



Djeison Rangel Berger

**DETERMINAÇÃO DOS MELHORES PARÂMETROS DE
PROCESSO PARA A SOLDAGEM ROBOTIZADA DO AÇO
LNE 700**

Horizontina

2012

Djeison Rangel Berger

**DETERMINAÇÃO DOS MELHORES PARÂMETROS DE PROCESSO
PARA A SOLDAGEM ROBOTIZADA DO AÇO LNE 700**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Valtair de Jesus Alves, Mestre.

CO-ORIENTADOR: Richard Thomas Lermen, Doutor.

Horizontina

2012

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“Determinação dos melhores parâmetros de processo para a soldagem
robotizada do aço LNE 700”**

Elaborada por:

Djeison Rangel Berger

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 25/10/2012
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Me. Valtair de Jesus Alves
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
FAHOR – Faculdade Horizontina
Co-orientador**

**Prof. Me. Anderson Dal Molin
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Prof. Me. Anderson Dal Molin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica - FAHOR**

**Horizontina
2012**

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas, as quais presto minha sincera homenagem:

À minha família que me apoiou durante esta caminhada e a minha namorada Jaqueline Turra.

Aos professores que me ajudaram durante a graduação, em especial aos professores Valtair de J. Alves e Richard T. Lermen, pela orientação, oportunidade, e dedicação durante a realização do trabalho.

À empresa John Deere Brasil por permitir a realização dos testes práticos.

Aos colegas da John Deere Brasil Gerson Kuhn e Renan Perinazzo que prestaram grande suporte durante a realização deste trabalho.

Aos meus colegas que me acompanharam nestes cinco anos de estudos, em especial aos colegas Matias Dembogurski, Edinei J. Kraemer e Gabriel V. Vintacort.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

RESUMO

A soldagem MAG (*Metal Active Gas*) robotizada é um processo que apresenta características que a torna vantajosa para a soldagem de aços, principalmente no que diz respeito à qualidade da soldagem. A soldagem MAG robotizada é diretamente influenciada pelos parâmetros utilizados no processo, os quais devem ser adequados ao tipo de material que está sendo soldado. Desta forma, os critérios de qualidade da soldagem MAG robotizada devem ser avaliados para que se consiga determinar se o processo está dentro dos padrões de qualidade exigidos, assim como determinar a influência de cada parâmetro de soldagem sobre os critérios de qualidade observados, buscando atingir uma condição ótima para o processo. Desta forma, visando determinar a melhor configuração dos parâmetros de processo (tensão, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame), sendo que estes afetam diretamente os critérios de qualidade da junta soldada (dureza, zona afetada pelo calor (ZAC), convexidade, garganta teórica e pernas), vários experimentos de soldagem em aço de alta resistência denominado LNE 700 utilizando o processo de soldagem MAG robotizado foram realizados. O projeto de experimento e a análise estatística dos resultados fundamentaram-se na metodologia Taguchi, visando avaliar a resposta e a variabilidade de acordo com a combinação de fatores utilizados. A análise dos resultados permitiu identificar, para a maioria dos critérios de qualidade analisados, os fatores de maior influência e a melhor combinação dos mesmos para determinar uma ótima condição para a soldagem do aço de alta resistência LNE 700. Também, a influência dos parâmetros de soldagem sobre os critérios de qualidade foi determinada, além de identificar os critérios de qualidade mais afetados pela variação na configuração dos parâmetros utilizados.

Palavras-chave:

Aços de alta resistência - soldagem MAG robotizada - critérios de qualidade.

ABSTRACT

The MAG (Metal Active Gas) robotic welding is a process that has characteristics that makes it advantageous to steels welding, especially regarding the welding quality. The MAG robotic welding is directly influenced by the parameters used in the process, which should be adjusted to the type of material being welded. Thus, the quality criteria to MAG robotic welding should be evaluated to determine if the process is within the required quality standards, as well as determine the influence of each welding parameter on the quality criteria observed, seeking to achieve an optimum condition to the process. Thus, to determine the best configuration of the process parameters (voltage, welding speed and wire speed), seeing that these factors affect directly the quality criteria of the welding joint (hardness, heat affected zone (HAZ), convexity, throat and legs), many welding experiments on high strength steel denominate LNE 700 using MAG robotic welding process were made. The experiment design and statistical analysis to the results were based on the Taguchi method, to evaluate the response and variability according to the factors combination used. The results identified for most of the quality criteria analyzed, the factors most influential and the best combination of them to determine an optimal condition to weld the high strength steel LNE 700. Also, the influence of welding parameters on the quality criteria was determined, in addition identifying the quality criteria most affected by changing the parameters configuration.

Keywords:

High strength steels - MAG robotic welding - quality criteria.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de soldagem MAG. Fonte: Barbosa, 2007.	6
Figura 2: Perfis de solda não aceitáveis. Fonte: Adaptado de Modenesi, 2001.	12
Figura 3: Energia de soldagem em função da espessura de um aço com 700 MPa de limite de resistência ao escoamento. Fonte: Adaptado de SSAB, 2004.	13
Figura 4: Diagrama esquemático das zonas e subzonas afetadas pelo calor. Fonte: Adaptado de Arcelormitta, 2010.	15
Figura 5: Perfil de microdureza para um aço 700 MPa de limite de resistência ao escoamento. Fonte: Adaptado de SSAB, 2004.	15
Figura 6: Dispositivo para posicionamento das chapas. Fonte: Alves, 2009.	19
Figura 7: (a) Robô Yaskama MA 1900 e (b) fonte Auto-Axcess 450.	20
Figura 8: Critérios de qualidade avaliados.	21
Figura 9. Posição da tocha de soldagem em relação ao eixo do cordão de solda. Fonte: Adaptado de Alves, 2009.	23
Figura 10: Especificações para medição de dureza.	24
Figura 11: Perfil de microdureza dos corpos de prova CP1, CP2 e CP3.	25
Figura 12: Perfil de microdureza dos corpos de prova CP4, CP5 e CP6.	26
Figura 13: Perfil de microdureza dos corpos de prova CP7, CP8 e CP9.	26
Figura 14: Energia de soldagem em cada corpo de prova.	27
Figura 15: (a) Macrografia da junta soldada (b) microestrutura do metal de adição (c) microestrutura da zona de crescimento de grão (d) microestrutura da zona de refino de grão (e) microestrutura do metal de base.	28
Figura 16: Área da ZAC em função da tensão.	29
Figura 17: Área da ZAC em função da velocidade de soldagem.	30
Figura 18: Área da ZAC em função da velocidade do arame.	30
Figura 19: Razão S/N da área da ZAC para os fatores analisados.	31
Figura 20: Validação da zona afetada pelo calor.	32
Figura 21: Mensuração da convexidade.	32
Figura 22: Convexidade em função da tensão.	34
Figura 23: Convexidade em função da velocidade de soldagem.	34
Figura 24: Convexidade em função da velocidade do arame.	35
Figura 25: Razão S/N da largura da convexidade para os fatores analisados.	36
Figura 26: Validação da convexidade.	36
Figura 27: (a) Mensuração da garganta teórica (b) e mensuração de pernas.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Temperatura de pré-aquecimento recomendado por percentual de carbono equivalente.	5
Tabela 2 : Perfis de filete de solda desejáveis e aceitáveis.	14
Tabela 3 : Composição química do aço LNE 700.	18
Tabela 4 : Características mecânicas do aço LNE 700.	19
Tabela 5 : Composição química e características mecânicas do arame OK Aristorod™ 79.	20
Tabela 6 : Parâmetros do processo e respectivos níveis utilizados nos corpos de prova.	22
Tabela 7 : Matriz experimental com a ordem de realização dos corpos de prova e respectivos níveis.	22
Tabela 8 : Valores encontrados para os critérios analisados.	25
Tabela 9 : Análise de variância para a zona afetada pelo calor.	29
Tabela 10 : Análise de variância para a convexidade.	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA	3
2.1.1 SOLDAGEM DOS AÇOS COM 700 MPa DE RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO	3
2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM MAG	5
2.2.1 GÁS DE PROTEÇÃO	7
2.2.2 MODOS DE TRANSFERÊNCIA DO METAL DE SOLDA	7
2.2.3 PARÂMETROS OPERACIONAIS DE SOLDAGEM	8
2.2.4 SOLDAGEM MAG ROBOTIZADA	10
2.2.5 DESCONTINUIDADES EM JUNTAS SOLDADAS	10
2.3 ENERGIA DE SOLDAGEM.....	12
2.4 CRITÉRIOS DE QUALIDADE PARA SOLDAGEM MAG	13
2.4.1 GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA.....	13
2.4.2 ZONA AFETADA PELO CALOR E DUREZA	14
2.5 METODOLOGIA TAGUCHI	16
3 METODOLOGIA.....	18
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	18
3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS.....	21
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	25
4.1 PERFIL DE MICRODUREZA.....	25
4.2 ZONA AFETADA PELO CALOR.....	27
4.3 CONVEXIDADE	32
4.4 GARGANTA TEÓRICA E PERNAS.....	37
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	38
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

