



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

JAMIL NOBRE DE CASTRO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS DE
CURTO CIRCUITO CONVENCIONAL E CONTROLADO A
PARTIR DE SOLDAGENS EXPLORATÓRIAS POR SIMPLES
DEPOSIÇÃO E PASSE DE RAIZ EM SOLDAGEM MIG/MAG**

FORTALEZA

2017

JAMIL NOBRE DE CASTRO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS DE
CURTO CIRCUITO CONVENCIONAL E CONTROLADO A
PARTIR DE SOLDAGENS EXPLORATÓRIAS POR SIMPLES
DEPOSIÇÃO E PASSE DE RAIZ EM SOLDAGEM MIG/MAG**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

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)

C351e Castro, Jamil Nobre de.
Estudo comparativo entre as técnicas de curto circuito convencional e controlado a partir de soldagens exploratórias por simples deposição e passe de raiz em soldagem MIG/MAG / Jamil Nobre de Castro. – 2017. 66 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. Soldagem. 2. MIG/MAG. 3. Curto Circuito. 4. CCC. 5. SAE 4140. I. Título.

CDD 669

JAMIL NOBRE DE CASTRO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS DE
CURTO CIRCUITO CONVENCIONAL E CONTROLADO A
PARTIR DE SOLDAGENS EXPLORATÓRIAS POR SIMPLES
DEPOSIÇÃO E PASSE DE RAIZ EM SOLDAGEM MIG/MAG

Trabalho de conclusão de curso apresentada
ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Uni-
versidade Federal do Ceará, como requisito
parcial para obtenção do título de Engenheiro
Metalúrgico.

Aprovado em: _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. Willys Machado Aguiar; D. Sc.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará-IFCE

Aos meus pais, José Falcão e Maria Helena.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha família, em especial meus pais e minha irmãs, pela força e apoio que recebi. Agradeço também:

- Ao meu orientador, Prof. Marcelo Ferreira Motta, que me acompanhou ao longo da minha graduação, sendo também meu orientador de Iniciação Acadêmica e de PET e a quem eu tenho imenso respeito e admiração.
- Ao Prof. Willys Machado pelos valiosos ensinamentos.
- Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais com quem tanto aprendi ao longo da graduação.
- Ao LPTS, onde tive liberdade para operar os equipamentos e aos colegas de laboratório David, Everton, Salvador, Victor Leão, Igor Paulino, Bruno Ribeiro, Edson, Bruno Henrique e Lucas Coelho que me ajudaram ao longo desse projeto.
- Ao PET Metalúrgica e aos amigos que fiz quando bolsista, Jeová, Fabrício, Joshua, Isaque, Ícaro, Isaac, Felipe e Beatriz
- Ao meu amigo Flávison de Almada pela ajuda em escrever meu TCC no Latex.
- Aos meus colegas de curso com quem convivi durante o período de estágio em Volta Redonda Emerson de Souza, Diego Dias, Walisson Gomes, Pablo Leão e Alexandre Jataí.
- Ao meu orientador de estágio Victor Correa, com quem tanto aprendi na Companhia Siderúrgica Nacional e também aos colegas de zincagem Fábio Gomes, Leonardo Marcelino, Aluênio (in memoriam), Alexandre, Alan, Flávio, Justino e outros que não citei mas que contribuíram com meu desenvolvimento pessoal e profissional durante o período de estágio.

"Eu sou apenas um rapaz latino americano sem dinheiro no banco sem parentes importantes e vindo do interior..."
(Belchior)

Resumo

A Soldagem por curto circuito é obtida regularmente em fontes com tensão constante, ajustadas com baixos valores de tensão e corrente elétrica e curta DBCP. Esse processo tem como vantagem a soldagem em todas as posições e o uso de baixas energias, que otimizam seu uso em chapas muito finas e em de passes de raiz. No entanto, a desvantagem é que a qualidade da solda tende a ser inferior às soldagens realizadas no modo de transferência spray, com baixa estabilidade do arco e presença de muitos respingos. Para amenizar esse problema, foi desenvolvido por alguns fabricantes de fontes de soldagem a opção "Curto Circuito Controlado"(CCC), que controla a transferência metálica através da imposição de uma forma de onda de corrente. A proposta do presente trabalho é comparar as formas de curto circuito convencional e controlado a partir de soldagens exploratórias e em passe de raiz, utilizando como metodologia ensaios exploratórios na posição plana e vertical descendente. O arame utilizado foi o AWS ER 70S-6 e o metal de base dos ensaios exploratórios foi o ASTM A-36 e nas soldagens de passe de raiz foi o SAE 4140. Para redução do número de ensaios preliminares foi utilizado o Método Taguchi e como critério de estabilidade foi utilizado o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto Circuito, cujo símbolo é IV_{cc} . As soldagens foram realizadas no robô KUKA do Laboratório de Pesquisa em Tecnologia da Soldagem (LTPS) no Campus do Pici. As soldas foram analisadas quanto ao índice de estabilidade IV_{cc} , geometria do cordão, microdureza, extensão da ZAC, tamanho de grão e propriedades metalúrgicas. A análise de variância dos ensaios exploratórios apontaram que a DBCP foi estatisticamente influente na corrente média, Energia e penetração, enquanto o ângulo de soldagem foi influente na largura e no IV_{cc} e a técnica de curto circuito foi influente na Tensão média, Energia e IV_{cc} . Após o término do trabalho concluiu-se que o CCC possui mais parâmetros de operação, mas que uma vez bem definidos consegue realizar uma soldagem com menos respingos e mais estável do que o curto circuito convencional.

Palavras-chaves: MIG/MAG. Curto circuito. CCC. IV_{cc} . SAE 4140.

Abstract

Short-circuit transfer is regularly obtained from sources with constant voltage, adjusted with low values of voltage and electric current and short CTWD. This process has the advantage of welding in all positions and the use of low energies, which optimize its use in very thin plates and in root passes. However, the disadvantage is that the quality of the weld tends to be lower than the weld performed in the spray transfer mode, with low arc stability and the presence of many spatters. To alleviate this problem, the "Controlled Short Circuit" (CCC) method was developed by some manufacturers of welding sources, which controls the metal transfer through the imposition of a current waveform. The purpose of the present work is to compare the conventional and controlled short circuit forms of welding and make exploratory welding, using as methodology exploratory tests in the vertical and plane position. To reduce the number of preliminary tests, the Taguchi Method was used and the Villarinho Stability (IVcc) was used as stability criterion. The welding was carried out in the KUKA robot of the Laboratory of Research in Welding Technology (LTPS) in the Pici Campus. The welds were analyzed for IVcc, bead geometry, microhardness, ZAC extent, grain size and metallurgical properties. The analysis of variance of the exploratory tests showed that the DBCP was statistically influential in Im, Energy and penetration, while the welding angle was influent in the width and IVcc and the short circuit technique was influent in the Medium voltage, Energy and IVcc. After finishing the work, it was concluded that the CCC has more operating parameters, but once well defined it can perform a welding with less spatter and more stable than the conventional short circuit.

Key-words: MIG/MAG. CCC. Short circuit. IVcc. SAE 4140.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Processos de soldagem por fusão.	19
Figura 2 – Influencia da polaridade na geometria do cordão de solda e no fluxo de elétrons	20
Figura 3 – Bocal da tocha do processo MIG/MAG.	21
Figura 4 – Principais transferências metálicas.	23
Figura 5 – Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio (esquemático).	24
Figura 6 – Comprimento do arco, DBCP e Stick-out.	24
Figura 7 – Efeito da DBCP na corrente de soldagem.	25
Figura 8 – Efeito do ângulo de soldagem na geometria do cordão de solda.	25
Figura 9 – Corrente e tensão em soldagem por curto circuito em fontes do tipo tensão constante.	27
Figura 10 – Forma de onda Curto Circuito Controlado Soft.	28
Figura 11 – Macroestruturas de soldas por fusão (Gráfico esquemático).	29
Figura 12 – Regiões da ZAC e respectivas temperaturas.	30
Figura 13 – Diagramas TTT e TRC do aço SAE 4140.	31
Figura 14 – Terminologia de um chanfro.	33
Figura 15 – Bancada de soldagem.	34
Figura 16 – Influência dos fatores de controle no IV_{cc} utilizando o software STATISTICA.	41
Figura 17 – Influência da DBCP (mm) na corrente média (A)	44
Figura 18 – Influência da técnica de curto circuito na tensão média (V)	44
Figura 19 – Influência dos fatores na energia de soldagem (kJ/mm)	45
Figura 20 – Influência dos fatores no índice de estabilidade (IV_{cc})	45
Figura 21 – Influência do ângulo de soldagem na largura do cordão de solda (mm)	45
Figura 22 – Influência da DBCP na penetração do cordão de solda (mm)	45
Figura 23 – Passe de raiz com c.c Convencional sem preaquecimento com trincas.	47
Figura 24 – Passe de raiz com CCC Soft sem preaquecimento com trincas.	47
Figura 25 – Trinca na região da ZAC.	48
Figura 26 – Metal de base, peça como recebida.	48

Figura 27 –Microestrutura de um aço SAE 4140 soldado com uma energia de 1,5 Kj/mm.	49
Figura 28 –Passe de raiz com c.c Convencional com preaquecimento.	50
Figura 29 –Passe de raiz com CCC Soft com preaquecimento.	50
Figura 30 –Metal de base, peça normalizada com faixas claras.	51
Figura 31 –Microdurezas no metal de base	51
Figura 32 –Microestrutura da ZAC no passe de raiz com preaquecimento utilizando c.c Convencional.	52
Figura 33 –Microestrutura da ZAC no passe de raiz com preaquecimento. utilizando CCC Soft.	52
Figura 34 –ZAC de Grãos Grossos.	53
Figura 35 –ZAC de Grãos Finos.	53
Figura 36 –ZAC GF com faixas claras.	54
Figura 37 –ZAC GF com faixas claras.	54
Figura 38 –Indentações de microdureza nas faixas claras da ZAC	55

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de composição química	33
Tabela 2 – Tabela de parâmetros fixos	34
Tabela 3 – Matriz ortogonal L9 (3^4) com as combinações entre os níveis dos fatores	35
Tabela 4 – Fatores e níveis dos parâmetros	36
Tabela 5 – Matriz de experimentos apontada pelo método Taguchi	37
Tabela 6 – Ordem das soldagens na posição vertical	38
Tabela 7 – Soldagens de passe de raiz	39
Tabela 8 – Soldagens de c.c Convencional na posição plana	41
Tabela 9 – Valores de significância (Valor-P) dos fatores na redução do IVcc	42
Tabela 10 – Resultados da aquisição de sinais e da macrografia	43
Tabela 11 – Significância (Valor P) entre os fatores e as respostas	44
Tabela 12 – Parâmetros definitivos do Curto circuito convencional	46
Tabela 13 – Parâmetros definitivos do Curto Circuito Controlado Soft	46
Tabela 14 – Soldagem de passe de raiz com preaquecimento	55

Lista de abreviaturas e siglas

MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active gas
GMAW	Gas Metal Arc Welding
CCC	Curto Circuito Controlado
c.c	Curto Circuito
TIG	Tungsten Inert Gas
DBCP	Distância Bico de Contato a peça
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
Vs	Velocidade de soldagem
Va	Velocidade de alimentação
ZF	Zona Fundida
MB	Metal de Base
If	Corrente de manutenção do arco
Ia	Corrente de pico de arco
ta	tempo de pico de arco
I _{rps}	Taxa de variação de subida da corrente durante o curto em A/ms
I _{rp} d	Taxa de variação de descida da corrente em A/ms;
td	tempo de atraso de subida da corrente após o curto circuito

Sumário

Introdução	16
Objetivos	17
I Fundamentação teórica	18
1 O arco elétrico	19
2 Introdução ao processo MIG/MAG	21
2.1 Gases de proteção	22
2.2 Transferência metálica	23
2.3 Distância Bico de Contato a Peça (DBCP)	24
2.4 Ângulo de soldagem	25
3 Transferência por curto circuito	26
3.1 Curto circuito Convencional	26
3.2 Curto Circuito Controlado SOFT	27
3.3 Estabilidade	28
4 Transformações metalúrgicas pós soldagem	29
4.1 Zona Afetada pelo Calor	29
II Materiais e métodos	32
5 Materiais e equipamentos utilizados	33
6 Metodologia	34
6.1 Método Taguchi/Projeto Robusto	35
6.2 Ensaios exploratórios na posição plana	36
6.3 Ensaios exploratórios na posição vertical	37
6.4 Soldagem de passe de raiz	38
III Resultados e discussão	40
7 Ensaios exploratórios	41
7.1 Resultados dos ensaios exploratórios na posição plana	41

7.2	Resultados dos ensaios exploratórios na posição vertical	42
8	Soldagem de passe de raiz	47
8.1	Passe de raiz sem preaquecimento	47
8.1.1	Metal de base	48
8.1.2	Zona Afetada pelo Calor	49
8.2	Passe de raiz com preaquecimento	49
8.2.1	Metal de base	50
8.2.2	Zona Afetada pelo Calor	51
8.3	Sinais de corrente e tensão	55
	Conclusão	56
	Referências	57
	Anexos	59
ANEXO A	Curto Circuito Convencional: ângulo de 0° (posição vertical)	60
ANEXO B	Curto Circuito Controlado: ângulo de 0° (posição vertical)	61
ANEXO C	Curto Circuito Convencional: ângulo de +15° (posição vertical) . .	62
ANEXO D	Curto Circuito Controlado: ângulo de +15° (posição vertical) . .	63
ANEXO E	Curto circuito Convencional: ângulo de -15° (posição vertical) . .	64
ANEXO F	Curto Circuito Controlado: ângulo de -15° (posição vertical) . . .	65
ANEXO G	Junta antes da soldagem de passe de raiz	66
ANEXO H	Junta após a soldagem de passe de raiz	67

Introdução

Entre os processos de soldagem, o MIG/MAG se destaca pela sua alta produtividade, que pode ser alcançada através de uma série de fatores tais como elevadas taxas de deposição, facilidade em automação e elevado fator de trabalho e além disso pode manter a qualidade requerida em diversas aplicações (SILVA, 2005). Outra característica desse processo é a sua alta versatilidade, que lhe permite soldar fora de posição, chapas finas, revestimentos metálicos, metais não ferrosos e recentemente vem sendo motivo de estudos a sua maior aplicação em passes de raiz com abertura, sendo esse último tema do trabalho de Filho (2014), que em seu trabalho sugere o maior emprego de soldagem MIG/MAG com transferência por curto circuito substituindo os processos tradicionais Eletrodo Revestido e TIG. Estes dois últimos processos de soldagem tem como desvantagem a baixa produtividade comparado com o processo MIG/MAG.

