparada com a do experimento E1. O critério de escolha da melhor condição foi semelhante ao realizado na Etapa IV

Quadro 17 – Resultados obtidos com a soldagem na junta no modo de transferência goticular.

Nome	DBCP (mm)	U (V)	Valim (m/min)	Vsolda (cm/min)	tempo analisado (7s)	U média	d.p da média de picos de corrente (A)	corrente média (A)	d.r dos picos de corrente (%)
DGT1	20	32,5	8,5	55,0	2,5 a 9,5	32,6	2	283,8	0,7
DGT2	20	33	8,5	55,0	4 a 11	33,2	2,5	285,7	0,9

Fonte: Autor

Figura 32 - Cordões de solda na junta sobreposta com arame tubular (E01)



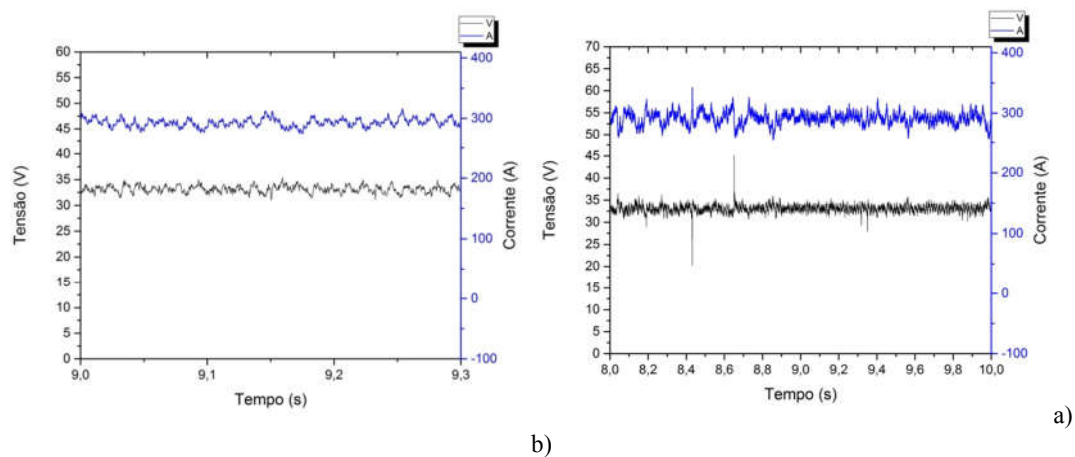
Fonte: Autor

Figura 33 - Cordões de solda na junta sobreposta com transferência goticular e arame sólido a) DGT1 b) DGT2



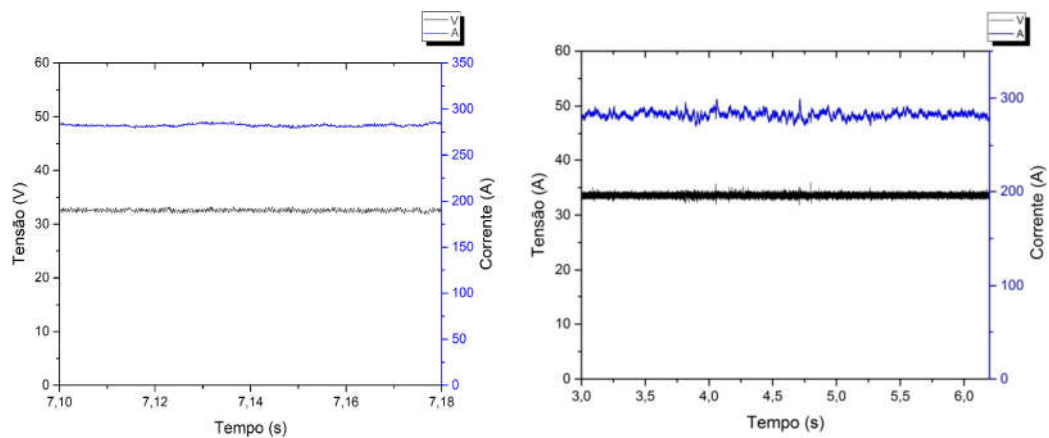
Fonte: Autor

Figura 34 – Gráficos de tensão e corrente para o ensaio E01 a) Intervalo de 9 – 9,3s e b) Intervalo de 8 – 10s.