A constante busca por maior competitividade, traduzida em maior produtividade, qualidade e redução de custos na produção de produtos, remete investimentos cada vez mais representativos por parte das indústrias, principalmente, na automação de processos, podendo-se destacar neste contexto a soldagem MAG robotizada.

Historicamente, acrescenta-se que a soldagem MAG robotizada é sinônimo de maior confiabilidade, pois há maior controle sobre os parâmetros de processo.

Em geral, a soldagem MAG robotizada pode ser empregada na soldagem de diversos tipos de materiais, inclusive em aços de alta resistência. Porém, torna-se necessário o estudo da soldagem MAG robotizada sobre estes aços quando parâmetros de processo essenciais para a sua execução são desconhecidos.

Para tanto, existe o problema para realizar a soldagem MAG robotizada do aço LNE (limite neutro elástico) 700, pois não são conhecidos os parâmetros de processo como tensão, corrente, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame que devem ser utilizados para produzir juntas soldadas isentas de descontinuidades.

Segundo Freire Jr. (1998) nos aços de alta resistência há um aumento no percentual de elementos de liga que podem proporcionar microconstituintes frágeis que, por sua vez, contribuem para a ocorrência de descontinuidades na soldagem.

Ainda, a dificuldade para soldagem dos aços de alta resistência é agravada pela baixa utilização de robôs na soldagem MAG robotizada, pois segundo Bracarense e Felizardo (2008), apenas oito mil robôs estão instalados na indústria brasileira assim limitando os conhecimentos da soldagem MAG robotizada para estes aços.

O conhecimento dos parâmetros de processo para a soldagem do aço de alta resistência LNE 700, por parte de seus executores, se faz necessário, pois quando a soldagem for realizada, descontinuidades não serão admissíveis.

Assim, pode-se destacar o problema de pesquisa através da seguinte pergunta: Quais são os melhores parâmetros para a soldagem do aço de alta resistência LNE 700?

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo determinar os melhores parâmetros de processo e o efeito dos mesmos sobre os critérios de qualidade para

a soldagem robotizada do aço de alta resistência LNE 700, tendo ainda os seguintes objetivos específicos:

- Realizar soldas de filete, juntas tipo “T” em chapas do aço LNE 700;
- Analisar a dureza da junta soldada através de perfil de microdureza;
- Analisar a influência dos parâmetros de processo sobre zona afetada pelo calor (ZAC) através da metodologia Taguchi;
- Analisar como os parâmetros de processo influenciam nas características geométricas (convexidade, garganta teórica e pernas) através da metodologia Taguchi.

Realizar a soldagem MAG robotizada sobre o aço de alta resistência LNE 700 é importante, pois trata-se de um aço novo no mercado, e são poucos os estudos mostrando o comportamento do mesmo sobre processos de soldagem.

O aço LNE 700 desempenhará funções estruturais em novos equipamentos, sendo estas estruturas unidas através do processo de soldagem. Estes novos equipamentos serão constantemente submetidos a grandes esforços mecânicos, perante isso as juntas soldadas deverão garantir que descontinuidades não venham a surgir e comprometer o desempenho do equipamento.

Assim, a determinação dos melhores parâmetros de processo permitirá avaliar a influência de cada parâmetro sobre critérios de qualidade, vindo a determinar uma ótima condição para o processo, visto que a soldagem é um dos processos de fabricação mais complexos e quaisquer variações nos parâmetros poderá refletir grandes alterações nas juntas soldadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este referencial teórico consiste em descrever a fundamentação referente a soldagem MAG robotizada de materiais de alta resistência mecânica.

2.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA

Os aços com 700 MPa de resistência ao escoamento são caracterizados por oferecerem grande capacidade de conformação além de apresentarem grande absorção de energia, melhorando a resistência ao impacto. Devido a estas características são classificados como aços AHSS (*Advanced High Strength Steel*), ou seja, aços avançados com alta resistência (KRÍZ; ZAJÍCEK, 2011).

Já a composição do aço de alta resistência é basicamente carbono com 0,1 % e manganês com 1,5 %, porém podem ser adicionados refinadores de grãos de forma individual ou combinada como titânio, vanádio e nióbio (SSAB, 2009).

As características, principalmente de elevada resistência, nestes aços é obtida através de um processo especial de laminação a quente controlada, tendo sua microestrutura microligada com nióbio. Ligas com nióbio fornecem refinamento de grão e endurecimento por precipitação, fazendo com que retarde o movimento de discordância. Também são adicionados outros elementos microligantes, tais como vanádio e titânio para os níveis mais elevados de propriedades mecânicas (KRÍZ; ZAJÍCEK, 2011).

2.1.1 Soldagem dos aços com 700 MPa de resistência ao escoamento

A soldagem pode ser considerada como um dos processos de fabricação que mais necessita de estudos e testes devido a sua complexidade, principalmente quando pretende-se soldar aços com características de resistência mecânica elevada. Sendo assim, conhecer as características de soldabilidade destes aços torna-se importante para determinar as melhores condições de soldagem, assim evitando descontinuidades na junta soldada (KRÍZ; ZAJÍCEK, 2011).

A norma regente DIN EN 10149-2 (2009) descreve características de propriedades mecânicas para produtos planos ou soldáveis, laminados a quente e aços de alta resistência para conformação a frio, na qual aços com resistência ao escoamento de 700 MPa estão inseridos.

Em relação a preparação da matéria prima para a soldagem, pode-se utilizar processos de corte térmico (gás, plasma ou corte a *LASER*), porém estes processos

produzem uma pequena camada de óxido, o qual deve ser removida antes da soldagem. Da mesma forma, não há restrições quanto ao método de soldagem escolhido, podendo ser utilizado a soldagem MAG (*metal active gas*), TIG (*tungsten inert gas*) bem como a soldagem a arco submerso (SSAB, 2009).

Kríz e Zajícek (2011) comentam que para uma melhor qualidade na junta soldada é indicado o pré-aquecimento a, aproximadamente, 80° C, porém nenhuma descontinuidade na soldagem do material irá ocorrer se este pré-aquecimento não for realizado.

Para a soldagem de aços de alta resistência, é importante garantir baixa energia de soldagem e que o nível de hidrogênio na junta soldada seja mínimo, visto que altos níveis de hidrogênio poderão formar trincas. Portanto, a determinação de consumíveis de baixo hidrogênio, secagem adequada dos consumíveis e boa limpeza da junta durante o processo irá reduzir a possibilidade destes descontinuidades. Da mesma forma é importante que o metal de base e o metal de adição tenham características de resistência ao escoamento semelhante para assegurar resistência adequada a junta soldada (MODENESI, 2008).

Outro aspecto que deve-se levar em consideração para a soldagem de aços com características mecânicas elevadas é o carbono equivalente, pois o carbono é o elemento que possui influência na temperabilidade e na dureza final da junta soldada.

Através do carbono equivalente é possível relacionar a composição química de determinado aço com a tendência do mesmo apresentar estruturas frágeis (ESAB, 2004).