A transferência metálica por curto circuito tem como principal vantagem o uso de uma baixa energia de soldagem, já que possui baixos valores de corrente e tensão médios, o que permite a soldagem de materiais com pequena espessura e em todas as posições e sua aplicação em passe de raiz com abertura é possível porque com baixa energia de soldagem a poça de fusão se solidifica rapidamente, impossibilitando o vazamento para fora da junta. No entanto, a desvantagem desse tipo de transferência é de que a qualidade da solda tende a ser irregular, com baixa estabilidade do arco e presença de muitos respingos. Para amenizar esse problema, foi desenvolvido o Curto Circuito Controlado (CCC), que controla a transferência metálica através da imposição de uma forma de onda de corrente, que possibilita maior estabilidade na transferência de curto circuito, evitando a formação de respingos grosseiros e choques abruptos do arame com a peça, aumentando a confiabilidade e produtividade do processo (FOGLIATTO, 2013).

O objetivo principal deste presente trabalho é comparar o curto circuito convencional com o controlado através de soldagens exploratórias com o intuito de conhecer melhor suas características e estimular a transferência por curto circuito na soldagem de passe de raiz. Foram definidos alguns parâmetros como fixos e nas soldagem com passe de raiz foi avaliado também a influência do preaquecimento nas propriedades da junta. Após a soldagem, as soldas foram analisadas quanto aos critérios de geometria do cordão, microdureza e microestruturas do metal de base e ZAC.

Objetivos

Objetivo geral: Estudo comparativo entre as transferências por curto circuito no modo convencional e controlado na soldagem de passe de raiz fora da posição plana com e sem preaquecimento em soldagem MIG/MAG.

Objetivos específicos: Identificar as variáveis mais significativas e suas influências nas características quanto à estabilidade do arco e ao aspecto geométrico do cordão de solda através de soldagens exploratórias.

Parte I

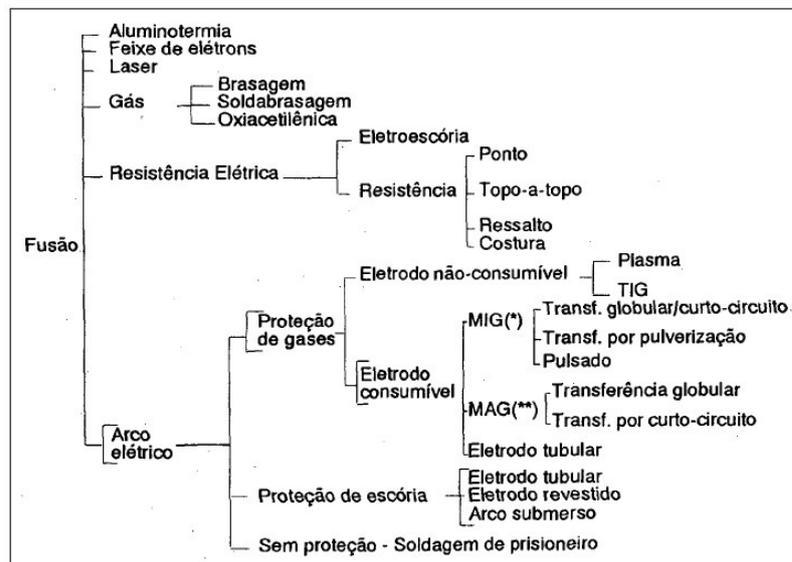
Fundamentação teórica

1 O arco elétrico

Uma característica comum aos gases é a de serem não condutores de eletricidade em condições normais. Entretanto, sob condições favoráveis, tais como altas temperaturas, baixíssimas pressões ou submetido a um campo elétrico de altíssima intensidade, os gases podem se ionizar, ou seja, seus átomos podem liberar ou receber elétrons, tornando-se cátions ou ânions e passando para o quarto estado da matéria chamado *plasma*, que é um meio condutor de eletricidade. Com um fluxo de elétrons saindo do polo negativo (cátodo) em direção ao ânodo é estabelecido um arco elétrico de soldagem, que resulta na produção de radiação e calor, podendo produzir energia suficiente para os processos de soldagem ou corte (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

O arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada nos processos de soldagem por fusão, como podemos ver na Figura 1. Isso se deve a uma combinação ótima de características, tais como uma concentração adequada de energia para a fusão do metal de base, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos à saúde (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2005).

Figura 1 – Processos de soldagem por fusão.



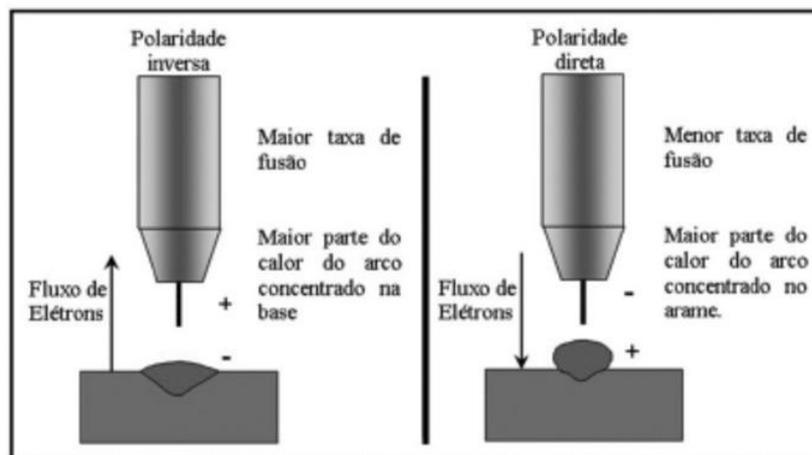
Fonte: (WAINER, 1992)

O sentido de transferência dos elétrons após a abertura do arco depende da polaridade utilizada na fonte de soldagem. Se utilizado Corrente Contínua Eletrodo Positivo (CCEP, CC+ ou polaridade inversa), os elétrons viajam da peça para o eletrodo. Assim sendo, a poça de fusão constitui a região catódica, de onde os elétrons são emitidos, e a ponta do arame-eletrodo a região anódica, onde os elétrons são recebidos. O con-

trário acontece para a corrente contínua eletrodo negativo (CCEN, CC- ou polaridade direta)([FOGLIATTO, 2013](#)).

A grande maioria das aplicações em MIG/MAG usam polaridade inversa. Essa condição mantém o arco mais estável, transferência metálica mais suave, menor quantidade de respingos, melhor soldabilidade e maior penetração do que a polaridade inversa, que tem como única vantagem a maior taxa de fusão do arame-eletrodo mas é raramente usada devida a sua grande instabilidade de transferência metálica.([HANDBOOK, 1991](#)). A imagem 2 apresenta a influência da polaridade na penetração da solda e no fluxo de elétrons em soldagem MIG/MAG.

Figura 2 – Influência da polaridade na geometria do cordão de solda e no fluxo de elétrons



Fonte: ([SOUZA; RESENDE; SCOTTI, 2009](#))

Em soldagem MIG/MAG, o comprimento do arco é uma variável independente e sua dimensão depende de muitas variáveis tais como diâmetro e composição do arame-eletrodo, tipo de gás de proteção e técnica de soldagem utilizada. Uma vez que todas as variáveis são mantidas constantes, o comprimento do arco é diretamente relacionado com a voltagem estabelecida. Voltagens muito altas resultam em comprimento de arco grande, que pode resultar em falta de proteção e porosidade e voltagens muito baixas podem fazer com que o arame não sofra fusão. ([HANDBOOK, 1991](#)).

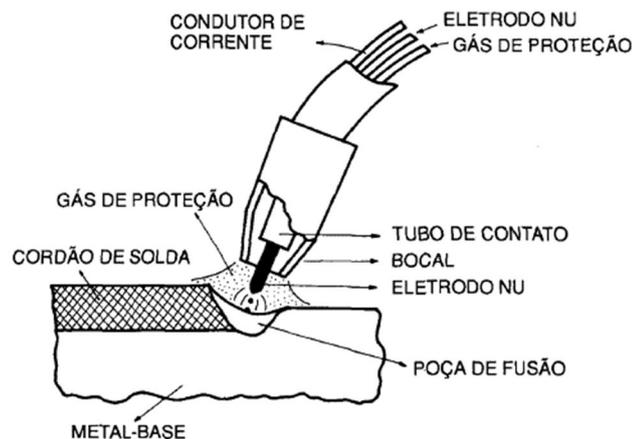
O comprimento do arco também está vinculada às propriedades físico-químicas dos gases de proteção, destacando-se o potencial de ionização e a condutividade térmica do gás. O potencial de ionização é a energia necessária para ionizar o gás e tanto a abertura quando a estabilidade do arco são influenciadas fortemente por essa propriedade ([SCOTTI; PONOMAREV, 2008](#)). Desta forma o gás Argônio (baixo potencial de ionização) possui menor tensão de arco e maior facilidade na abertura do arco do que o gás Hélio ([WAINER, 1992](#)).

2 Introdução ao processo MIG/MAG

Os processos MIG (Metal Inert Gas) e MAG (Metal Active Gas), também chamado de GMAW (Gas Metal Arc Welding) pela AWS, baseiam-se na utilização da fonte de calor de um arco elétrico mantido por um gás ionizado entre a extremidade de um arame nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar (MODENESI, 2005). O metal fundido é protegido de oxidação e contaminação por um fluxo de gás inerte (Ar ou He) ou gás ativo (O_2 , CO_2 ou N_2), podendo também ser utilizada uma mistura destes gases. O arame consumível também é denominado de arame eletrodo, visto que passa a atuar como um condutor elétrico a partir do bico de contato, ponto de contato elétrico junto à tocha de soldagem (FOGLIATTO, 2013). Este processo teve início de desenvolvimento em 1948 e atualmente é bastante utilizado devido aos seguintes fatores: O metal de solda é depositado com baixo conteúdo de hidrogênio, maior taxa de deposição quando comparado com eletrodo revestido, facilidade de operação e conveniência para robotização (MACHADO, 1996).

Para a realização da soldagem MIG/MAG é necessária uma tocha (figura 3) na qual entram o gás de proteção e o arame (através de um conduíte). A tocha possui um gatilho para liberação da energia e do arame, e em sua ponta, ficam o tubo de contato e um bocal (figura 3) (WAINER, 1992).

Figura 3 – Bocal da tocha do processo MIG/MAG.



Fonte: (WAINER, 1992)

A diferença de potencial entre o arame eletrodo e a peça a ser soldada é produzida por uma fonte de soldagem, que tem como principais funções fornecer energia elétrica para o arco e fazer a regulação da tensão e da corrente elétrica. Após o início da soldagem, o arame movimenta-se em direção à peça com velocidade predeterminada e após encostar

na peça acontece um curto circuito e tensão cai para um valor próximo de zero e o arco é iniciado (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Durante a soldagem, a quantidade de metal fundido precisa ser igual a quantidade de metal alimentado, senão resultará em problemas, como por exemplo a queima do bico de contato (taxa de fusão > taxa de alimentação) ou choque abrupto do arame na peça (taxa de fusão < taxa de alimentação). Por isso, para um aumento na velocidade de alimentação é recomendado também um aumento da corrente (ESAB, 2005).

2.1 Gases de proteção

Os gases usados no processo GMAW têm a função de formar uma barreira física, evitando que o metal fundido na poça de fusão entre em contato com os gases da atmosfera. Sem essa proteção, gases como H₂, N₂ e O₂ seriam absorvidos pela metal fundido e após a solidificação, com a queda de solubilidade dos gases, ocorrerão defeitos como poros, trincas e inclusões de óxidos (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). Os gases exercem outros efeitos adicionais e não menos importante, como estabilizar o arco, controlar a operacionalidade e transferência do metal, influir sobre a geometria, propriedades mecânicas e características metalúrgicas da solda (FOGLIATTO, 2013). Para garantir a eficiência de proteção necessária é preciso reduzir ao máximo a incidência de correntes de ar e o fluxo de gás de proteção deve ser ajustado de acordo com a densidade do gás utilizado e a posição de soldagem e a geometria da junta (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Para a soldagem dos aços, entretanto, deve ser adicionado um gás ativo (O₂ ou CO₂) ao gás inerte. Isso torna o arco estável e reduz o salpico, através da ação benéfica sobre a tensão superficial e intensificação da ionização, além de aumentar sensivelmente a fluidez da poça de fusão, resultando num cordão com geometria conveniente (MACHADO, 1996).