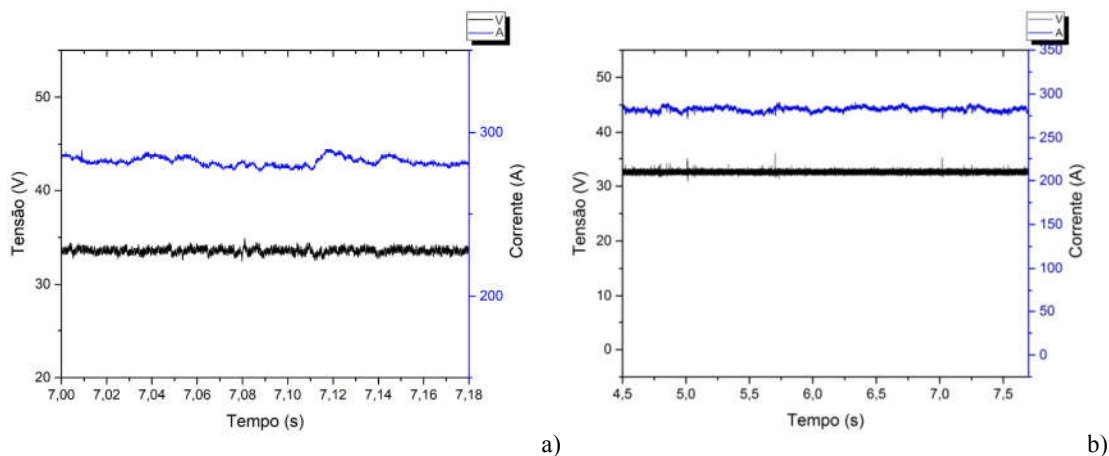
Fonte: Autor

Figura 35 – Gráficos de tensão e corrente para o ensaio DGT1 a) Intervalo de 7 – 7,18s b) 3 – 6,5s.



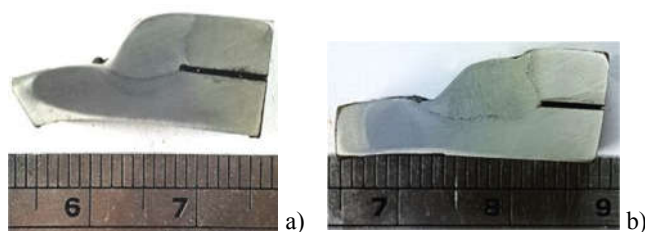
Fonte: Autor

Figura 36 - Gráficos de tensão e corrente para o ensaio DGT2 a) Intervalo de 7 – 7,18s b) Intervalo de 4,5 – 7,5s.