Para evitar que o carbono gere estruturas frágeis é recomendado o pré-aquecimento do metal de base, sendo que quanto maior for o teor de carbono do metal de base, maior será a temperatura de pré-aquecimento recomendada para o mesmo (ESAB, 2004). Desta forma, a AWS D1.1 (2004) sugere para o cálculo de carbono equivalente a Equação 1:

$$CE = C + \frac{(Mn + Si)}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (1)$$

Onde:

CE: Carbono equivalente

C: Carbono
 Mn: Manganês
 Si: Silício
 Cr: Cromo
 Mo: Molibdênio
 V: Vanádio
 Ni: Níquel
 Cu: Cromo

Com o resultado de carbono equivalente do material é possível verificar a necessidade de realizar o pré-aquecimento do mesmo antes de executar o processo de soldagem. A temperatura de pré-aquecimento varia de acordo com o percentual de carbono equivalente identificado no material, sendo que as temperaturas recomendadas são ilustradas na Tabela 1 (ESAB, 2004).

Tabela 1

Temperatura de pré-aquecimento recomendado por percentual de carbono equivalente.

Carbono equivalente (%)	Temperatura de pré-aquecimento recomendada
< 0,30	opcional
0,31 - 0,45	100° C - 200° C
0,45 - 0,60	200° C - 250° C
> 0,60	250° C - 300° C
Aços ferramenta, aços mola, aços de composição desconhecida.	~300° C

Fonte: Adaptado de ESAB, 2004.

Ainda, Modenesi (2008) comenta que é importante seguir recomendações de normas de soldagem para que soldas adequadas, de acordo com os requisitos de qualidade, possam ser obtidas.

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM MAG

O processo MAG é um dos processos de soldagem mais utilizados nas indústrias, pois apresenta alta produtividade, confiabilidade das soldas produzidas e baixo custo de produção (LIAO; CHEN, 1998).

Neste processo, a soldagem usa o calor do arco elétrico entre um eletrodo sem revestimento que, por sua vez, é alimentado de maneira contínua ao metal de base. O grande calor produzido neste processo funde o final do eletrodo e a superfície do metal de base, assim vindo a formar a solda (BARBOSA, 2007). A Figura 1 ilustra esquematicamente o processo de soldagem MAG.

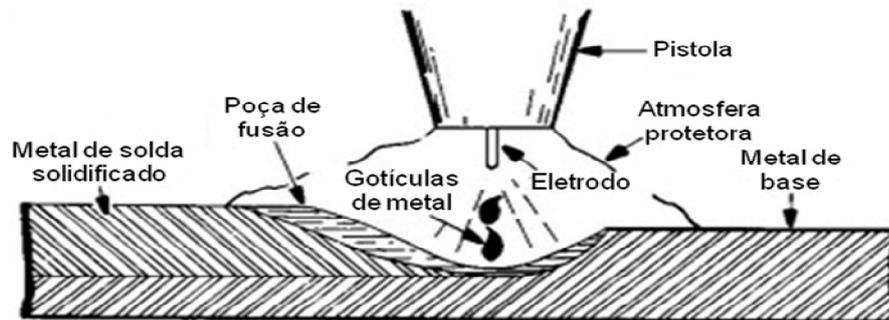


Figura 1: Processo de soldagem MAG. Fonte: Barbosa, 2007.

A proteção do arco e da poça de fusão no processo MAG ocorre através de um gás ativo. O gás comumente utilizado é CO_2 puro ou misturas $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ou ainda $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ que reage metalurgicamente com a gota e a poça de fusão (QUITES, 2002).

O processo de soldagem MAG, para Barbosa (2007), é um processo versátil que apresenta as seguintes vantagens:

- Processo semiautomático, podendo ser automatizado;
- Maior percentual de deposição em relação à soldagem com eletrodo revestido;
- Menores quantidades de gás e fumaça na soldagem;
- Pode ser aplicado para diversos tipos de materiais e espessuras;
- Não à necessidade de remoção de escória;
- Vasta capacidade de aplicação;
- A soldagem pode ser executada em diversas posições.

O mesmo autor descreve que há desvantagens na soldagem MAG, sendo a sensibilidade à variação dos parâmetros de operação do arco de soldagem uma das principais. Esta limitação tem influência direta na qualidade da junta soldada. Além desta, outras desvantagens são:

- Equipamento com maior custo;
- Maior manutenção dos equipamentos;
- Menor variedade de consumíveis;
- Maior tempo de resfriamento devido à ausência de escória, o que aumenta a possibilidade de ocorrência de descontinuidades.

2.2.1 Gás de proteção

Para Alves (2009), o gás de proteção tem como função primária a proteção da poça de fusão. O gás ainda possui responsabilidade na abertura e estabilidade do arco elétrico, além de possuir influência na transferência do metal de adição durante a soldagem.

O gás é um fator importante e tem influência na determinação da qualidade da junta soldada e na produtividade do processo. Os gases mais utilizados para proteção são, hélio, dióxido de carbono, argônio, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio. Contudo os três gases, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio, são usados em proporções relativamente pequenas em misturas, sobretudo a base de argônio (AWS, 1991).

No processo de soldagem MAG a adição de gases ativos aos gases inertes visa proporcionar melhor estabilidade do arco elétrico. A adição de pequenos teores de gases ativos tem as seguintes funções (BRANDI, 2004):

- Mudar o contorno do cordão na secção transversal;
- Reduzir respingos e mordedura;
- Aumentar a penetração.

2.2.2 Modos de transferência do metal de solda

Os processos de soldagem robotizados requerem sistemas com controle e resposta dinâmica, assim ter o conhecimento dos modos de transferência do metal de solda é importante.

Segundo Brandi (2004) existem quatro formas básicas de transferência de metal de adição do eletrodo para a peça: transferência por curto-circuito, transferência globular, transferência por pulverização e transferência por arco pulsado.

A transferência por curto-circuito ocorre para menores valores de corrente que a transferência globular e para qualquer tipo de gás de proteção utilizado durante o processo de soldagem. O curto-circuito é formado, quando a gota que se

forma na ponta do eletrodo sem revestimento toca a poça de fusão. A gota é puxada para a poça de fusão pela tensão superficial desta, assim permitindo a soldagem em todas as posições. É aconselhado para a soldagem de chapas finas, pois a quantidade de calor é menor que a da transferência globular. Porém, neste processo não há uma grande penetração e existem problemas de instabilidade do arco e respingos (BRANDI, 2004).

Na transferência globular os níveis de tensão são mais elevados que no curto-circuito. Neste tipo de transferência, as gotas de metal fundido são transferidas para a poça de fusão principalmente pela força gravitacional, desta forma limitando este processo de soldagem somente na posição plana. Neste tipo de transferência é comum a ocorrência de respingos, falta de fusão e penetração (QUITES, 2002).

A transferência por pulverização ocorre para maiores densidades de corrente e quando utilizado argônio ou misturas de argônio como gás de proteção. Esta transferência ocorre quando a gota formada na ponta do eletrodo sem revestimento possui o diâmetro menor que o próprio eletrodo e desta forma é axialmente direcionado. A quantidade de calor transferida para a peça neste processo é elevada, sendo aconselhado para a soldagem de chapas grossas (BRANDI, 2004).

Na transferência por arco elétrico pulsado, o equipamento de soldagem gera dois níveis de corrente. Na primeira, a corrente de base é baixa e não ocorre transferência, mas somente inicia a fusão do arame. Na segunda, a corrente de pico é superior à corrente de transição globular/pulverização, gerando a transferência de uma única gota. Assim é possível obter uma transferência com certas características de pulverização, porém com uma corrente média menor. Este processo permite a soldagem de chapas finas e em todas as posições (BRANDI, 2004).

2.2.3 Parâmetros operacionais de soldagem

Os parâmetros operacionais de soldagem MAG podem influenciar nos resultados finais da soldagem. Desta forma, conhecer os parâmetros é fundamental para que os resultados esperados no processo de soldagem de aços de alta resistência possam ser atendidos. Os principais parâmetros operacionais de soldagem MAG são: tensão – voltagem, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame.