O gás ativo CO₂ tem como principal efeito restringir o arco e, conseqüentemente, causar uma redução de área da interface arco-gota, em comparação com outra mistura mais pobre em CO₂, em regulagens de processo semelhantes. Este comportamento se deve a maior condutividade térmica do CO₂, e tende a originar uma força na gota em sentido contrário ao seu destacamento, o que, por sua vez, tende a levar o processo ao modo de transferência por curto circuito. No entanto, não se pode afirmar que é função do CO₂ definir o modo de transferência de determinada solda, pois isso dependerá, principalmente, da variável corrente. Esta força é a razão pela qual também há maior tendência a respingos, conforme o aumento de CO₂ no gás (SILVA, 2005).

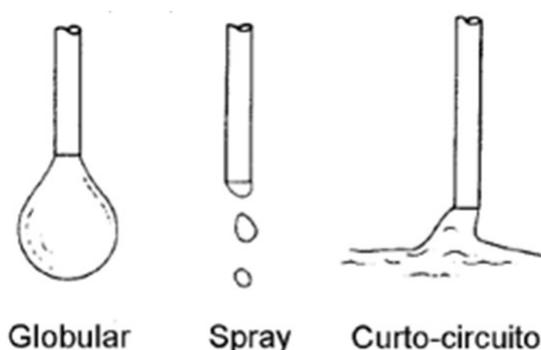
2.2 Transferência metálica

O modo como o metal fundido é transferido desde o eletrodo para a peça é determinado por complexas interações de forças, as quais são influenciadas por fatores como natureza do gás de proteção, polaridade e tipo da corrente, densidade da corrente, tensão, extensão do eletrodo após o contato elétrico, composição química e diâmetro do eletrodo, características específicas da fonte de potencia, pressão do ambiente. Dentre todos os fatores mencionados, a corrente de soldagem é o que exerce a maior influência (MACHADO, 1996).

De uma forma simplificada, pode-se considerar que no processo MIG/MAG existem quatro formas básicas de transferência de metal de adição do eletrodo para a peça: transferência por curto circuito (baixa corrente de soldagem e baixa tensão do arco elétrico), transferência globular (baixa corrente de soldagem e moderada a alta tensão do arco elétrico), transferência goticular ou spray (alta corrente de soldagem e alta tensão do arco elétrico), e transferência controlada (forma de onda de corrente é projetada para que se obtenha um dimensionamento adequado das gotas transferida) (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2005). Um exemplo de transferência controlada é o Curto Circuito Controlado SOFT da IMC utilizado no presente trabalho, que é assim designado porque a forma de onda da corrente é definida pelo operador a partir do ajuste na fonte de soldagem para que o início do curto circuito e a reabertura do arco aconteçam nos momentos desejados.

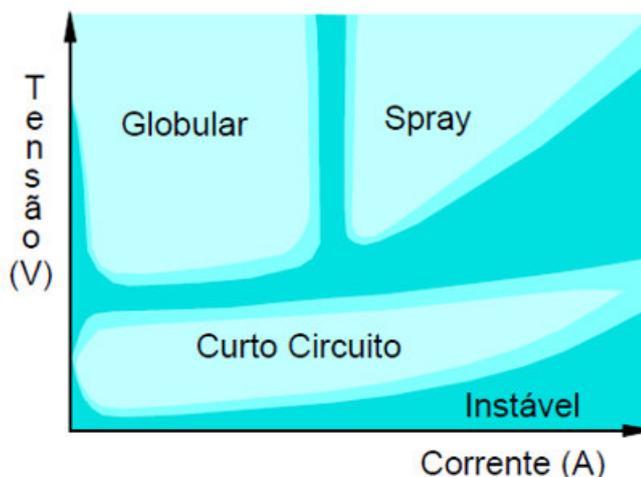
Na Figura 4 é possível ver as principais transferências metálicas e na Figura 5 os campos operacionais das formas principais de transferência em função da corrente e da tensão na soldagem com eletrodo positivo e um gás de proteção a base de argônio. Existe uma corrente de transição em que para abaixo dela a transferência ocorre por curto circuito e acima ocorre globular .

Figura 4 – Principais transferências metálicas.



Fonte: (MODENESI, 2011)

Figura 5 – Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio (esquemático).

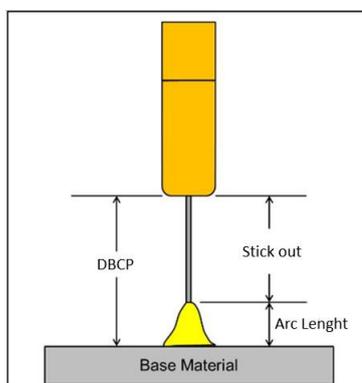


Fonte:(MODENESI, 2011)

2.3 Distância Bico de Contato a Peça (DBCP)

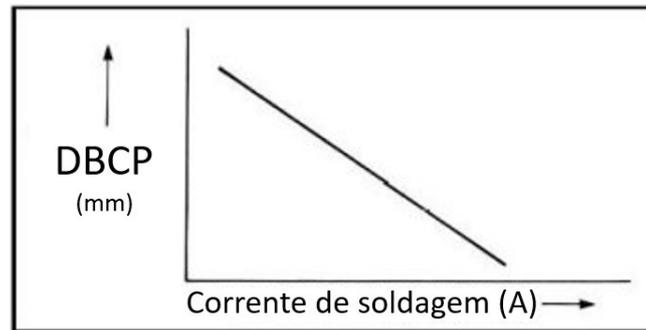
A Distância de Bico de Contato a Peça (DBCP) é considerada uma variável de soldagem do processo MIG/MAG e a sua variação afeta tanto o comprimento do arame eletrodo energizado (“stickout”) quanto o comprimento de arco (figura 6), fatores estes que têm influência na corrente média e na frequência de transferência metálica. A figura 7 mostra a relação entre a DBCP e a corrente de soldagem. Basicamente, à medida que a DBCP aumenta, a resistência elétrica entre o arame e a peça aumenta e a corrente de soldagem diminui (ESAB, 2005).

Figura 6 – Comprimento do arco, DBCP e Stick-out.



Fonte: <https://ewi.org/eto/wp-content/uploads/2012/08/CTWD-vs.-ESO1.png>. Acessado em 28/06/2017)

Figura 7 – Efeito da DBCP na corrente de soldagem.

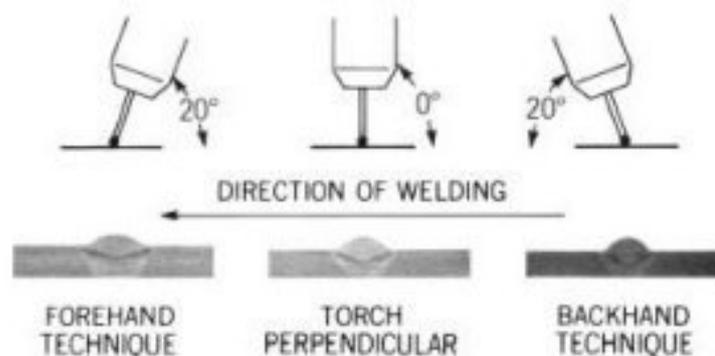


Fonte: (ESAB, 2005)

2.4 Ângulo de soldagem

A inclinação da tocha ou ângulo de deslocamento da tocha é o ângulo entre o eixo do eletrodo e a linha normal ao eixo do cordão de solda (figura 8). Quando o ângulo é positivo (técnica “puxando”) ou seja, eletrodo apontando para o cordão já formado, o cordão de solda apresenta maior penetração, menos salpicos, é mais estreito, mais convexo e o arco é mais estável. Quando se utiliza o ângulo negativo (técnica “empurrando”) estão presentes diversas características tais como menor penetração, mais salpicos, cordão mais plano e mais largo. Esta técnica é empregada quando grandes valores de penetração não são requeridos. Quando se utiliza o ângulo nulo (0°), tem-se características intermediárias dos dois casos citados anteriormente (HANDBOOK, 1991)).

Figura 8 – Efeito do ângulo de soldagem na geometria do cordão de solda.



Fonte: (ESAB, 2005)

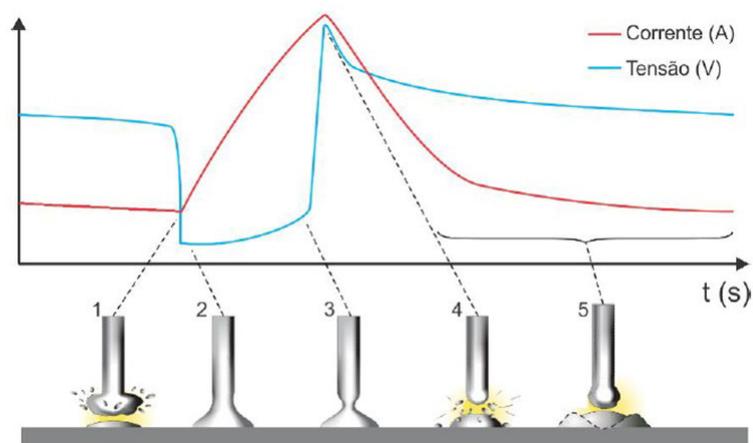
3 Transferência por curto circuito

Em soldagem MIG/MAG, para baixos valores de tensão e corrente, a velocidade de alimentação pode exceder sua taxa de fusão e a ponta do arame encostará na poça de fusão, ocasionando um curto circuito. Nesse momento a tensão do arco diminuirá para próximo de zero e a corrente elétrica aumentará até que a gota fundida na ponta do arame seja puxada para a poça de fusão pela tensão superficial desta, caracterizando a transferência por curto circuito (MACHADO, 1996; WAINER, 1992). Por apresentar baixos valores de corrente e tensão médias, este modo de transferência é utilizado quando é desejada baixa energia e pouca penetração, por isso é bastante utilizada em chapas finas, onde deve ser usada baixa energia para que o arco não fure a chapa, em soldagem fora de posição porque com baixa energia a poça de fusão se solidificará rapidamente e não escorrerá e em passes de raiz é necessária baixa energia para que a abertura seja preenchida sem escorrer para fora da poça de fusão.

3.1 Curto circuito Convencional

Em fontes soldagem MIG/MAG se for escolhido o modo tensão constante também conhecido como "Convencional", para baixos valores de corrente e tensão a transferência metálica ocorre por curto circuito e possui uma curva de corrente e tensão característica. Na figura 9 é possível ver as etapas na transferência por curto circuito. Em (1) temos o início do curto circuito, quando a gota fundida na ponta do arame está na iminência de encostar na peça e a tensão reduz para próximo de zero. Em (2) o arco elétrico foi extinto e a corrente elétrica começa a subir rapidamente. Em (3) temos um pico de corrente e a força eletromagnética atua comprimindo a gota (efeito pinch). Em (4) a gota é destacada e puxada para a poça de fusão pela tensão superficial desta e o arco é reaberto. Em (5) a gota começa a crescer de novo até encostar novamente na poça de fusão (FILHO, 2014). Nas fontes de soldagem é possível alterar a indutância de subida (K_s) e descida (K_d) que é a taxa com que a corrente elétrica sobe após o curto circuito e reduz após a reabertura do arco, funcionando como um “amortecedor da variação da corrente”.

Figura 9 – Corrente e tensão em soldagem por curto circuito em fontes do tipo tensão constante.



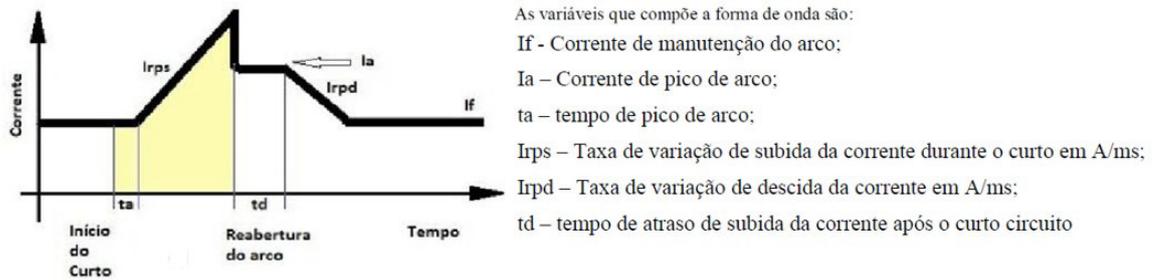
Fonte: (FILHO, 2014)

3.2 Curto Circuito Controlado SOFT

Para otimizar a transferência por curto circuito, pesquisas vêm sendo realizadas nas últimas décadas para aumentar a estabilidade do processo, reduzir os salpicos, melhorar a geometria do cordão de solda e também sua qualidade visual (aparência). Assim surgiram as chamadas transferências controladas do metal (CCC), nas quais as gotas se transferem de maneira sincronizada com as formas de onda reguladas nos equipamentos de soldagem (FOGLIATTO, 2013). Para redução da geração de respingos é necessário que a corrente fornecida pela fonte de energia, tanto no início do curto circuito como no instante do rompimento da ponte do metal líquido seja baixa (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). As fontes de soldagem mais modernas que contam com a tecnologia do CCC tem um mecanismo de detecção do início do curto circuito em função da queda de tensão, assim como a sua abertura.