Fonte: Autor

Figura 37 - Macrografias de a) ensaio E01 b) ensaio DGT1



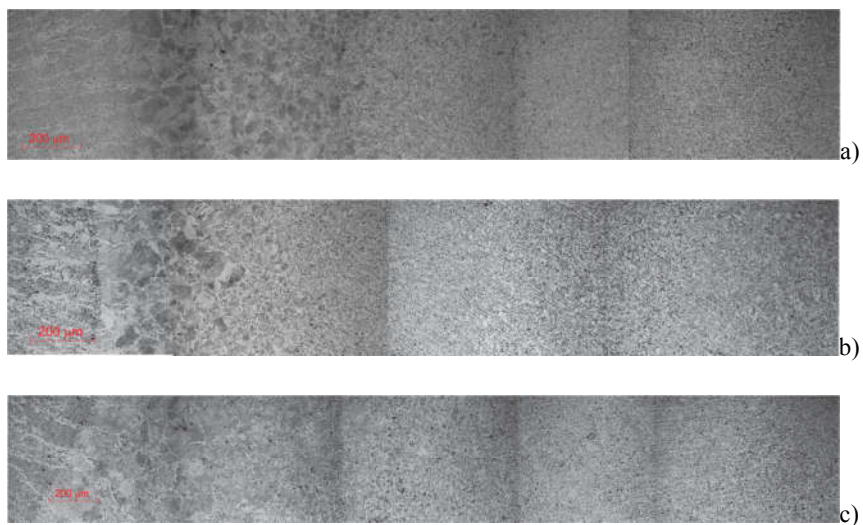
Fonte: Autor

Assim como na soldagem com transferência por curto-circuito, foram analisados os aspectos do cordão de solda na junta soldada e a estabilidade da corrente, calculada pela corrente média e o desvio padrão da mesma. A qualidade da solda foi percebida, também pelo padrão sonoro, estabilidade do arco e quantidade de respingos. O padrão de penetração foi avaliado para a melhor condição entre as duas escolhidas e comparado com o da soldagem feita por arame tubular, foi constatado que possuía dimensões próximas ao do ensaio E01.

5.5. Microestruturas

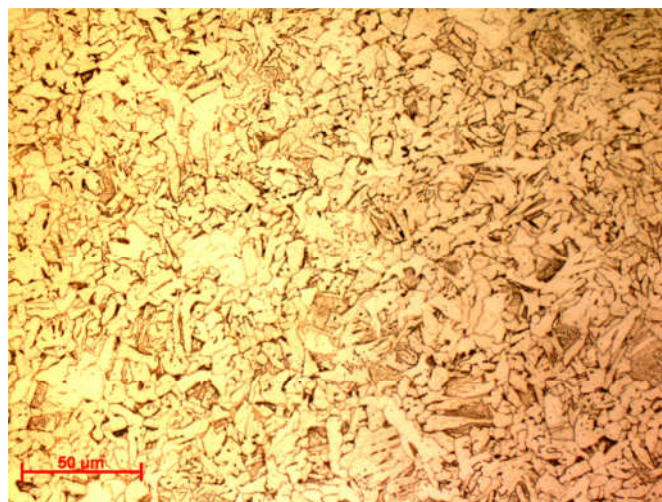
Após o corte, lixamento e polimento as peças foram analisadas no microscópio óptico no aumento de 200 e 500X. As figuras a seguir mostram a microestrutura das peças soldadas no metal de base, na zona termicamente afetada de grãos finos, na zona termicamente afetada de grãos grossos e na zona fundida.

Figura 38 – Micrografias no aumento de 200X da região da Zona Fundida, Zona Termicamente Afetada e Metal de Base da peças a) E01 b) DCC2 c) DGT1