A tensão de soldagem possui grande efeito sobre o resultado da junta soldada. Dentre os parâmetros mais influentes no processo de soldagem, pode-se destacar a tensão, visto que esta pode afetar o modo de transferência metálica e a geometria do cordão de solda. Além disso, baixas tensões irão produzir baixos comprimentos de arco e vice-versa. A tensão também possui influência da composição e do diâmetro do eletrodo (NILO Jr., 2003).

O produto entre a tensão e corrente que dá resultado a potência do arco elétrico, é responsável pela largura do cordão de solda. Na corrente constante, com o aumento da tensão do arco elétrico, será obtida maior largura e menor altura do cordão, maior distribuição do metal de adição depositado no metal de base e menor penetração. Ainda, caso tensões elevadas forem utilizadas, outros tipos de descontinuidades podem ser identificados, tais como excesso de respingos, mordeduras e porosidade (BRANDI, 2004).

A velocidade de soldagem é expressa pela taxa, na qual ocorre o deslocamento do arco elétrico ao longo da junta e este, por sua vez, influencia na temperatura gerada na peça, assim mantendo todos os outros parâmetros constantes. Quanto maior for a velocidade de soldagem, menor será a quantidade de calor gerado na peça (NILO Jr., 2003).

Para o mesmo autor o controle da velocidade de soldagem é considerado parâmetro importante para realização de um bom cordão de solda, pois pode-se controlar o tamanho do cordão e a penetração. Quando determinada velocidade de soldagem muito alta, há grandes probabilidades de ocorrer mordeduras, porosidades e trincas. Por outro lado, determinar velocidade de soldagem muito baixa, poderá gerar maior custo da operação e, contudo, pode causar alterações na estrutura do material devido à concentração térmica.

A velocidade de alimentação do arame está diretamente ligada ao fluxo de corrente elétrica, portanto, é considerada uma variável importante ao processo (NILO Jr., 2003).

Há uma relação direta entre a velocidade alimentação do arame e a corrente elétrica de soldagem e, em contrapartida, uma relação inversa destas com o comprimento do arco elétrico. Assim, altas velocidades de alimentação do arame podem resultar em altas correntes de soldagem, o que pode gerar mordeduras e deformação no metal de base. Já baixas velocidades do arame podem acarretar falta de fusão, penetração e formatos irregulares na geometria do cordão de solda.

Desta forma, determinar o parâmetro de velocidade de alimentação do arame é indispensável para boas características geométricas e ausência de descontinuidades (NILO Jr., 2003).

2.2.4 Soldagem MAG robotizada

Para a AWS (2001) a soldagem robotizada é definida como a soldagem realizada com robô ou manipulador, o qual executa operações de soldagem, após receber determinada programação, sem a necessidade de ajuste ou controle do operador.

Na indústria, o processo de soldagem MAG com eletrodo sólido, contínuo, sob proteção gasosa é o mais utilizado na soldagem robotizada. Neste processo, o metal de base e o metal de adição são aquecidos através do arco elétrico, cujo fornecimento é de forma contínua, fundindo-os e assim distribuindo o metal de solda através da tocha pelo manipulador sobre a junta a ser soldada (BARROS, 2006).

O mesmo autor comenta que para este processo de soldagem, é necessária uma fonte de energia de soldagem com tensão constante, alimentador de arame conectado a uma fonte para controle de velocidade do arame, uma tocha e um sistema de fornecimento de gás de proteção.

Segundo Alves (2009), o crescimento da automatização da robótica está ligado a vários fatores, tais como:

- Padrões inaceitáveis de qualidade: Para maior confiança nos produtos, tolerâncias mais apertadas são requeridas nos projetos. Com a automação consegue-se assegurar maior nível de qualidade e por consequência a diminuir custos com retrabalho ou até mesmo com rejeições;
- Controle de processo: é necessário monitorar os robôs, pois fornecem muitos recursos até mesmo para prevenir erros antes que eles aconteçam.

2.2.5 Descontinuidades em juntas soldadas

Descontinuidade, para Modenesi (2001), pode ser entendida como qualquer interrupção da estrutura de uma junta soldada. Desta forma, a falta de homogeneidade de características metalúrgicas do material ou da solda pode ser considerada descontinuidade em juntas soldadas. Assim, a descontinuidade pode ser entendida como o não atendimento de uma exigência de qualidade, conforme listado:

- Trincas induzidas pelo hidrogênio: As trincas podem ser formadas por diversos fatores, sendo um delas devido a presença de hidrogênio dissolvido no metal fundido. Este tipo de trinca normalmente ocorre quando o material está próximo a temperatura ambiente, principalmente na ZAC. Após a sua formação, a mesma tende a crescer de forma lenta e descontínua. Estas trincas podem ser superficiais, longitudinais ou transversais (FILHO, 2008);

- Contaminação do metal de solda por hidrogênio: Ocorre da dissociação no arco elétrico das moléculas de gás hidrogênio, onde são introduzidas na junta soldada a partir do ar atmosférico ou até mesmo por outras fontes de contaminação. Devido à elevada solubilidade gasosa do aço no estado líquido o hidrogênio é absorvido pela poça de fusão, permanecendo no metal de solda, após a solidificação (FILHO, 2008);

- Falta de fusão: Trata-se da ausência de união por fusão entre o metal de adição e o metal de base. As causas para este tipo de descontinuidade pode ser o aquecimento inadequado do metal de base, manipulação incorreta do metal de adição, uso de baixa energia de soldagem ou até mesmo falta de limpeza da junta. A falta de fusão é um concentrador de tensões, podendo gerar trincas e reduzir a seção efetiva da solda, facilitando a quebra por esforços mecânicos. Uma das causas para sua ocorrência é a utilização de velocidade de soldagem elevada (MODENESI, 2001);

- Falta de penetração: Trata-se da falha em se fundir e encher completamente a raiz da junta. A falta de penetração pode causar uma redução da seção útil da solda comprometendo a mesma quando exposta à esforços mecânicos, e, também pode ser um concentrador de tensões. Pode ser causada por diversos fatores, dentre eles a energia de soldagem muito baixa e a manipulação incorreta do eletrodo (MODENESI, 2001);

- Mordedura: São pequenas reentrâncias agudas formadas pela ação do alto calor gerado pelo arco elétrico entre o passe de solda e o metal de base. A presença de mordedura irá gerar um enfraquecimento da junta soldada devido à criação de uma redução da seção resistente. Uma das causas desta descontinuidade pode ser a velocidade de soldagem muito alta (MODENESI, 2001);

- Porosidade: É formada pelo aprisionamento dos gases, na parte posterior da poça de fusão durante a solidificação da solda. Normalmente os poros possuem formato esférico, em geral, associados com hidrogênio. Pode ocorrer devido a

diversos fatores, dentre eles a parâmetros inadequados e problemas no equipamento de soldagem (MODENESI, 2001);

- Alterações na geometria do cordão de solda: Agem como concentradores de tensão, facilitando a ocorrência de trincas. Esta descontinuidade está associada geralmente a problemas operacionais, tais como instabilidade do processo e utilização de parâmetros incorretos (MODENESI, 2001). A Figura 2 ilustra os principais tipos de perfis de solda não aceitável.

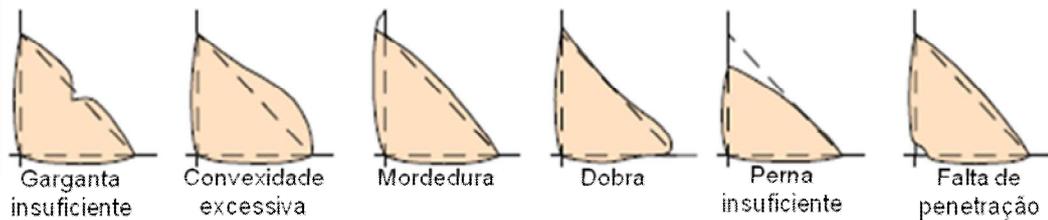


Figura 2: Perfis de solda não aceitáveis. Fonte: Adaptado de Modenesi, 2001.