O Curto Circuito Controlado Soft usado no presente trabalho é uma tecnologia da IMC presente nas fontes de soldagem Digilplus A7. A figura 1 apresenta a forma de onda desta modalidade, onde em amarelo é representada o período de curto circuito. O controle da corrente é feito, tanto durante o curto, quanto durante o arco. Durante o curto a corrente irá aumentar na taxa definida por I_{rps} , até que ocorra a reabertura do arco. Após a reabertura, a fonte irá aplicar a corrente I_a , descendo de acordo com taxa I_{rpd} , até atingir o valor de corrente I_f . A corrente irá permanecer em I_f até ocorrer o curto circuito. Após o curto circuito a corrente poderá permanecer, ainda, em I_f durante o tempo de atraso t_a . Nesta modalidade o tempo de atraso t_a é relacionado com o assentamento da gota e I_a visa reduzir as perturbações no momento da reabertura, bem como, atuar sobre a energia fornecida ao arco (DIGIPLUS, 2015).

Figura 10 – Forma de onda Curto Circuito Controlado Soft.



Fonte: (DIGIPLUS, 2015)

3.3 Estabilidade

De acordo com Scotti (SCOTTI; PONOMAREV, 2008), estabilidade do arco é a capacidade de o arco manter-se ou restabelecer rapidamente suas características de fonte de calor sob a ação de distúrbios transitórios que possam ocorrer durante uma soldagem, tais como mudanças do comprimento do arco, pela oscilação da superfície da poça de fusão ou alterações energéticas como durante curtos circuitos.

Em soldagem por curto circuito, a estabilidade do arco pode ser avaliada visualmente pelo soldador a partir da luminosidade, ruído e quantidade de respingos provenientes do arco elétrico. No entanto existem outras formas de mensurar a estabilidade de um arco elétrico, podendo citar a análise dos sinais de aquisição tais como corrente e tensão.

Pensando nesse tema o Grupo LAPROSOLDA da Universidade Federal de Uberlândia criou um critério para quantificar a estabilidade da transferência por curto circuito no processo de soldagem MIG/MAG. Esse critério se baseia na premissa de que a estabilidade da transferência por curto circuito está ligada com a constância dos tempos em curto circuito e com arco aberto, sendo criado o Índice Vilarinho de Regularidade de Transferência por Curto Circuito, cujo símbolo é IV_{cc} (equação 3.1). Segundo esse critério, quanto menor for o valor de IV_{cc} mas estável tende a ser a soldagem. Esse critério foi utilizado para encontrar os parâmetros que promovam uma solda mais estável nas duas formas de curto circuito abordadas no presente trabalho.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{tcc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{tab}}{t_{ab}} \quad (3.1)$$

Onde σ_{cc} é o desvio padrão da média do tempo de curto circuito; σ_{ab} é o desvio padrão da média do tempo de arco aberto; t_{cc} é a média do tempo de curto circuito; t_{ab} é a média do tempo de arco aberto.

4 Transformações metalúrgicas pós soldagem

Durante um processo de soldagem é necessária a aplicação de calor na poça de fusão com intensidade suficiente de modo a garantir a execução de uma solda de boa qualidade. De acordo com Wainer (1992), "O calor é, portanto, elemento essencial à execução de uniões soldadas mas pode, por outro lado, representar fonte potencial de problemas devido à sua influência direta nas transformações metalúrgicas e nos fenômenos mecânicos que ocorrem na zona da solda"(WAINER, 1992). Como exemplo de problemas causados pela aplicação incorreta de calor podemos citar trincas, poros, falta de penetração, entre outros defeitos metalúrgicos.

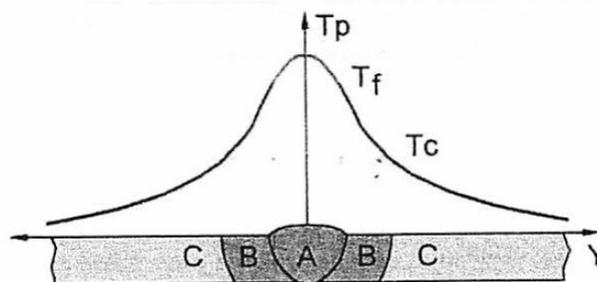
Em uma junta soldada temos três regiões bem definidas (figura 11), onde o eixo das ordenadas representa a temperatura de pico atingida em cada região:

A. Zona Fundida (ZF): Região que atingiu temperaturas superiores ao ponto de fusão do metal de base.

B. Zona Termicamente Afetada (ZAC): Região que não sofreu fusão mas passou por alguma transformação metalúrgica após a soldagem.

C. Metal de Base (MB). Região que não sofreu alteração metalúrgica após a soldagem.

Figura 11 – Macroestruturas de soldas por fusão (Gráfico esquemático).



Fonte: (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2005)

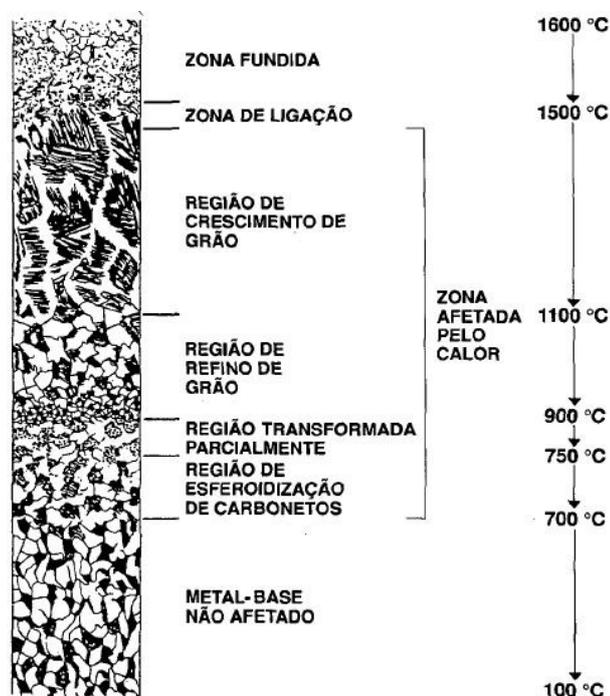
4.1 Zona Afetada pelo Calor

Segundo Modenesi (MODENESI, 2012), "pode-se considerar a ZAC dos aços transformáveis como sendo formada por diferentes regiões a medida que se afasta do cordão de solda". Sendo assim, nos aços carbono, a ZAC pode ser dividida em :

1. Região de crescimento de grão ou ZAC GG (Grãos Grossos): Corresponde às porções do metal base aquecidas acima de sua temperatura de crescimento de grão, tendo uma microestrutura caracterizada pelo seu elevado tamanho de grão austenítico e sua microestrutura final resultante da decomposição da austenita.
2. Região de refino de grão ou ZAC GF (Grãos Finos): Região onde a austenita obtida é recuperada antes de sua transformação, no resfriamento, produzindo ferrita e/ou perlita com pequeno tamanho de grão.
3. Região transformada parcialmente ou ZAC IC (Intercrítica): Região que sofreu uma transformação parcial, isto é, apenas parte de sua estrutura é transformada em austenita, que se decompõe em seguida durante o resfriamento.
4. Região de esferoidização de carbonetos ou ZAC SB (Sub Crítica): Região que apresenta pequenas alterações microestruturais visíveis ao microscópio ótico em aços na condição laminado a quente ou normalizado. Estas se resumem basicamente a uma pequena esferoidização da perlita (MODENESI, 2012).

Todas as regiões da ZAC comentadas anteriormente podem ser visualizadas na figura 12.

Figura 12 – Regiões da ZAC e respectivas temperaturas.

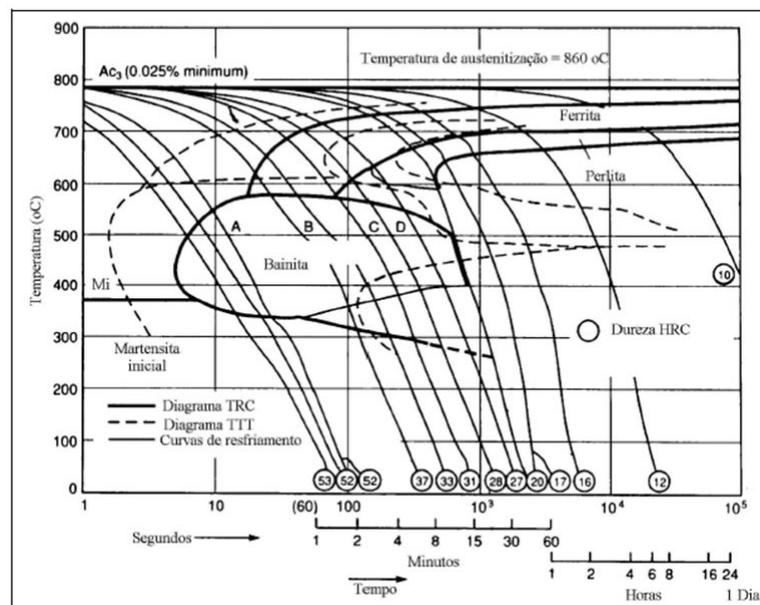


Fonte: (WAINER, 1992)

A microestrutura final de cada região da ZAC depende da temperatura máxima atingida na soldagem assim como sua taxa de resfriamento. Taxas de resfriamento baixas fazem como que a decomposição da austenita seja lenta, favorecendo as transformações

difusionais e formando microconstituintes como ferrita e perlita na matriz. Enquanto para taxas de resfriamento rápidas as transformações adifusionais são favorecidas, havendo a formação de fases ricas em carbono e com maior dureza, podendo citar os microconstituintes martensita e bainita. Para prever a microestrutura de um aço em função da taxa de resfriamento foi criado o Gráfico TTT (Tempo Temperatura Transformação) e o TRC (Transformação com Resfriamento Contínuo). Na figura 13 é possível ver os diagramas TTT e TRC do aço SAE 4140 utilizado no presente trabalho e a partir da sua análise pode-se conhecer as microestruturas de acordo a taxa de resfriamento após a austenitização.

Figura 13 – Diagramas TTT e TRC do aço SAE 4140.



Fonte: (HANDBOOK, 1990)

Parte II

Materiais e métodos

5 Materiais e equipamentos utilizados

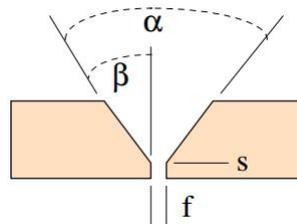
As soldagens aconteceram no Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS) localizado na Universidade Federal do Ceará (UFC) com o auxílio de uma fonte de soldagem IMC digiplus A7, um robô Kuka para a automação da solda e o programa para aquisição de dados SapV4. O arame-eletrodo utilizado foi o AWS ER 70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. Como metal de base, foi utilizada uma barra chata de aço de 12,6 mm de espessura e grau A36 nos ensaios exploratórios, e para a soldagem do passe de raiz, foi utilizada uma barra chanfrada de aço SAE 4140 com 17 mm de espessura, ângulo de chanfro (β) de 45 graus, nariz (s) de 1 mm e fresta (f) de 1,2 mm (Figura 14). Todas as composições químicas podem ser encontrada na tabela 1 .

Tabela 1 – Tabela de composição química

Material	%C	%Si	%Mn	%S	%P
AWS ER 70S-6	0.15	1.15	1.85	0.035	0.025
ASTM A-36	0.27	0.4	0.9	0.04	0.05
SAE 4140	0,44	0,23	0,83	0,003	0,013

Fonte: Autor

Figura 14 – Terminologia de um chanfro.



Fonte: (MODENESI, 2008)

Durante a preparação das amostras para análise metalográfica foram utilizadas lixas de granulometria 80, 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 e pastas de diamante de 6, 3 e 1 micrômetros e após um ataque químico com o reagente Nital (98% HNO₃ e 2% etanol) as micrografias foram registradas com um microscópio óptico Zeiss. Para o ensaio de microdureza Vickers, foi utilizada uma carga de 100 gramas e passe de 20 micrômetros entre as indentações.

6 Metodologia

Foram definidos alguns parâmetros como fixos (Tabela ??) e em seguida foram realizados ensaios exploratórios para definição dos parâmetros antes de serem iniciadas as soldagens de passe de raiz. As velocidades de soldagem (V_s) e de alimentação do arame (V_a) foram mantidas constante em todas as condições para assegurar que a quantidade de material depositada seja a mesma. Os ensaios exploratórios aconteceram na posição plana, para encontrar a condição mais estável nas duas técnicas, e na posição vertical descendente, para encontrar a melhor DBCP e ângulo de soldagem, que serão utilizados na soldagem de passe de raiz. Para soldagens na posição vertical foi confeccionado um suporte com três perfis onde as barras chatas foram prendidas com sargentos (figura 15).

Tabela 2 – Tabela de parâmetros fixos

V_s (m/min)	V_a (m/min)	Gás de proteção	Vazão (L/min)
0,25	3,5	Ar 25% CO	16

Fonte: Autor

Figura 15 – Bancada de soldagem.



Fonte: Autor

Para uma soldagem de passe de raiz satisfatória é necessária que a abertura do chanfro seja definida com cuidado, pois uma abertura de junta muito pequena pode fazer com que a solda não penetre em toda a fresta do chanfro enquanto para uma abertura muito larga, o arame pode passar pela fresta sem fundir.