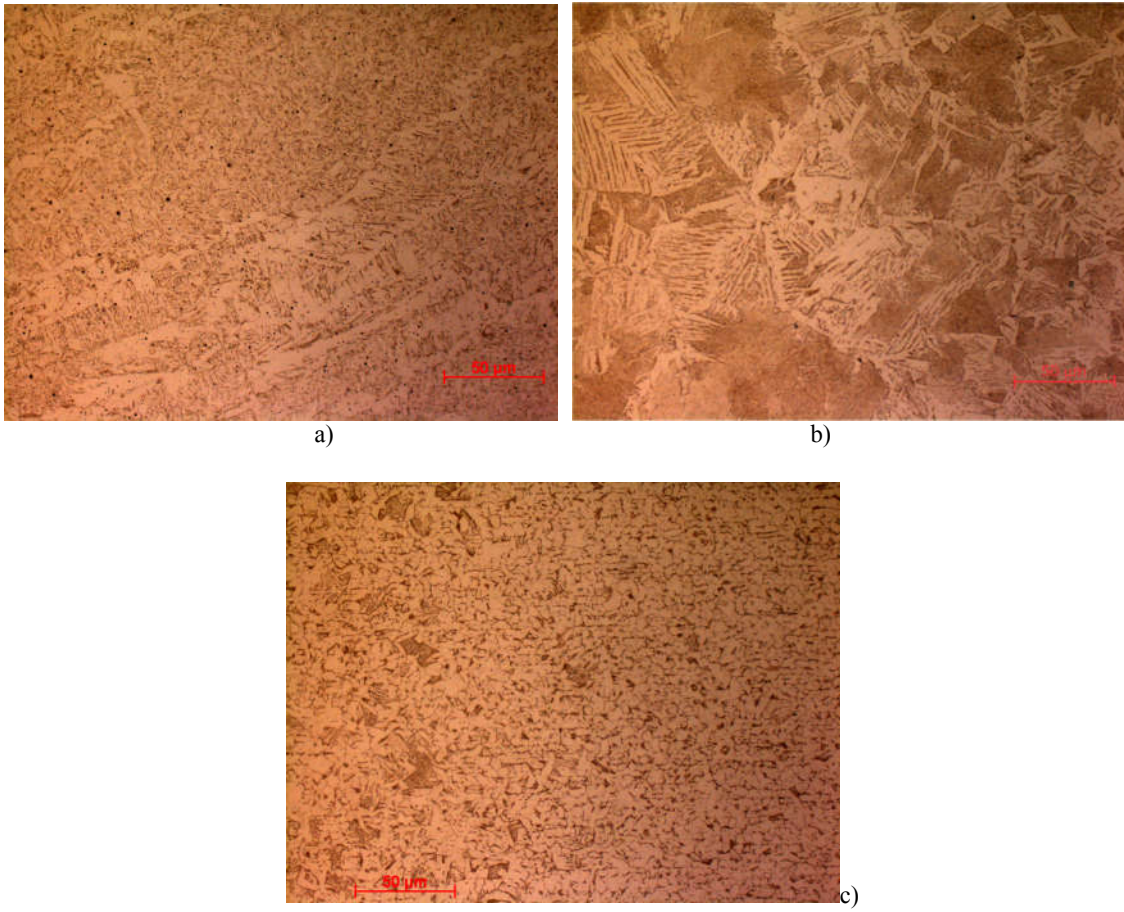
Fonte: Autor

Figura 41 – Aumento de 500X no metal de base



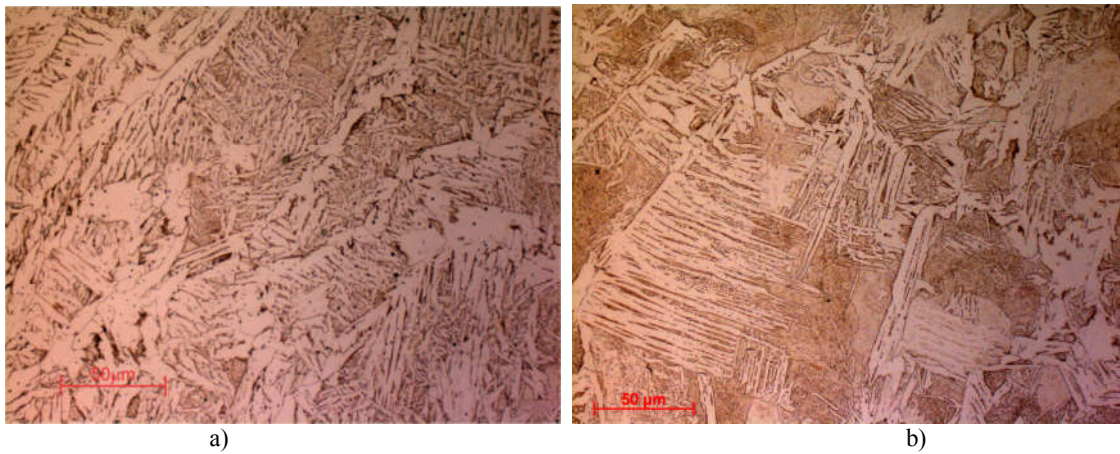
Fonte: Autor

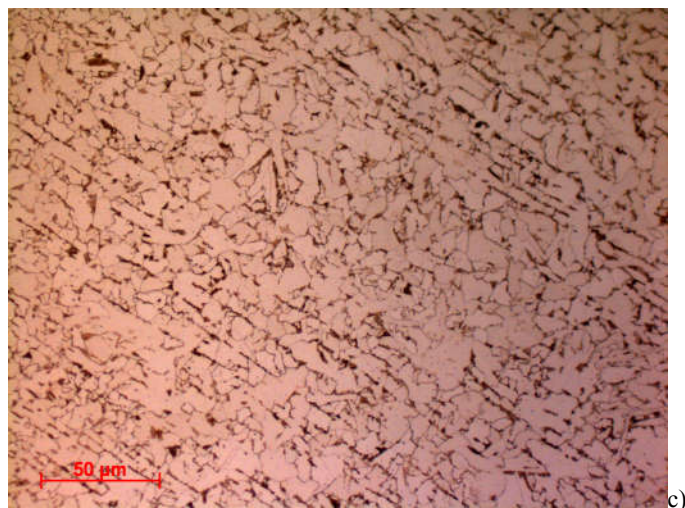
Figura 39 - Micrografias da peça E01 no aumento de 500X representando a) Zona Fundida b) Zona Termicamente Afetada de Grãos Grossos c) Zona Termicamente Afetada de Grãos Finos



Fonte: Autor

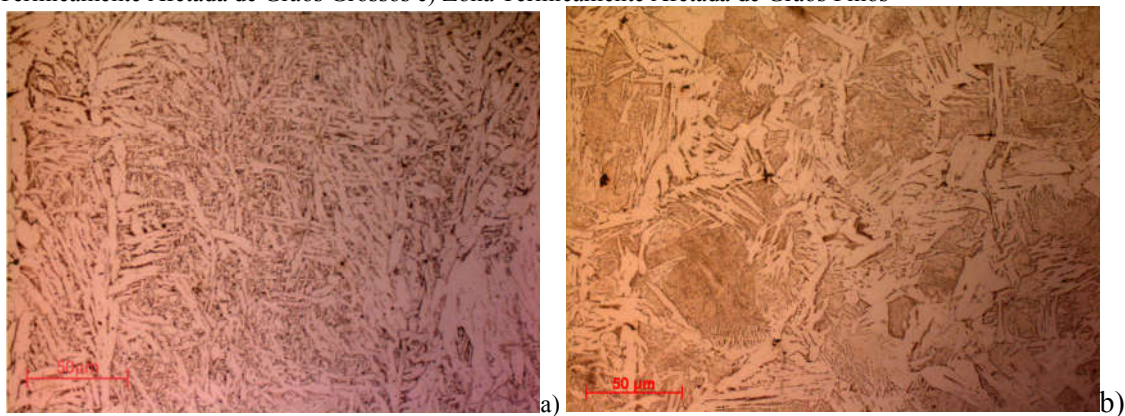
Figura 40 - Micrografias da peça DCC2 no aumento de 500X representando a) Zona Fundida b) Zona Termicamente Afetada de Grãos Grossos c) Zona Termicamente Afetada de Grãos Finos





Fonte: Autor

Figura 41 – Micrografias da peça DGT1 no aumento de 500X representando a) Zona Fundida b) Zona Termicamente Afetada de Grãos Grossos c) Zona Termicamente Afetada de Grãos Finos



Fonte: Autor

As microestruturas obtidas revelam um grão bastante refinado na soldagem realizada com o arame tubular, como mostra a Figura 42. Isso ocorre devido às inclusões apresentadas,