2.3 ENERGIA DE SOLDAGEM

Segundo AWS D1.1 (2004), a energia de soldagem é descrita como a quantidade de energia imposta por determinada unidade de comprimento do cordão de solda pelo deslocamento de uma fonte de calor, sendo a energia de soldagem dada pela Equação 2:

$$E = \eta \times \frac{U \times I}{v} \quad (2)$$

Onde:

E : Energia de soldagem (J/mm)

η : Rendimento do arco

U : Tensão de soldagem (V)

I : Corrente de soldagem (A)

v : Velocidade de soldagem (mm/s)

Energia de soldagem baixa é benéfica quando a soldagem for aplicada em aços com 700 MPa de resistência ao escoamento para garantir que as propriedades mecânicas não sejam comprometidas.(SSAB, 2004).

Neste sentido, a SSAB (2004) aconselha que aços de alta resistência com características de escoamento de 700 MPa e espessura de 4,5 mm apresentem energia de soldagem de aproximadamente 0,5 kJ/mm, conforme ilustrado através da Figura 3.

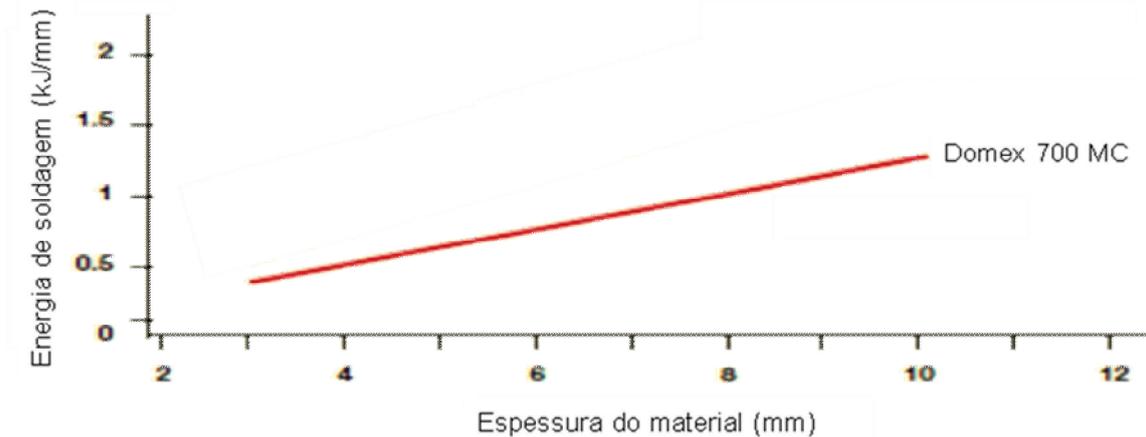


Figura 3: Energia de soldagem em função da espessura de um aço com 700 MPa de limite de resistência ao escoamento. Fonte: Adaptado de SSAB, 2004.

2.4 CRITÉRIOS DE QUALIDADE PARA SOLDAGEM MAG

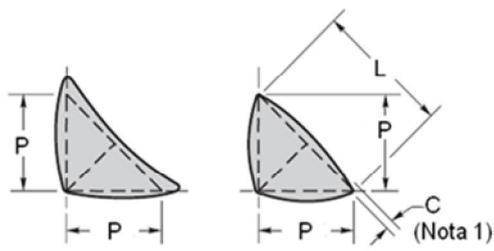
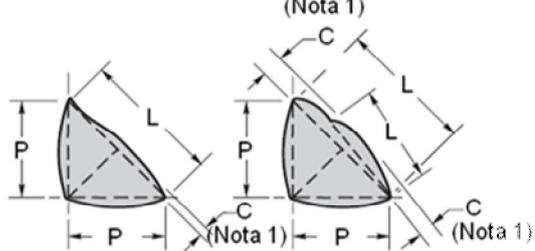
As soldas realizadas através do processo MAG apresentam algumas características inerentes ao processo, cujos parâmetros de processo influenciam diretamente nos critérios para validar a qualidade da junta soldada. Para tanto, nesta seção foram descritos os critérios de qualidade avaliados para a soldagem do aço de alta resistência LNE 700.

2.4.1 Geometria do cordão de solda

A geometria do cordão de solda pode apresentar efeito considerável no desempenho da junta soldada, podendo ficar abaixo de sua resistência e comprometer a qualidade da soldagem (ALVES, 2009).

A norma AWS D1.1 (2004) especifica que a geometria do cordão de solda para a soldagem MAG, compreendido pelas pernas e convexidade deve atender quanto aos critérios descritos através do Tabela 2.

Tabela 2
Perfis de filete de solda desejáveis e aceitáveis.

(A) Perfis de solda de filete desejáveis	(B) Perfis de solda de filete aceitáveis
	

Nota 1: A convexidade “C” e, a largura da face do cordão “L” não deve exceder os valores:

Largura da face do cordão de solda (L)	Máxima convexidade permitida (C)
L < 8mm	2 mm
L < 8 mm até L < 25 mm	3 mm
L ≥ 25 mm	5 mm

Fonte: Adaptado de AWS D1.1 2004.

Além de cuidados com a geometria do cordão de solda, outras descontinuidades devem ser evitadas ou minimizadas, sendo elas: trincas, mordedura, falta de fusão, falta de penetração e porosidade.

2.4.2 Zona afetada pelo calor e dureza

Durante o processo de união, metal base deve ser aquecido até o ponto de fusão e então resfriado novamente de forma rápida sobre condições e restrições impostas pela geometria da junta. Neste processo a microestrutura e propriedades do metal na região da ZAC são alteradas, criando diferentes zonas e subzonas. A Figura 4 apresenta um diagrama esquemático das zonas e subzonas afetadas pelo calor de uma liga 0,15% C (ARCELORMITTA, 2010).

Durante a soldagem dos aços de alta resistência são formadas regiões na ZAC de baixa dureza devido às alterações na microestrutura. A dureza e a largura das regiões da ZAC são determinadas, principalmente, pela espessura do metal de base, temperatura de trabalho e energia de soldagem (SSAB, 2004).

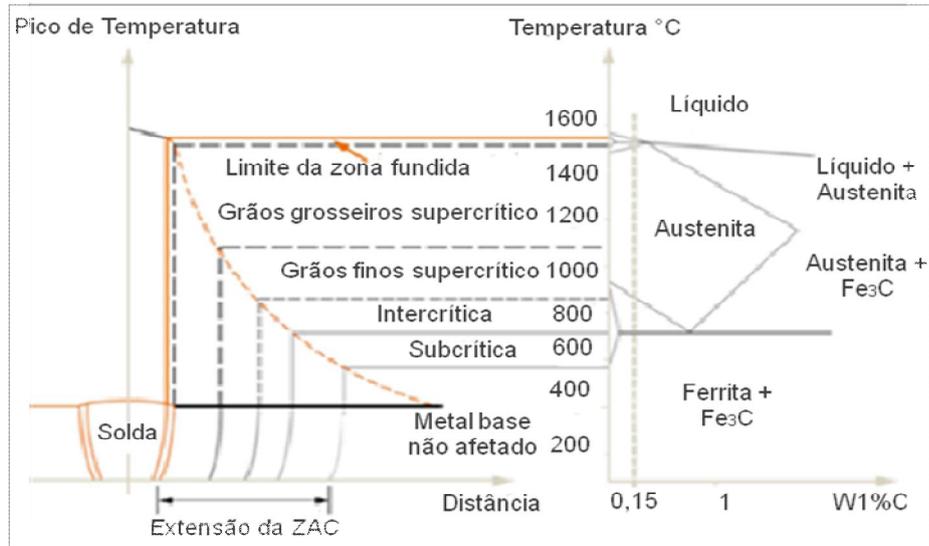


Figura 4: Diagrama esquemático das zonas e subzonas afetadas pelo calor. Fonte: Adaptado de Arcelormitta, 2010.

A largura da ZAC irá aumentar e a dureza irá cair, quando a soldagem for realizada com energias de soldagem elevadas. Normalmente, a descontinuidade irá ocorrer nas zonas de menor dureza da ZAC, pois nestas zonas a resistência da junta soldada será menor que o metal de base. A Figura 5 apresenta a curva típica de dureza para um aço de alta resistência com 700 MPa de limite de resistência ao escoamento, sendo o centro do cordão de solda a 10 mm (SSAB, 2004).