6.1 Método Taguchi/Projeto Robusto

Durante a preparação de um modelo de experimentos em ensaios exploratórios, pode ser realizado o método Fatorial Completo, no qual todas as combinações de variáveis (fatores) são testadas, obtendo um resultado mais refinado, no entanto, a quantidade de ensaios sugerida pelo método pode ser excessiva, aumentando os tempos e custos do projeto. Como alternativa, pode-se utilizar a técnica denominada Projeto Robusto, que foi desenvolvida por Taguchi e visa determinar as variáveis que mais influenciam a variabilidade do processo, sendo utilizada no presente trabalho para reduzir o número de soldagens exploratórias, sem prejudicar significativamente a qualidade das informações retiradas. O controle destes fatores simplifica garante a qualidade do processo/produto (menor variabilidade), além da otimização do seu desempenho (ROSS, 1991).

No Projeto Robusto, os níveis dos fatores controláveis (parâmetros do projeto) são selecionados e organizados na forma de uma matriz ortogonal, para que a partir de uma análise de variância, o software utilizado possa encontrar qual a melhor combinação que resulte na otimização da resposta desejada. Essa resposta pode ser do tipo:

1. Quanto maior melhor
2. Quanto menor melhor
3. Nominal melhor

A matriz ortogonal é escolhida de acordo com a quantidade de fatores e de seus níveis. No presente trabalho, na soldagem exploratória na posição plana com o CCC Soft foi utilizado 4 fatores e 3 níveis, resultando na matriz ortogonal L9. Reduzindo o que seria 81 (3^4) ensaios no modelo Fatorial Completo para apenas 9 utilizando o Método Taguchi.

Tabela 3 – Matriz ortogonal L9 (3^4) com as combinações entre os níveis dos fatores

Nº experimento	Variável 1	Variável 2	Variável 3	Variável 4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Fonte: Autor, montada no software MINITAB

6.2 Ensaios exploratórios na posição plana

Para encontrar a condição mais estável no curto circuito convencional foram realizadas quatro soldagens, com 17 V, 18 V, 19 V e 20 V e foi utilizado o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto Circuito, cujo símbolo é IV_{cc} . Segundo esse critério, quanto menor for o seu valor, mais estável tende a ser a transferência metálica. Os valores de indutância (taxa de variação da corrente) de subida (V_s) e descida (V_d) foram mantidos constantes em 100 A/ms e 60 A/ms (valores usados por profissionais do LPTS) respectivamente. Alteração nesses valores influenciam nos tempos de arco aberto e de curto circuito e um valor inadequado pode causar instabilidade na transferência metálica.

O CCC Soft possui seis parâmetros de ajuste da corrente (figura 10) e para reduzir o número de soldagens exploratórias, as taxas de variação da corrente na subida ($Irps$) e na descida ($Irpd$) foram mantidas constantes em 100 A/ms e 40 A/ms (valores obtidos de trabalhos semelhantes em andamento no LPTS) respectivamente, sobrando 4 parâmetros para serem trabalhados. Para obtenção da melhor condição de soldagem foi utilizado o modelo de experimentos Taguchi na categoria “quanto menor melhor”, onde o software STATISTICA realizou uma análise de variância para definir qual a combinação de fatores que resultam no menor valor da variável resposta, que nesse caso foi o valor do IV_{cc} . Para isso foi montada uma matriz de experimentos com 4 fatores e 3 níveis chamada de matriz ortogonal $L9(4^3)$, resultando em nove ensaios. Na tabela 4 podemos ver os níveis de cada fator e na tabela 5 podemos ver a combinação de níveis em cada ensaio.

Tabela 4 – Fatores e níveis dos parâmetros

Fatores	Níveis		
	1	2	3
If (A)	80	100	120
Ia (A)	190	220	250
Ta (ms)	1	1,5	2
Td (ms)	1	1,5	2

Fonte: Autor

Tabela 5 – Matriz de experimentos apontada pelo método Taguchi

Experimento	Níveis				Resposta
	If	Ia	Ta	Td	
1	1	1	1	1	$IVcc_1$
2	1	2	2	2	$IVcc_2$
3	1	3	3	3	$IVcc_3$
4	2	1	2	3	$IVcc_4$
5	2	2	3	1	$IVcc_5$
6	2	3	1	2	$IVcc_6$
7	3	1	3	2	$IVcc_7$
8	3	2	1	3	$IVcc_8$
9	3	3	2	1	$IVcc_9$

Fonte: Autor

Após as soldagens, foi realizada a aquisição dos sinais através do software SAP V4 e com ele foi possível obter os valores utilizados na Equação 3.1 para calcular o valor do $IVcc$ e deste modo atualizar a tabela 5 que será utilizada para a análise de variância. As melhores condições de soldagem nas duas técnicas de curto circuito serão apresentadas na discussão dos resultados.

6.3 Ensaios exploratórios na posição vertical

Com os parâmetros de corrente e tensão das melhores condições encontradas na posição plana, foi montado um modelo de experimentos do tipo fatorial completo (tabela 6) na posição vertical descendente, onde todas as combinações entre DBCP, ângulo de soldagem e técnica de curto circuito são testadas, resultando em 18 ensaios. O objetivo dessa etapa é avaliar a influência dessas variáveis nos sinais de corrente e tensão, na geometria do cordão de solda (largura, penetração e reforço) e no índice de estabilidade $IVcc$.

Após o posicionamento das barras chatas na posição vertical descendente, as soldagens ocorreram em três etapas. Na primeira, o ângulo da tocha foi definido em 0° , na segunda etapa em $+15^\circ$ e na terceira etapa em -15° . Em cada etapa foram realizadas seis soldagens com todas as combinações de técnica e DBCP apresentadas na tabela 6 com a metodologia fatorial completo.

Tabela 6 – Ordem das soldagens na posição vertical

Nº	Técnica	DBCP (mm)	Ângulo (°)
1	c.c Convencional	20	0
2	c.c Convencional	17	0
3	c.c Convencional	14	0
4	CCC Soft	20	0
5	CCC Soft	17	0
6	CCC Soft	14	0
7	c.c Convencional	20	+15
8	c.c Convencional	17	+15
9	c.c Convencional	14	+15
10	CCC Soft	20	+15
11	CCC Soft	17	+15
12	CCC Soft	14	+15
13	c.c Convencional	20	-15
14	c.c Convencional	17	-15
15	c.c Convencional	14	-15
16	CCC Soft	20	-15
17	CCC Soft	17	-15
18	CCC Soft	14	-15

Fonte: Autor

Após as 18 soldagens foi montada uma tabela para avaliar a influência dos fatores sobre as variáveis respostas que será apresentada na discussão dos resultados.

6.4 Soldagem de passe de raiz

Com os melhores parâmetros definidos nos ensaios exploratórios na posição vertical descendente, foram realizadas 4 soldagens de passe de raiz também na posição vertical descendente. Nesta etapa foi avaliada a influência da geometria (X e V), do estado do metal de base (como recebido e normalizado) e do preaquecimento nas propriedades metalúrgicas da junta, sendo também foi avaliado a estabilidade das transferências através do valor do IVcc e da frequência de curto circuito (Tabela 7). As chapas de aço SAE 4140 foram ponteadas pelo processo Eletrodo Revestido nas extremidades para assegurar a abertura de 1,2 mm em toda a sua extensão. Nas soldagens sem preaquecimento foram utilizadas chapas na condição como recebida e nas soldagens com preaquecimento foi utilizado um tratamento de normalização antes da soldagem.

O tratamento térmico de preaquecimento é utilizado para reduzir as taxas de resfriamento durante a soldagem, possibilitando a formação de uma estrutura mais macia na ZAC e propiciando um maior tempo para que o hidrogênio escape da peça antes que se

atinja as temperaturas de fragilização. A temperatura de preaquecimento é calculada de acordo com a espessura da peça a ser soldada e o carbono equivalente do metal de base, sendo neste trabalho utilizada a temperatura de 260 °C, retirada da tabela disponibilizada pela AWS (([HINTON; WISWESSER, 2008](#))).

Tabela 7 – Soldagens de passe de raiz

Nº	Técnica	Peça normalizada	Pré aquecimento de 250 °C	Chanfro
1	c.c Convencional	Não	Não	X
2	CCC Soft	Não	Não	X
3	c.c Convencional	Sim	Sim	V
4	CCC Soft	Sim	Sim	V

Fonte: Autor

Para encontrar a melhor abertura foram realizados testes em uma chapa de espessura similar a largura do nariz do chanfro e foram testadas as aberturas de fresta de 1.2 mm, 2.0 mm e 3.0 mm, sendo escolhida a abertura de 1,2 mm como a que correspondeu a melhor penetração.

Parte III

Resultados e discussão

7 Ensaios exploratórios

7.1 Resultados dos ensaios exploratórios na posição plana

Os resultados das soldagens na posição plana se encontram na Tabela 8, na qual é possível ver que a tensão de referência de 19 V proporcionou o menor índice IVcc, e conseqüentemente maior estabilidade, de acordo com o critério utilizado.

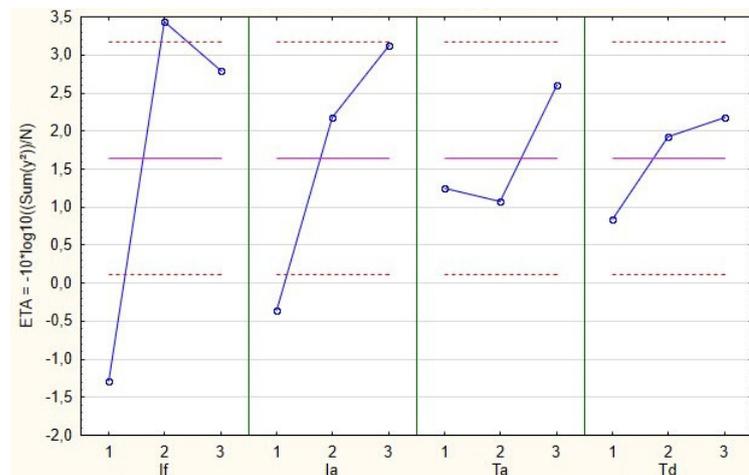
Tabela 8 – Soldagens de c.c Convencional na posição plana

Nº	DBCP (mm)	Vref (V)	Vm (V)	Im (A)	Energia (kJ/mm)	IVcc
1	20	17	17,2	107,5	0,55	1,79
2	20	18	18,2	126,3	0,69	0,7
3	20	19	19,1	126,7	0,73	0,5
4	20	20	20,1	125,2	0,75	0,67

Fonte: Autor

Após as nove soldagens com a técnica CCC Soft, os valores de IVcc foram calculados a partir dos sinais de aquisição e foi realizada a análise de variância no software STATISTICA. Os resultados se encontram no gráfico da Figura 16 e na Tabela 9. Segundo o gráfico, quanto mais acima está o ponto, mais influente é aquele nível na redução do Ivcc. Segundo esse critério o nível 2 de If (100 A), 3 de Ia (250 A), 3 de Ta (2 ms) e 3 de Td (2 ms) é a combinação que proporciona o menor IVcc.

Figura 16 – Influência dos fatores de controle no IVcc utilizando o software STATISTICA.



Fonte: Autor

Tabela 9 – Valores de significância (Valor-P) dos fatores na redução do IVcc

Fator	Valor-P
If	0,0003
Ia	0,0037
Ta	0,1457
Td	0,2290

Fonte: Autor

Neste trabalho considerou-se que um determinado parâmetro afetou estatisticamente uma resposta quando o valor resultante para o valor P (nível de significância) for igual ou inferior a 0,05, ou seja, adotou-se um intervalo de confiança de 95%. Analisando a tabela 9 é possível ver que apenas a corrente de manutenção do arco (If) e a corrente de pico (Ia) são estatisticamente significativos na redução do valor do IVcc e que correntes mais altas de base e de pico promovem a redução do IVcc.

7.2 Resultados dos ensaios exploratórios na posição vertical

O resultado da macrografia, sinais de corrente e tensão médias, energia e índice de estabilidade podem ser encontradas na tabela 10. O número de soldagens está duplicado porque foram realizadas duas amostragens para cada cordão de solda para que seja realizada a análise de variância.