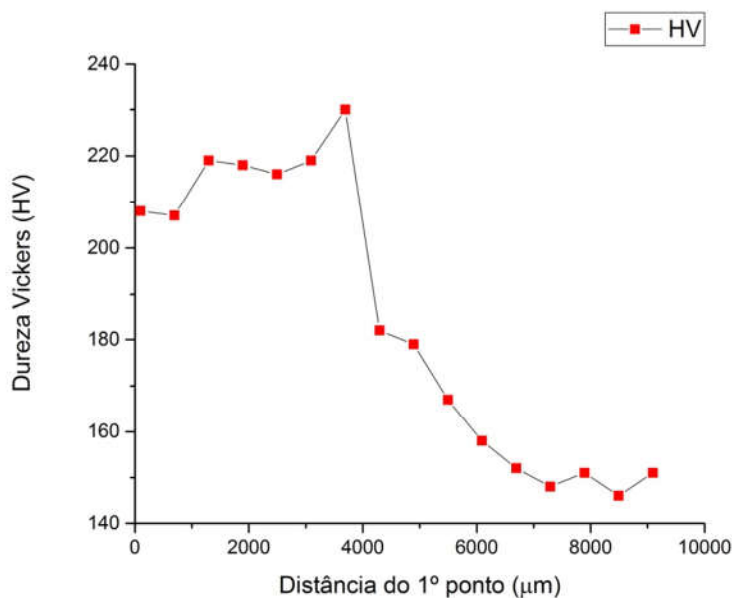
que são agentes nucleantes, com isso, reduzem a taxa de crescimento dos grãos. Observa-se, também, a presença de uma microestrutura acicular, indicando o resfriamento brusco que ocorre durante a soldagem. Além disso, foi percebida uma pequena presença da fase cementita, devido ao baixo teor de carbono tanto do eletrodo quanto do metal de base (Figura 41).

Para as peças soldadas em laboratório com arame maciço, foram obtidas microestruturas semelhantes, como mostram as Figuras 43 e 44, porém, com diferentes refino de grão, já que a energia de soldagem variou entre os dois processos. A presença de ferrita acicular também foi notada nas microestruturas, pelo mesmo motivo citado anteriormente para a peça E01.

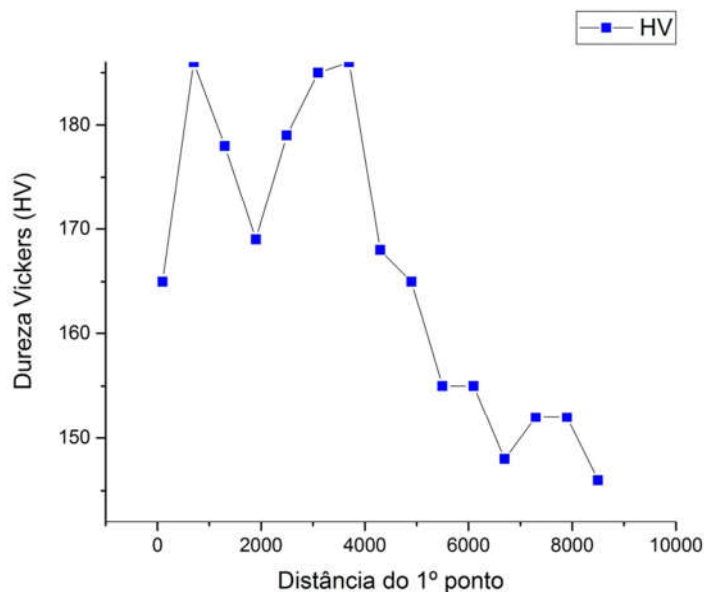
5.6. Microdureza

Foram realizados ensaios de microdureza para as peças E01 e DGT1. Após isso, os resultados foram comparados como mostra a Figura 38. Os pontos foram escolhidos de modo a abranger o Metal de Adição, a Zona Termicamente Afetada e o Metal de Base. O primeiro ponto foi realizado em uma região próxima ao centro da zona fundida.

Figura 42 – Perfil de microdureza das peças a) E01 e b) DGT1



a)



b)

Fonte: Autor

Quanto a dureza dos materiais no metal de base, percebeu-se uma diferença muito grande de dureza, o que pode ser explicado a partir de geração de inclusões na zona fundida do processo FCAW, quanto às outras zonas, as microdurezas não obtêm valores muito discrepantes, já que o material de base é o mesmo para os dois experimentos.