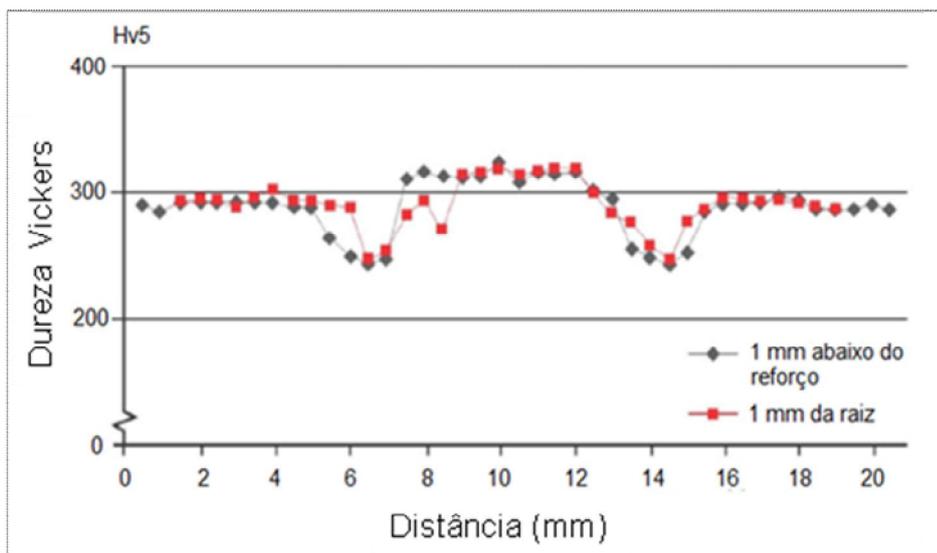


Figura 5: Perfil de microdureza para um aço 700 MPa de limite de resistência ao escoamento. Fonte: Adaptado de SSAB, 2004.

A AWS D1.1 (2004) comenta que a dureza da junta soldada dependerá de certo número de fatores, tais como, tipo de aço, nível de hidrogênio e condições de trabalho. Neste sentido, testes laboratoriais com soldas de filete mostraram que não irá ocorrer trincas na ZAC caso a dureza de um aço com características de 700 MPa for inferior a 400 Vickers.

2.5 METODOLOGIA TAGUCHI

O método Taguchi é compreendido por testes ou experiências onde são efetuadas alterações deliberadas nas variáveis de entrada de um determinado processo de modo a identificar justificativas para as variáveis de saída (MOITA, 2007).

Moita (2007) descreve que Taguchi é uma excelente ferramenta, pois trata-se de um método de *design* – projeto de experiências de fatoriais fracionados, onde somente é executada certa fração do total de combinações das variáveis de entrada. Para isso, utilizam-se matrizes compostas por vetores ortogonais que definem os testes ou experimentos a serem realizados. A determinação da matriz mais apropriada é realizada a partir do número de fatores que desejam ser controladas e seus respectivos níveis (MOITA, 2007).

Button (2005) comenta que esta metodologia propõe analisar a resposta média para um determinado conjunto de fatores selecionados e em seguida avaliar a variabilidade através da razão sinal-ruído (S/N), sendo o ruído descrito por Taguchi como as causas que interferem na variabilidade das funções do produto. Três razões sinal-ruído são empregadas:

- Menor é melhor – busca minimizar a resposta, sendo esta condição expressa pela Equação 3.

$$SN = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (3)$$

SN = Transformação Sinal/Ruído medido em decibéis (dB);

n = Número de estudos/observações;

y_i^2 = i -nésima resposta observada para cada experimento.

- Maior e melhor – busca maximizar a resposta, sendo esta condição expressa pela Equação 4.

$$SN = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (4)$$

SN = Transformação Sinal/Ruído medido em decibéis (dB);

n = Número de estudos/observações;

y_i^2 = I-ésima resposta observada para cada experimento.

- Nominal é melhor – busca reduzir a variabilidade em torno de um valor nominal, sendo esta condição expressa pela Equação 5.

$$SN = 10 \cdot \log\left(\frac{y^2}{S^2}\right) \quad (5)$$

SN = Transformação Sinal/Ruído medido em decibéis (dB);

y^2 = Valor médio ao quadrado;

S^2 = Variância das respostas observadas para cada experimento

A análise de variância, aplicada sobre os resultados dos testes permite estabelecer os fatores com maior influência na redução da variação bem como ajustar a média da variável a ser controlada. Também é possível identificar os níveis que proporcionam os melhores resultados para a qualidade do produto (MOITA, 2007).

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão descritos os materiais e equipamentos além dos métodos e técnicas utilizadas para realização deste trabalho.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os corpos de prova utilizados para análise foram produzidos na empresa John Deere Brasil, a qual disponibilizou os materiais e equipamentos necessários para a realização deste trabalho.

O material escolhido para produção das amostras é do tipo aço de alta resistência LNE 700, obtido através do processo de laminação a quente com espessura de 4,5 mm.

As amostras foram produzidas com as dimensões de 50 x 100 x 4,5 mm através de corte a *LASER*. A composição química do material foi obtida através de verificação por espectrômetro de massa e pode ser observado através da Tabela 3.

Tabela 3
Composição química do aço LNE 700.

Elementos Químicos	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti
%	0,1	0,03	1,53	0,02	0,003	0,058	0,02	0,04	0,007	0,108

Elementos Químicos	Cr	Ni	Mo	Sn	N	B	Ca	Sb	Pb	CE
%	0,43	0,02	0,02	0,002	0,0037	0,0001	0,0012	0,01	0,003	0,45

Já as características mecânicas do aço LNE 700 foram obtidas através de informações fornecidas pelo fabricante (USIMINAS, 2011) e são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4
Características mecânicas do aço LNE 700.

Tipo de aço	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de alongamento (%)
LNE 700	735	810	18

Fonte: Adaptado de Usiminas, 2011.

Para o posicionamento e fixação das chapas durante o processo de soldagem, foi utilizado o dispositivo conforme ilustrado na Figura 6.

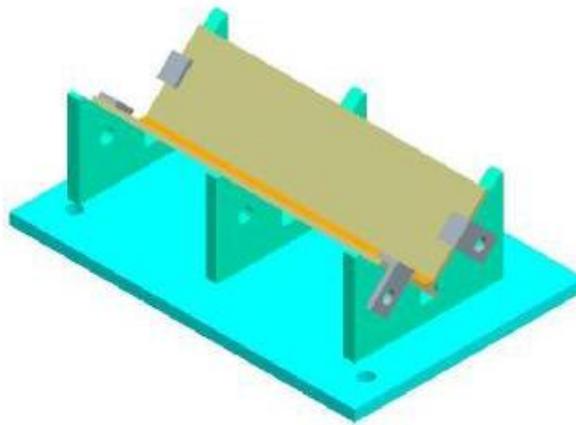


Figura 6: Dispositivo para posicionamento das chapas. Fonte: Alves, 2009.

A soldagem foi realizada com robô Yaskama modelo MA 1900 com seis graus de liberdade, conforme Figura 7 (a). O gás de proteção utilizado foi uma mistura composta por 82% Ar e 18% CO₂. A fonte de soldagem utilizada foi Auto-Axcess 450 inversora totalmente digitalizada e controlada por microprocessadores, com capacidade de soldagem em curto-circuito, arco elétrico pulsado e aerossol, com saída de corrente de até 450 A, conforme pode ser verificado na Figura 7 (b).