Tabela 10 – Resultados da aquisição de sinais e da macrografia

Nº	Técnica	DBCP (mm)	Ângulo (°)	Im (A)	Vm (V)	Energia (kJ/mm)	Larg. (mm)	Penet. (mm)	Ref. (mm)	IVcc
1	Conv	20	0	125,0	19,3	0,58	8,77	0,25	2,37	0,57
1	Conv	20	0	126,4	19,4	0,59	8,18	0,15	2,45	0,56
2	Conv	17	0	130,7	19,5	0,61	9,50	0,33	2,31	0,67
2	Conv	17	0	131,7	19,4	0,61	9,38	0,29	2,40	0,58
3	Conv	14	0	138,0	19,4	0,64	10,44	0,16	2,12	0,78
3	Conv	14	0	137,6	19,4	0,64	10,24	0,47	1,86	0,78
4	CCC	20	0	125,9	22,6	0,68	9,17	0,28	2,14	0,63
4	CCC	20	0	125,0	22,2	0,67	9,38	0,10	2,09	0,56
5	CCC	17	0	127,0	22,5	0,69	9,37	0,25	2,14	0,52
5	CCC	17	0	127,0	22,5	0,69	9,09	0,34	2,14	0,53
6	CCC	14	0	133,9	21,5	0,69	9,05	0,28	2,14	0,65
6	CCC	14	0	133,7	21,5	0,69	8,95	0,41	2,16	0,57
7	Conv	20	+15	123,1	19,2	0,57	8,42	0,33	2,53	0,57
7	Conv	20	+15	123,3	19,2	0,57	8,19	0,22	0,42	0,60
8	Conv	17	+15	129,9	19,3	0,60	9,22	0,27	2,39	0,61
8	Conv	17	+15	128,7	19,4	0,60	8,65	0,45	2,46	0,62
9	Conv	14	+15	134,6	19,4	0,63	9,85	0,38	2,14	0,74
9	Conv	14	+15	132,1	19,5	0,62	9,66	0,43	2,18	0,81
10	CCC	20	+15	124,8	22,7	0,68	9,35	0,10	2,15	0,57
10	CCC	20	+15	125,1	22,8	0,68	9,36	0,10	2,17	0,56
11	CCC	17	+15	127,8	22,5	0,69	9,11	0,28	2,15	0,66
11	CCC	17	+15	128,0	21,8	0,67	8,96	0,24	2,13	0,56
12	CCC	14	+15	133,5	21,7	0,70	9,29	0,28	2,15	0,73
12	CCC	14	+15	132,8	21,6	0,69	9,05	0,34	2,10	0,62
13	Conv	20	-15	127,3	19,2	0,59	9,19	0,10	2,32	1,32
13	Conv	20	-15	120,0	19,0	0,55	9,28	0,10	2,75	1,79
14	Conv	17	-15	131,7	19,2	0,61	10,90	0,10	2,12	1,26
14	Conv	17	-15	132,3	19,3	0,61	11,40	0,22	2,29	0,69
15	Conv	14	-15	135,2	19,2	0,62	9,79	0,30	1,37	1,08
15	Conv	14	-15	137,8	19,3	0,64	9,85	0,80	1,61	0,72
16	CCC	20	-15	126,6	21,6	0,66	8,99	0,40	2,22	0,54
16	CCC	20	-15	125,3	22,3	0,67	9,02	0,42	2,14	0,64
17	CCC	17	-15	131,0	21,6	0,68	8,83	0,38	2,28	0,60
17	CCC	17	-15	131,5	21,5	0,68	8,95	0,42	2,24	0,50
18	CCC	14	-15	137,1	21,3	0,70	8,79	0,42	2,40	0,60
18	CCC	14	-15	136,4	21,0	0,69	8,89	0,44	2,16	0,58

Fonte: Autor

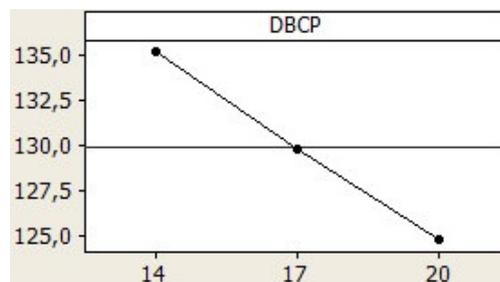
Com os resultados da tabela foi montado um modelo estatístico de análise de variância (ANOVA) no software STATISTICA cujos valores podem ser visualizado na tabela 11. Segundo essa tabela, se o fator P for menor ou igual a 0,05, significa que o fator (Técnica, DBCP e ângulo) afetou estatisticamente a resposta (Im, Vm, Energia, Largura, Penetração, reforço e IVCC).

Tabela 11 – Significância (Valor P) entre os fatores e as respostas

Fatores	Respostas						
	Im	Vm	Energia	Largura	Penetração	Reforço	IVcc
Técnica	0,653	0,001	0,012	0,066	0,903	0,663	0,006
DBCP	0,000	0,780	0,025	0,079	0,005	0,365	0,631
Ângulo	0,473	0,746	0,902	0,006	0,498	0,775	0,040

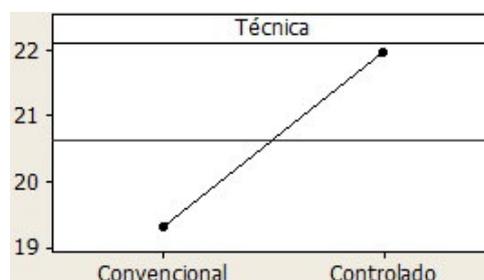
Foi montado no software MINITAB os gráficos de médias das relações que tiveram valor de significância abaixo de 0,005 e que podem ser encontrados nos gráficos da figura 18 à 22.

Figura 17 – Influência da DBCP (mm) na corrente média (A)



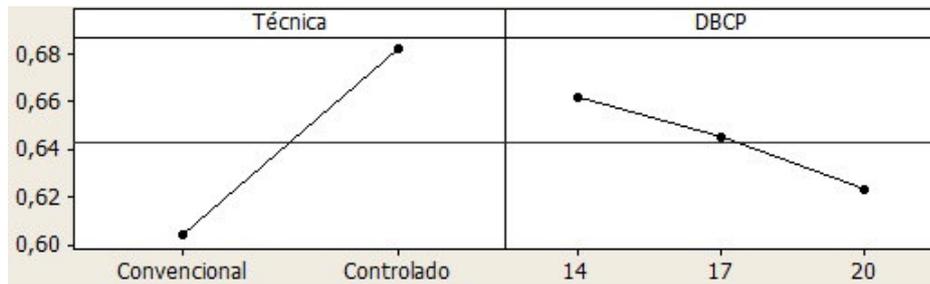
Fonte: Autor

Figura 18 – Influência da técnica de curto circuito na tensão média (V)



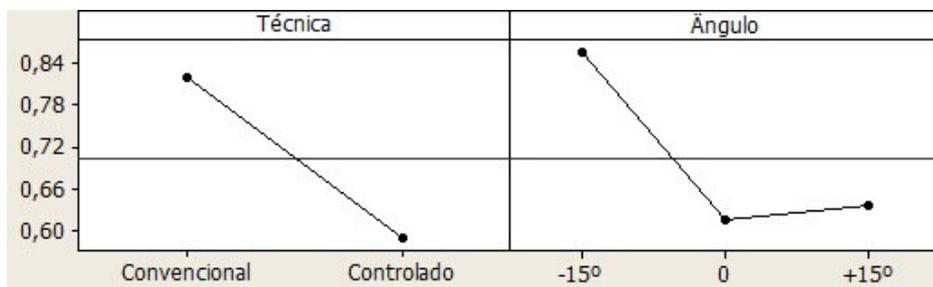
Fonte: Autor

Figura 19 – Influência dos fatores na energia de soldagem (kJ/mm)



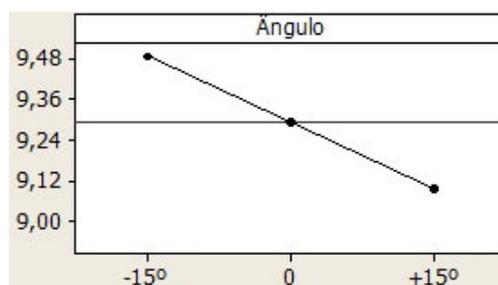
Fonte: Autor

Figura 20 – Influência dos fatores no índice de estabilidade (IVcc)



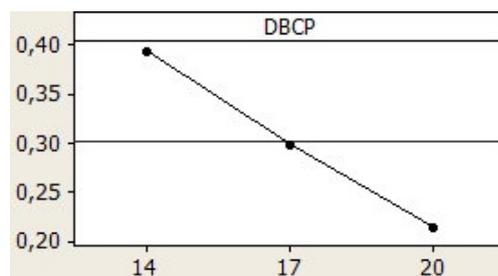
Fonte: Autor

Figura 21 – Influência do ângulo de soldagem na largura do cordão de solda (mm)



Fonte: Autor

Figura 22 – Influência da DBCP na penetração do cordão de solda (mm)



Fonte: Autor

Após a análise da Tabela 11 de análise de variância e dos gráficos de média é possível afirmar que a DBCP foi estatisticamente influente na corrente média, energia de soldagem e penetração do cordão de solda, enquanto a técnica de curto circuito foi estatisticamente influente na tensão média, energia de soldagem e no IVcc e o ângulo de soldagem foi estatisticamente influente no IVcc e no ângulo de soldagem.

A DBCP de 17 mm foi escolhida como melhor condição porque a DBCP de 20 mm apresentou poros durante a soldagem com o CCC Soft (Anexo D) e a condição de 14 mm visualmente apresentou mais respingos. Na escolha do ângulo de soldagem, o ângulo de 15 graus positivo (puxando) foi escolhido porque obteve menor valor médio de IVcc do que o ângulo de -15° (Figura 20) e melhor uniformidade do cordão de solda do que a posição 0° (Anexo A e B). Os valores dos parâmetros definitivos que serão utilizados nas soldagens de passe de raiz se encontram nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Parâmetros definitivos do Curto circuito convencional

DBCP	V ref (V)	Ks (A/ms)	Kd (A/ms)	Ângulo (°)
17	19	100	60	+15

Fonte: Autor

Tabela 13 – Parâmetros definitivos do Curto Circuito Controlado Soft

DBCP (mm)	If (A)	Ia (A)	Ta (ms)	Td (ms)	Irps (A/ms)	Irp (A/ms)	Ângulo (°)
17	100	250	2	2	100	40	+15°

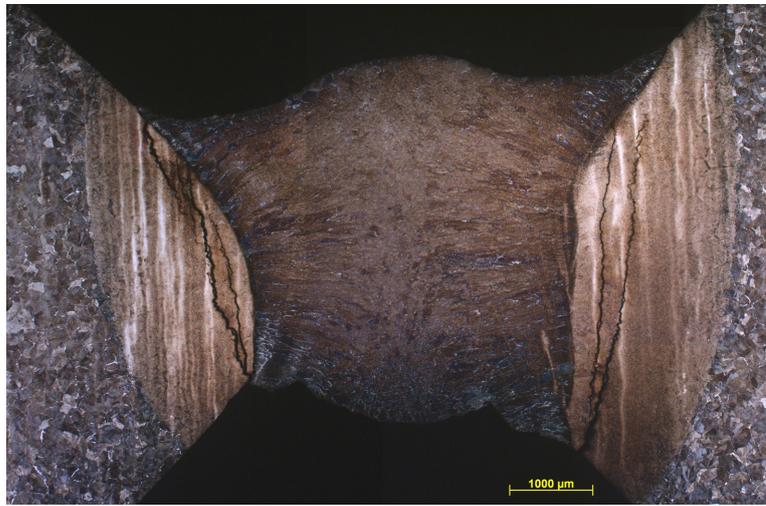
Fonte: Autor

8 Soldagem de passe de raiz

8.1 Passe de raiz sem preaquecimento

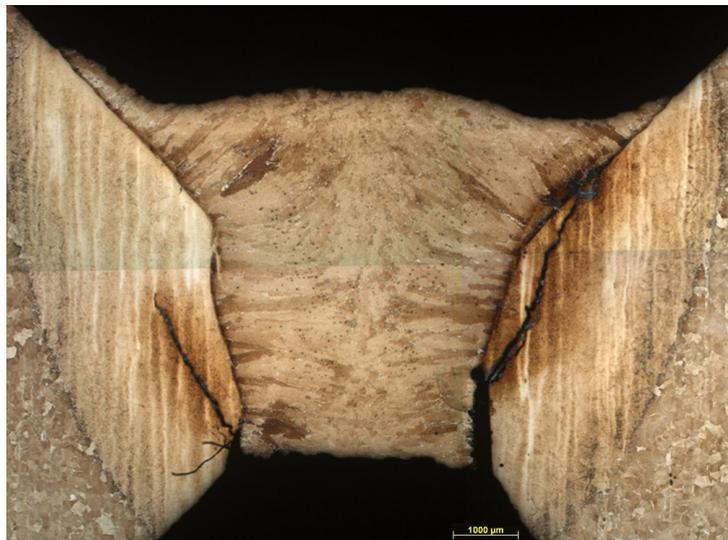
Após as soldagens, a junta foi cortada para análise metalográfica e as imagens dos passes de raiz nas duas condições de curto circuito podem ser visualizados nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Passe de raiz com c.c Convencional sem preaquecimento com trincas.



Aumento de 25x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

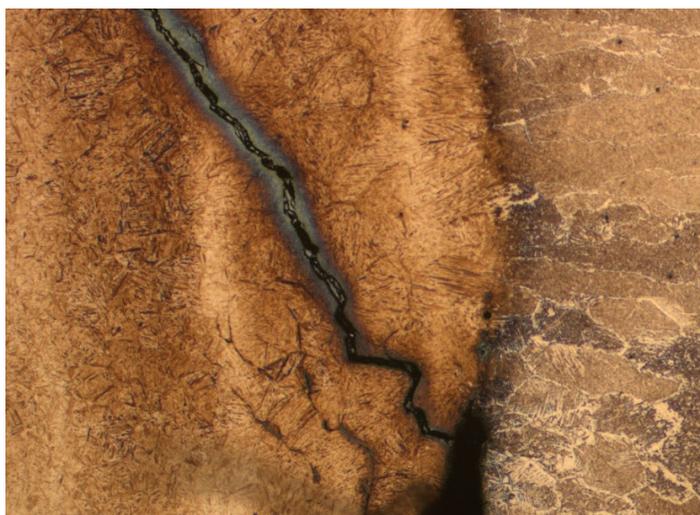
Figura 24 – Passe de raiz com CCC Soft sem preaquecimento com trincas.