5.7. Custos

Antes de serem aplicadas as fórmulas detalhadas previamente, foi feito o levantamento de alguns dados importantes para os cálculos de custo. As fórmulas utilizadas para o cálculo do custo estão detalhadas na Equação 2 e na Equação 3. Os custos finais por centímetro de solda, considerando apenas os consumíveis dos processos estão detalhados no Quadro 17, Quadro 18 e Quadro 19. É perceptível a vantagem da soldagem em arame tubular quanto ao preço devido ao alto valor do gás Ar + 4%CO₂.

Além disso, não foi preciso fazer comparações quanto a produtividade, já que a soldagem por arame tubular consegue obter um menor preço por centímetro de solda e possui uma maior velocidade de soldagem, ou seja, quando aplicado no cálculo da produtividade, a vantagem do arame tubular irá se acentuar.

A seguir, estão detalhados todos os valores considerados no custo de solda.

Para o eletrodo ER70S-6:

- $\rho_e = 7,48\text{g/cm}^3$
- $P_{kge} = \text{R\$ } 0,008/\text{kg}$
- $A_e = 0,0452\text{ cm}^2$

Para o eletrodo E71T-1

- $\rho_e = 6,37\text{g/cm}^3$
- $P_{kge} = \text{R\$ } 0,0195/\text{kg}$
- $A_e = 0,0452\text{ cm}^2$

Para o gás de proteção:

- P_{lg} de $\text{CO}_2 = \text{R\$ } 0,013/\text{l}$
- P_{lg} de $\text{Ar} + 4\%\text{CO}_2 = \text{R\$ } 0,045/\text{l}$

Quadro 18 – Levantamento de custo por centímetro de solda na soldagem realizada no laboratório com transferência por curto-circuito, arame maciço ER70S-6 e CO_2

ENSAIO D02 - ELETRODO				
P_{kge} (R\$/g)	ρ_e (g/cm ³)	A_e (cm ²)	V_{alim} (cm/min)	V_s (cm/min)
0,008	7,48	0,452	4,5	25,7
CE (R\$/cm) = 0,0047				
ENSAIO D02 - GÁS			PREÇO FINAL - D02	
P_{lg} (R\$/l)	v_{gaz} (l/min)	V_s (cm/min)	R\$ 0,0133/cm de solda	
0,013	17	25,7		
CG (R\$/cm) = 0,0086				

Fonte: Autor

Quadro 19 – Levantamento de custo por centímetro de solda na soldagem realizada no laboratório com transferência goticular, arame maciço ER70S-6 e Ar + 4%CO₂.

ENSAIO D03				
P_{kge} (R\$/g)	ρ_e (g/cm ³)	A_e (cm ²)	V_{alim} (cm/min)	V_s (cm/min)
0,008	7,48	0,452	8,5	55
CE (R\$/cm) = 0,0042				
ENSAIO D03 - GÁS			PREÇO FINAL - D03	
P_{ig} (R\$/l)	v_{gas} (l/min)	V_s (cm/min)	R\$ 0,0202/cm de solda	
0,045	20	55		
CG (R\$/cm) = 0,016				

Fonte: Autor

Quadro 20 – Levantamento de custo por centímetro de solda na soldagem realizada na indústria com transferência goticular, arame tubular E71T-1 e CO₂.

ENSAIO E01				
P_{kge} (R\$/g)	ρ_e (g/cm ³)	A_e (cm ²)	V_{alim} (cm/min)	V_s (cm/min)
0,0195	6,37	0,452	12,5	72
CE (R\$/cm) = 0,0097				
ENSAIO E01 - GÁS			PREÇO FINAL - E01	
P_{ig} (R\$/l)	v_{gas} (l/min)	V_s (cm/min)	R\$ 0,0139/cm de solda	
0,013	23	72		
CG (R\$/cm) = 0,0042				

Fonte: Autor

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos testes de soldagem e na comparação entre os processos permitiram concluir que:

- Para se utilizar CO₂ na soldagem com o arame ER70S-6 é necessária uma velocidade de soldagem baixa, para evitar a geração excessiva de respingos devido ao curto-circuito. Além disso, as peças estudadas possuem uma espessura alta (4,75mm) e a junta requer uma alta taxa de penetração.
- A utilização da transferência goticular permite o processo alcançar maiores velocidades de soldagem, aumentando a produtividade, porém, para ser alcançada tal transferência no arame ER70S-6, é necessário a alteração do gás de proteção para Ar +4%CO₂, o que eleva bastante os custos de soldagem devido ao alto preço deste material.
- Os critérios de escolha dos parâmetros de soldagem se mostraram bastante eficientes, pois permitiram o alcance de perfis de penetração próximos ao da soldagem realizada na empresa e uma boa qualidade nos cordões de solda tanto para aparência quanto para os sinais de tensão e corrente.
- As microestruturas encontradas nas peças soldadas tanto na empresa, quanto em laboratório mostram que a escolha dos parâmetros gerou uma certa diferença na zona fundida, o que ocorreu devido a presença de inclusões presentes na soldagem com processo FCAW.
- Para a aplicação em questão, o arame tubular E71T-1 mostrou-se mais viável economicamente, pois mesmo tendo um maior custo de eletrodo, a diferença é compensada no alto preço do gás Ar +4%CO₂.

7. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ANDRADE, Péricles Barreto de. **Curso Básico de Estruturas de Aço**. 2 ed. Belo Horizonte: IEA Editora, 1994. 192 p.

ARGENTA, M. A. **Notas de Aula de Estruturas Metálicas: Capítulo 10 – Soldas**. 2016. pp. 99 – 112. Universidade Federal do Paraná – Curso de Engenharia Civil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. 2008. 237 f.

ASM HANDBOOK. **Vol. 6 – Welding Brazing and Soldering**. ASM International The Materials Information Company, 1993.

CARNEIRO, J. C. S. **Estudo da Transferência Metálica no Processo de Soldagem MIG/MAG através da Dimensão Fractal do Sinal de Tensão**. 2005. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

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 20 nov. 2017.

CHIAVERINI, Vicente. **Aço e Ferros Fundidos**. São Paulo: ABM–Associação Brasileira de Metais, p. 321-358, 1998.

ESAB. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. 2005. 68f.

ESAB. **Apostila de Arames Tubulares**. 2004. 51f.

Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem. 1987. **Volume 1. Fascículo 1. Módulo 05 – Processos de Soldagem**.

GARCIA, Regina Paula; SCOTTI, Américo. **Uma Metodologia para Análises Comparativas da Capacidade Produtiva entre Arames Maciços (MIG/MAG) e Tubulares (Eletrodo Tubular)**. Soldag. insp. São Paulo, Vol.16, No. 2, p.146-155, Abr/Jun 2011.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011. 352p.

MODENESI, Paulo J. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. 2011. 158f. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal de Minas Gerais.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. 2002. 65f. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal de Minas Gerais.

PANNONI, Fabio Domingos. **Aços Estruturais**. 2005.

PRAVIA, Z.M.C e DREHMER, G.A. **Estruturas de Aço**. 2004. 76f. Grupo de pesquisa em estruturas metálicas e de madeira – Faculdade de Engenharia e Arquitetura – Universidade de Passo Fundo.

SOUZA, Cláudio Ivanei e FERRARESI, Valtair Antônio. **Análise Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW com Transferência Metálica por Curto-circuito na Posição Horizontal** Soldag. Insp. São Paulo, Vol. 18, Nº. 03, p.268-280, Jul/Set 2013.

SOUZA, Daniel et al. **Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito**. Soldag. insp. São Paulo, Vol. 16, No. 1, p.022-032, Jan/Mar 2011.

TEOBALDO, Izabela Naves Coelho. **Estudo do aço como objeto de reforço estrutural em edificações antigas**. 2004. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.