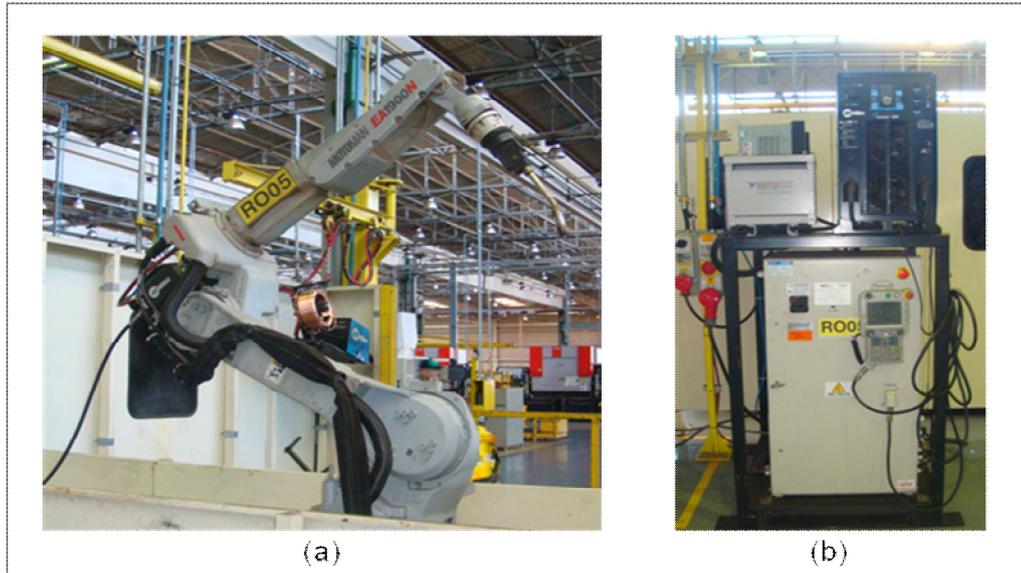


Figura 7: (a) Robô Yaskama MA 1900 e (b) fonte Auto-Axcess 450.

O metal de adição utilizado foi arame maciço da marca ESAB modelo OK Aristorod™ 79 com diâmetro de 1,00 mm, tendo a composição química ilustrada através da Tabela 5.

Tabela 5

Composição química e características mecânicas do arame OK Aristorod™ 79.

Elementos Químicos	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
%	0,1	0,8	1,9	0,4	2,1	0,6

Características Mecânicas	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de alongamento (%)
OK Aristorod™ 79	850	890	18

Fonte: Adaptado de ESAB, 2010.

Para preparar os corpos de prova e para realizar a análise de microdureza das juntas soldadas utilizou-se os seguintes equipamentos:

- Máquina de corte modelo Discoton-2;
- Máquina de polimento modelo Ecomet-4;
- Microscópio Olympus BX51M com amplificação de até 1000 vezes;

- Microdurômetro modelo Shimadzu com capacidade de carga de 0,015 a 1000g.

3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS

Através do embasamento teórico desenvolveu-se o projeto de experimento, sendo que foram verificados os critérios de qualidade: Microdureza, ZAC, convexidade, garganta teórica e pernas, conforme ilustrado através da Figura 8.

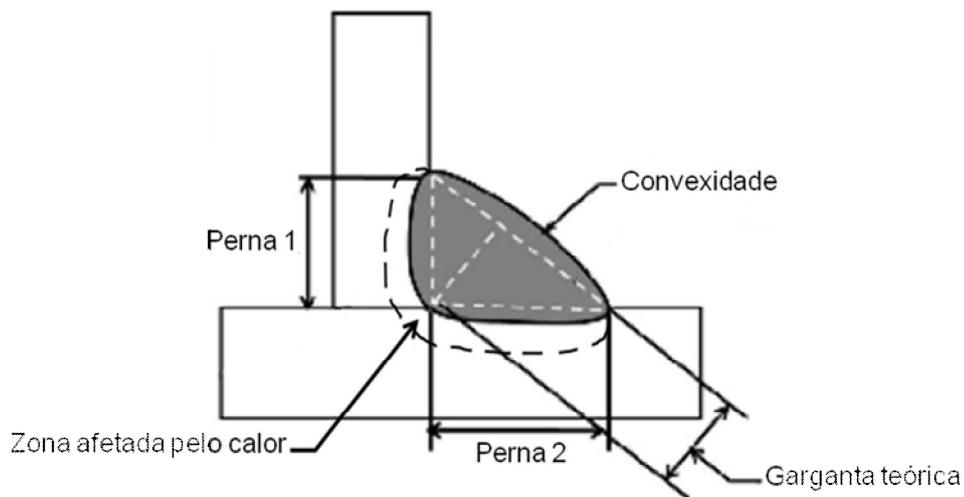


Figura 8: Critérios de qualidade avaliados.

Através da revisão da literatura foram definidos os parâmetros de processo com maior influência nos critérios citados, os quais são frequentemente ajustados de acordo com o tipo de material a ser soldado. Os seguintes parâmetros de processo foram utilizados: tensão, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame.

Três níveis foram determinados para cada parâmetro. Os níveis foram escolhidos previamente através de testes de soldagem. Inicialmente, os testes foram realizados sobre chapas de aço 1020, sendo que após definido certos parâmetros foram realizados sobre chapas do aço LNE 700.

A Tabela 6 apresenta as variáveis de entrada (parâmetros de processo), com os seus respectivos níveis, utilizadas no processamento dos corpos de prova.

Tabela 6
Parâmetros do processo e respectivos níveis utilizados nos corpos de prova.

Nº	Fator	Unidade	Notação	Nível	Valor
1	Tensão	Volt	V	1	23,5
				2	26,5
				3	30
2	Corrente	Amperes	A	1	220
				2	228
				3	250
3	Velocidade de soldagem	Milímetro por segundo	mm/s	1	8,33
				2	9,16
				3	10
4	Velocidade do arame	Metros por minuto	m/min.	1	12,6
				2	14,2
				3	16

A matriz experimental foi definida pelo número de parâmetros de processo e seus respectivos níveis, conforme Tabela 7. Portanto, tendo três parâmetros com três níveis cada, utilizou-se uma matriz L9 que proporcionou uma interação entre os parâmetros e os respectivos níveis, permitindo uma análise consistente dos critérios de qualidade.

Tabela 7
Matriz experimental com a ordem de realização dos corpos de prova e respectivos níveis.

Ordem	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Velocidade do arame (m/min)
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	2	2	1	2
5	2	2	2	3
6	2	2	3	1
7	3	3	1	3
8	3	3	2	1
9	3	3	3	2

Inicialmente, houve a limpeza das chapas onde foi realizada a remoção do óxido gerado no processo de corte a *LASER*. As chapas foram posicionadas no dispositivo formando uma junta em “T”, sendo que os cordões de solda foram realizados em posição plana, com a tocha do robô posicionada a 45° entre as duas

chapas e a distância de 20 mm, conforme Figura 9. O modo de transferência do metal de solda utilizado foi do tipo arco elétrico pulsado, onde o equipamento de soldagem gera dois níveis de corrente. Houve aplicação do cordão de solda em apenas um lado da junta.

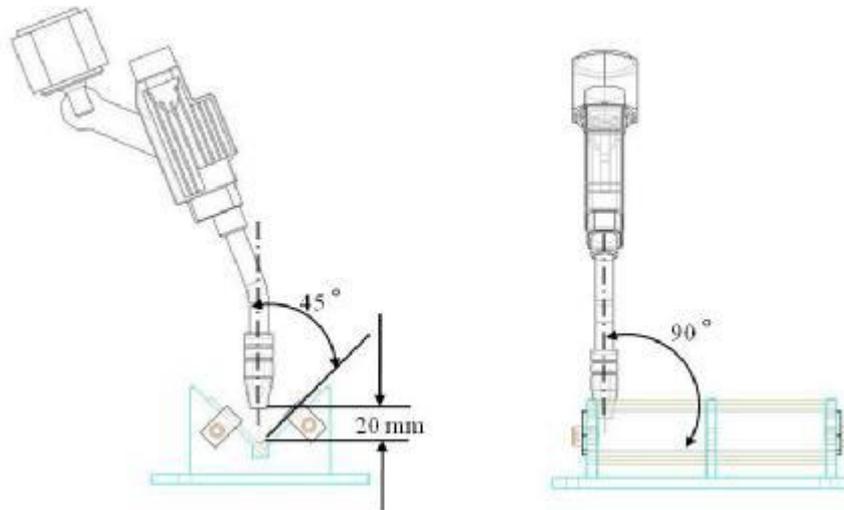


Figura 9. Posição da tocha de soldagem em relação ao eixo do cordão de solda. Fonte: Adaptado de Alves, 2009.