Aumento de 25x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

É possível observar o aparecimento de trincas nas duas formas de curto circuito, provavelmente causadas pela crescimento e fragilização dos grãos da ZAC GG e concentração de tensões decorrente da geometria em "X" da junta. Na imagem 25 é possível ver a presença de martensita na região da ZAC que contorna a trinca, indicando que esse foi um dos motivos da presença do defeito.

Figura 25 – Trinca na região da ZAC.



Aumento de 50x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

8.1.1 Metal de base

No metal de base foi observado grãos poligonais de ferrita e perlita fina. Como pode ser visto na Figura 26,

Figura 26 – Metal de base, peça como recebida.

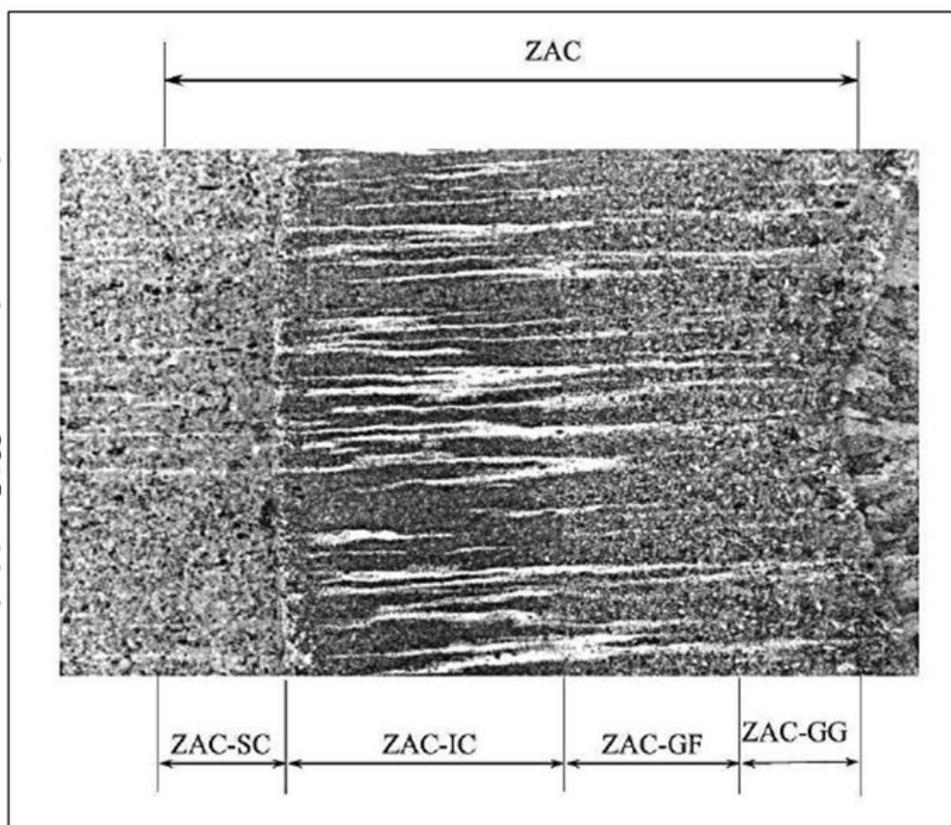


Aumento de 200x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

8.1.2 Zona Afetada pelo Calor

A ZAC encontrada no presente trabalho é bastante similar a encontrada por Aguiar (AGUIAR, 2001), onde o autor encontrou as faixas claras no sentido da laminação e faixas escuras dentro da zona intercrítica (imagem 27).

Figura 27 – Microestrutura de um aço SAE 4140 soldado com uma energia de 1,5 Kj/mm.



Aumento de 15x. Fonte: (AGUIAR, 2001)

8.2 Passe de raiz com preaquecimento

Nesta etapa do trabalho, ocorreu alteração para o chanfro em formato "V" e um preaquecimento de 260°C. Após soldagem, as peças foram cortadas para realização de análise metalográfica, cujas imagens se encontram nas Figuras 28 e 29), onde é possível observar que nessas condições não houveram trincas. Provavelmente por conta do preaquecimento, que reduziu a taxa de resfriamento e da alteração da geometria da junta que reduziu os pontos concentradores de tensão.

Figura 28 – Passe de raiz com c.c Convencional com preaquecimento.



Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

Figura 29 – Passe de raiz com CCC Soft com preaquecimento.



Aumento de 25x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

8.2.1 Metal de base

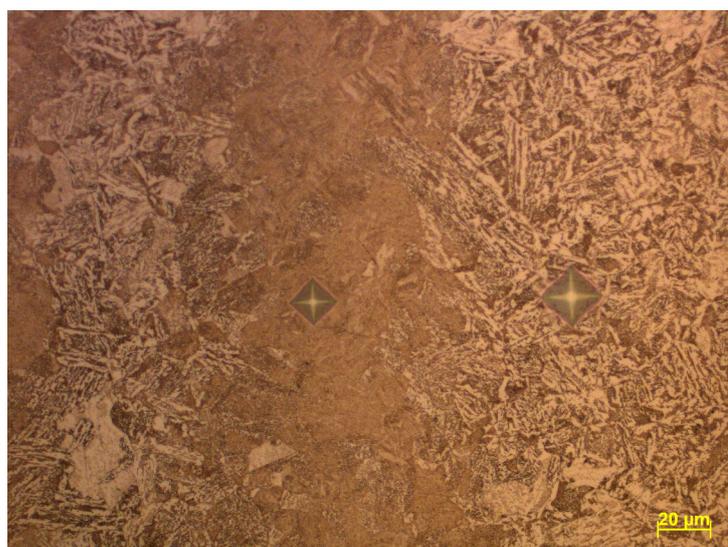
No metal de base da peça normalizada, é possível observar um microconstituente, que de acordo com o gráfico TRC da Figura 13, provavelmente seja bainita. Também é possível observar a aparição de listras brancas no sentido da laminação (Figura 30). Essas faixas claras são provenientes da falta de homogeneização da composição química do aço e após a soldagem podem apresentar-se constituídas de martensita de alta dureza. Foi realizada uma indentação de microdureza Vickers dentro da região clara e foi comprovada sua dureza mais elevada (Figura 31).

Figura 30 – Metal de base, peça normalizada com faixas claras.



Aumento de 50x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

Figura 31 – Microdurezas no metal de base .

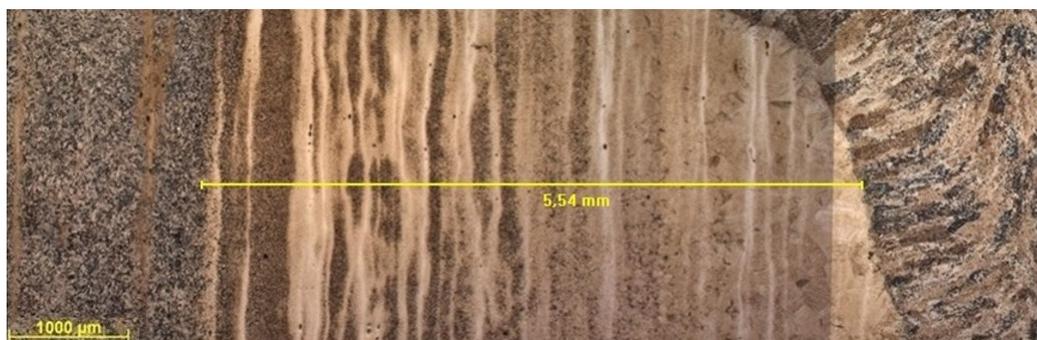


Microdureza de 514 HV dentro da faixa clara e 317 fora dela. Aumento de 500x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

8.2.2 Zona Afetada pelo Calor

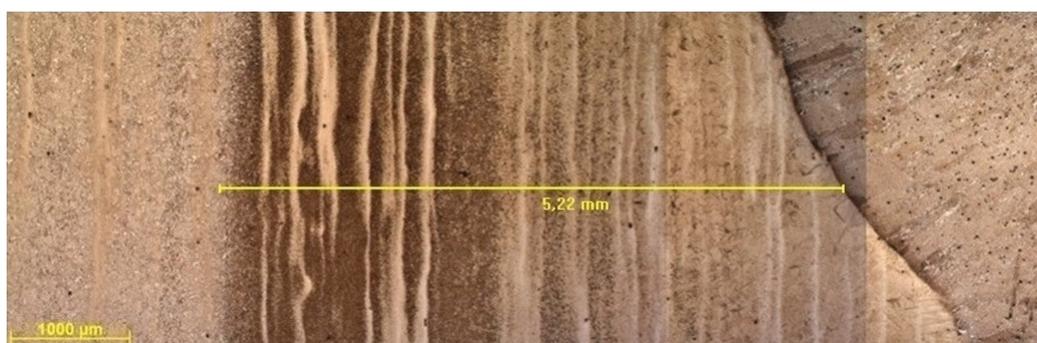
O comprimento das duas Zonas Afetadas pelo Calor foram medidos no software IMAGE PRO com referência na escala e possuem um valor bem próximo, 5,54 mm x 5,22 mm (figura 32 e 33).

Figura 32 – Microestrutura da ZAC no passe de raiz com preaquecimento utilizando c.c Convencional.



Aumento de 25x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

Figura 33 – Microestrutura da ZAC no passe de raiz com preaquecimento. utilizando CCC Soft.

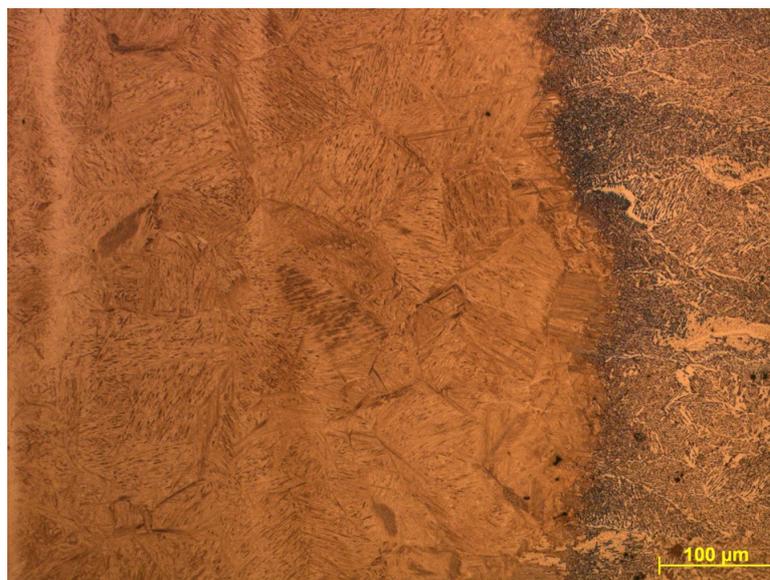


Aumento de 25x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

Na ZAC das duas técnicas de curto circuito na soldagem com preaquecimento é possível observar três regiões bem definidas:

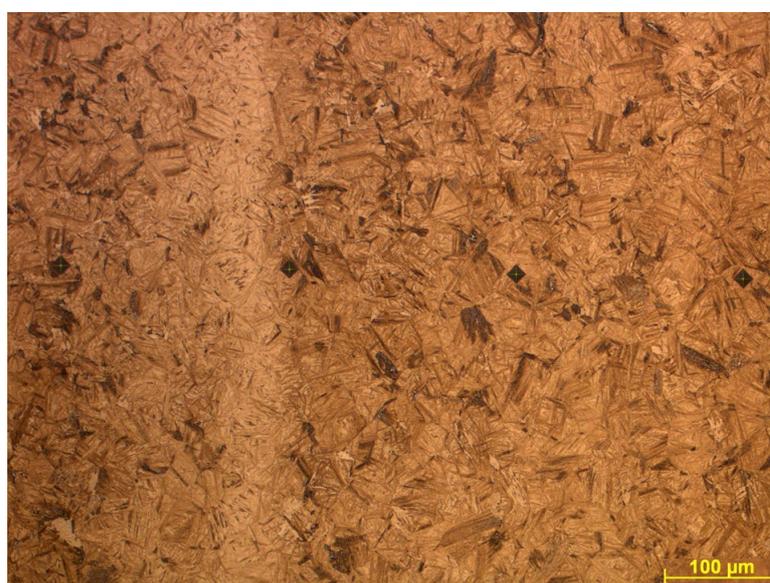
1. ZAC GG predominantemente formada por martensita (Figura 34).
2. ZAC GF com presença de bainita na forma de agulhas (Figura 35).
3. ZAC GF com faixas claras de alta dureza (martensita) em faixas escuras (bainita e perlita) bem definidas. A figura 38 mostra a diferença de dureza entre a indentação na faixa clara e na escura.

Figura 34 – ZAC de Grãos Grossos.



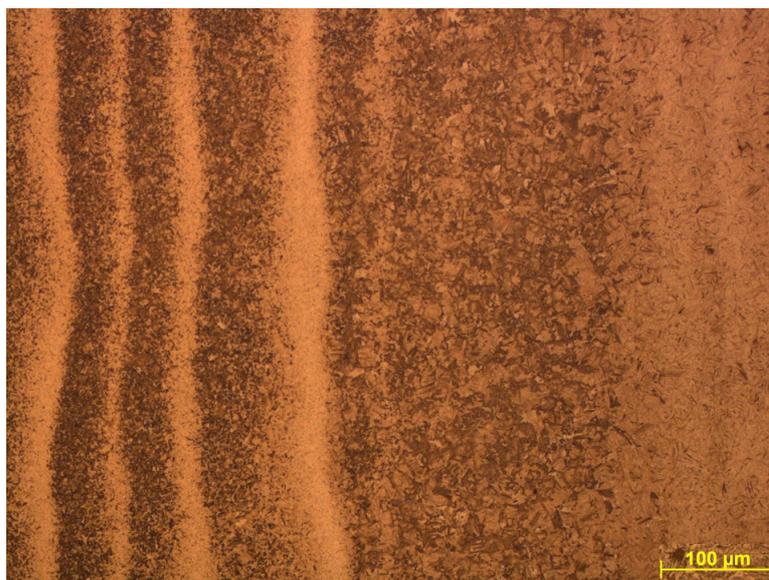
Aumento de 200x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

Figura 35 – ZAC de Grãos Finos.



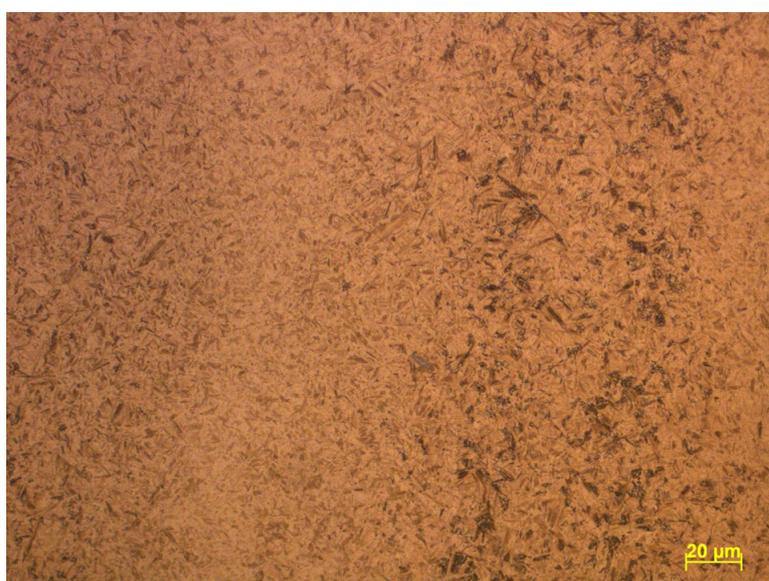
Aumento de 200x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

Figura 36 – ZAC GF com faixas claras.



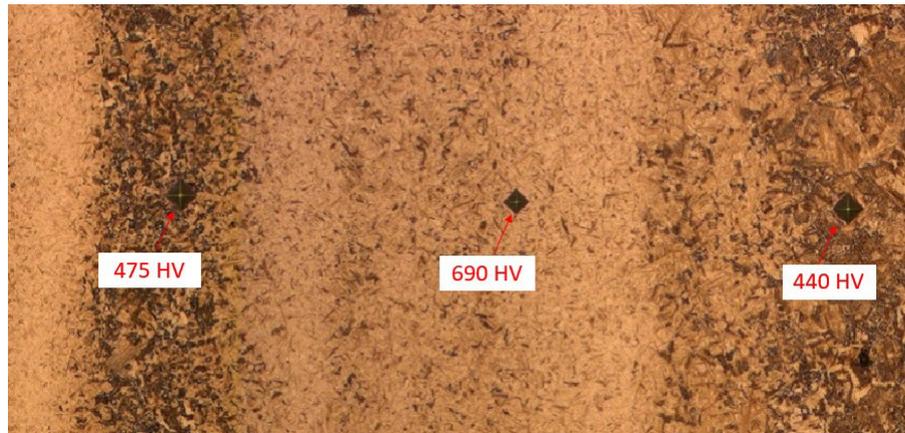
Aumento de 200x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

Figura 37 – ZAC GF com faixas claras.



Aumento de 500x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

Figura 38 – Indentações de microdureza nas faixas claras da ZAC



Microdureza de 475 HV nas faixas escuras e 690 HV nas faixas claras. Aumento de 200x. Ataque: Nital a 2%. Fonte: Autor

8.3 Sinais de corrente e tensão

Os sinais de aquisição nas soldagem de passe raiz com preaquecimento foram utilizados para montar a tabela 14 onde é possível ver que os sinais de I_m , V_m e Energia foram bem próximos. Pode ser observado um menor valor de I_{Vcc} no CCC Soft, resultado em uma transferência metálica mais estável segundo esse critério. Também pode ser observado que o curto circuito controlado apresentou menor desvio padrão na frequência de curto circuitos.

Tabela 14 – Soldagem de passe de raiz com preaquecimento

	V_m (V)	I_m (A)	Energia (Kj/mm)	I_{Vcc}	Frequência de curto circuito	Desvio padrão da frequência de c.c
c.c Convencional	19,6	142,8	0,67	0,51	69	3,15
CCC Soft	20,7	139,9	0,70	0,38	58	1,4

Conclusões

Com base nos resultados é possível concluir que:

1. A análise de variância nos ensaios exploratórios apontaram que o Curto Circuito Controlado Soft e o ângulo de soldagem positivo (puxando) foram os principais responsáveis pela diminuição do valor de IV_{cc} , resultando em uma soldagem mais estável. A análise de variância também encontrou que quanto menor o ângulo de soldagem maior será a largura do cordão de solda, confirmando a literatura.
2. Ambas as soldagens de passe de raiz com e sem preaquecimento apresentaram a fase martensita na ZAC GG. Foi comprovado que a ausência de preaquecimento e o uso de um chanfro incorreto podem provocar a aparição de trincas no aço SAE 4140.
3. As faixas claras que apareceram no metal de base da peça normalizada e na ZAC das soldagens de passe de raiz com e sem preaquecimento possuem dureza mais alta que a vizinhança, supostamente provocadas pela falta de homogeneização química do aço que causou essas regiões com maior temperabilidade e que só ficaram visíveis após o aquecimento do metal de base.
4. No geral, o Curto Circuito Controlado Soft Se mostrou superior ao curto circuito Convencional, com arco mais estável, menor desvio padrão na frequência dos curtos circuitos e não sofrendo alterações significativas na geometria do cordão mesmo com a variação da DBCP e ângulo de soldagem, o que não ocorreu com o curto circuito Convencional, onde a geometria do cordão era fortemente relacionada com a DBCP.

Referências

- AGUIAR, W. M. *Soldagem do aço ABNT 4140 sem tratamento térmico posterior*. 504 p. Dissertação (Mestrado), 2001. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Citado na página 49.
- DIGIPLUS. Manual de instruções, modelo a7, fabricante IMC. 8ªed. 2015. Disponível em: <http://www.imc-soldagem.com.br/media/com_eshop/attachments/manual_Digiplus20AC_8aEd.pdf>. Acesso em: 29/10/2017. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- ESAB. Apostila de soldagem mig/mag. 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf>. Acesso em: 15/10/2017. Citado 3 vezes nas páginas 22, 24 e 25.
- FILHO, H. D. *MIG/MAG CCC: avanços na tecnologia de controle da transferência metálica como solução para o passe de raiz*. 108 p. Dissertação (Mestrado), Florianópolis, 2014. Universidade Federal de Santa Catarina. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- FOGLIATTO, A. A. B. *Influência dos parâmetros do processo MIG/MAG com curto circuito controlado sobre a geometria do cordão de solda*. 146 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 16, 20, 21, 22 e 27.
- HANDBOOK. Metals handbook. embrittlement of steel. 10ed. ohio: American society for metals, v.1. 1990. Citado na página 31.
- HANDBOOK. Welding handbook. vol. 2, welding processes. *American Welding Society*, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 25.
- HINTON, R.; WISWESSER, R. Estimating welding preheat requirements for unknown grades of carbon and low-alloy steels. *Welding Journal*, v. 87, n. 11, p. 273–278, 2008. Citado na página 39.
- MACHADO, I. G. *Soldagem e técnicas conexas: Processos*. 1. ed. Porto Alegre: Edgar Blucher Ltda, 1996. 477 p. Citado 4 vezes nas páginas 21, 22, 23 e 26.
- MODENESI, P. J. *Terminologia Usual de Soldagem e Símbolos de Soldagem*. [S.l.], 2008. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/terminologia.pdf>>. Acesso em: 15/11/2017. Citado na página 33.
- MODENESI, P. J. *Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais*. [S.l.], 2011. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fundamentosfisicos1.pdf>>. Acesso em: 25/10/2017. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- MODENESI, P. J. *Soldabilidade dos Aços Transformáveis*. [S.l.], 2012. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metferritic1.pdf>>. Acesso em: 18/11/2017. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. 1. ed. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 19, 23 e 29.
- ROSS, P. J. *Aplicação das técnicas Taguchi na engenharia da qualidade*. [S.l.], 1991. 333 p. Citado na página 35.
- SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. [S.l.]: Artliber, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 19, 20, 22, 27 e 28.
- SILVA, R. H. G. e. *Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 22.
- SOUZA, D.; RESENDE, A.; SCOTTI, A. Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo mig/mag. *Soldagem e Inspeção (Impresso)*, SciELO Brasil, v. 14, p. 192–198, 2009. Citado na página 20.
- WAINER, S. D. B. E. *Soldagem: Processos e Metalurgia*. 1. ed. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 1992. 504 p. Citado 6 vezes nas páginas 19, 20, 21, 26, 29 e 30.

Anexos

ANEXO A – Curto Circuito Convencional:
ângulo de 0° (posição vertical)



Da direita para esquerda: amostra 1,2 e 3. Fonte: Autor

ANEXO B – Curto Circuito Controlado: ângulo de 0° (posição vertical)



Da direita para esquerda: amostra 4,5 e 6. Fonte: Autor

ANEXO C – Curto Circuito Convencional:
ângulo de $+15^{\circ}$ (posição vertical)
cal)



Da direita para esquerda: amostra 7,8 e 9. Fonte: Autor

ANEXO D – Curto Circuito Controlado: ângulo de $+15^\circ$ (posição vertical)



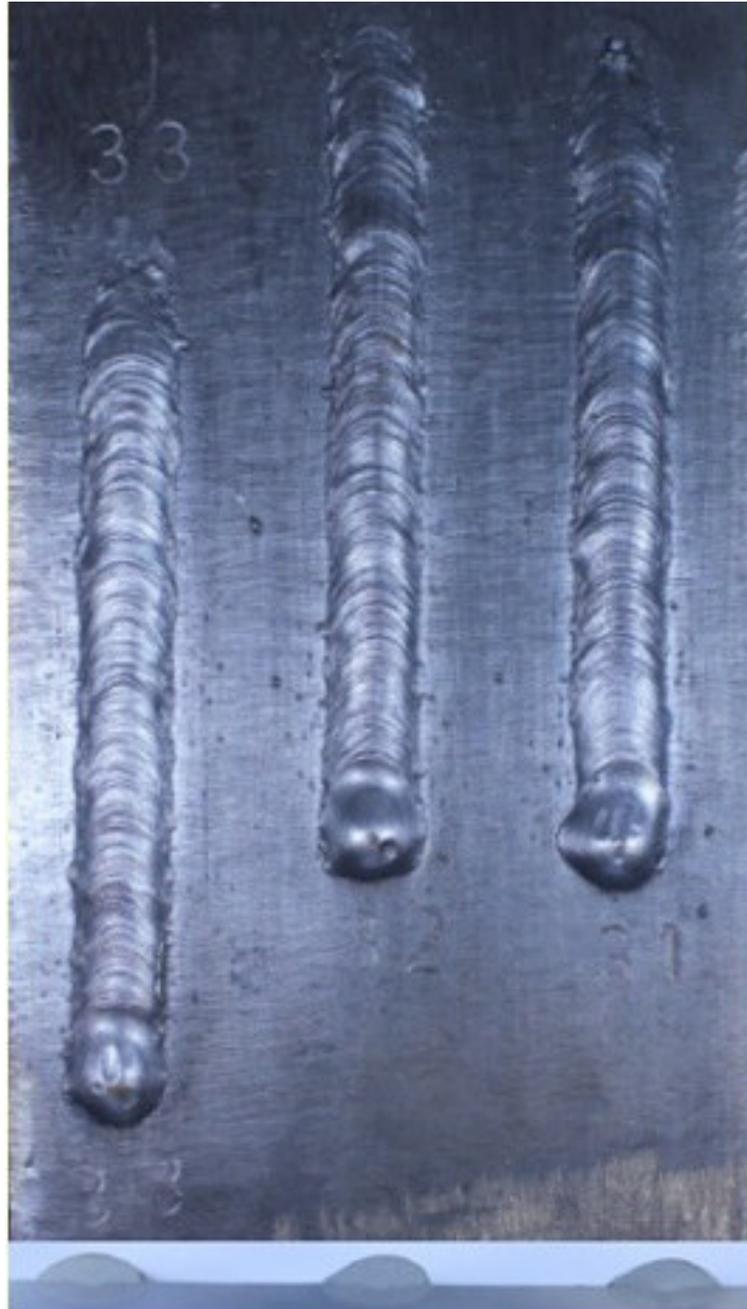
Da direita para esquerda: amostra 10, 11 e 12. Fonte: Autor

ANEXO E – Curto circuito Convencional: ângulo de -15° (posição vertical)



Da direita para esquerda: amostra 13, 14 e 15. Fonte: Autor

ANEXO F – Curto Circuito Controlado: ângulo de -15° (posição vertical)



Da direita para esquerda: amostra 16, 17 e 18. Fonte: Autor

ANEXO G – Junta antes da soldagem de passe de raiz



Fonte: Autor

ANEXO H – Junta após a soldagem de passe de raiz



Fonte: Autor