Posteriormente, a análise dos resultados foi realizada através de verificação laboratorial onde cada corpo de prova, incluindo os corpos de prova para validação foram seccionados, embutidos, lixados, polidos e atacados quimicamente com nital (10%) para revelar a microestrutura do material. Cada corpo de prova foi seccionado em três regiões, assim permitindo aumentar a confiabilidade nas posteriores mensurações realizadas.

O método utilizado para verificar a microdureza consiste na análise por microdurômetro, onde as medições foram realizadas com carga de 1 kg a cada 0,7 mm de distância criando assim um perfil de microdureza. A norma DIN EN 1043-1 (1995) especifica que para chapas com espessura acima de 4 mm em juntas do tipo "T" deve-se medir a microdureza no máximo a 2 mm de distância da borda, desta forma utilizou-se a distância de 1 mm para medição. A medição da microdureza foi realizada apenas em uma das regiões seccionadas de cada corpos de prova, porém nos nove experimentos realizados. A Figura 10 ilustra o perfil de microdureza criado com as respectivas dimensões utilizadas para medição.

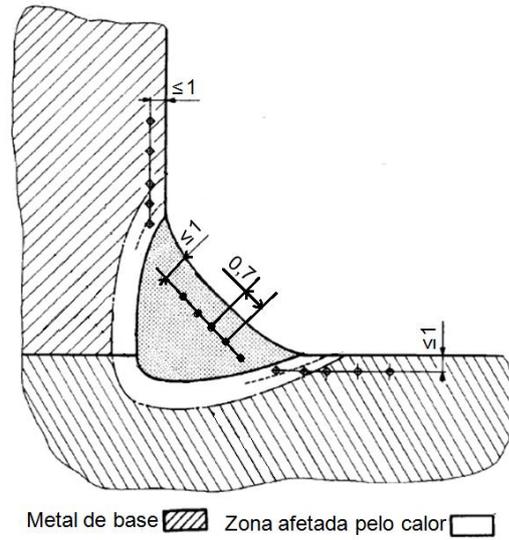


Figura 10: Especificações para medição de dureza.

A análise da ZAC e geometria consistem na captura de uma imagem ampliada da região da junta soldada com o auxílio de um microscópio.

As medições foram realizada com o auxílio do *software Image J*. Para os valores obtidos nas três regiões de cada corpo de prova calculou-se a média.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 8 apresenta as médias das variáveis de saída (respostas) encontradas experimentalmente.

Tabela 8
Valores encontrados para os critérios analisados.

Ordem	Zona afetada pelo calor (mm ²)	Convexidade (mm)	Garganta teórica (mm)	Perna 1 (mm)	Perna 2 (mm)
1	28,55	1,28	3,60	5,35	4,87
2	24,20	1,27	3,58	5,24	4,92
3	28,24	1,54	3,52	5,04	4,91
4	45,31	0,91	4,06	5,68	5,80
5	39,13	1,13	3,91	5,47	5,61
6	27,88	0,50	3,56	4,95	5,15
7	69,65	0,39	4,68	7,19	6,19
8	51,25	0,57	3,86	5,31	5,69
9	50,86	0,39	4,03	5,91	5,50

No que se refere a demais descontinuidades de soldagem descritos por porosidade, trincas, mordedura, penetração e fusão, todos os corpos de prova atenderam, visto que não foram identificadas descontinuidades destas origens.

4.1 PERFIL DE MICRODUREZA

O perfil de microdureza realizado em cada corpo de prova mostrou dureza média de 270 Vickers para o metal de base e 255 Vickers para a ZAC. Estes valores condizem com o padrão de dureza para o tipo de material analisado, conforme as ilustrações das Figuras 11, 12 e 13.

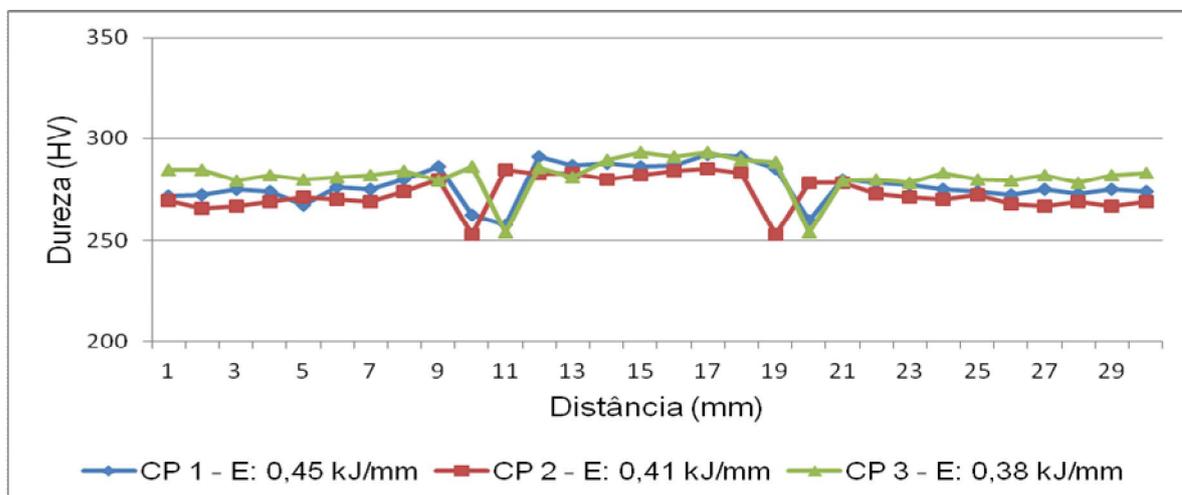


Figura 11: Perfil de microdureza dos corpos de prova CP1, CP2 e CP3.

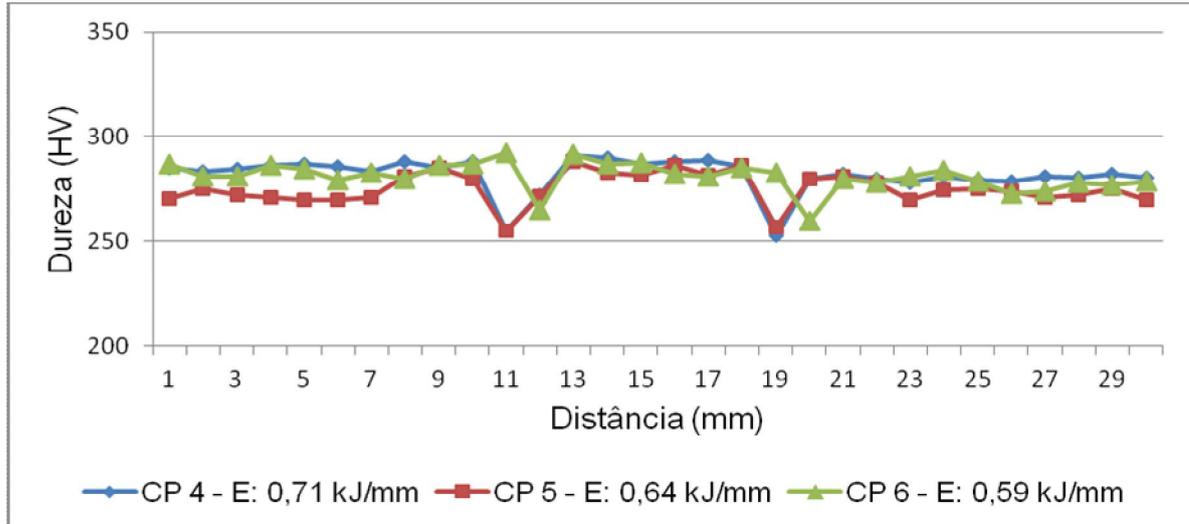


Figura 12: Perfil de microdureza dos corpos de prova CP4, CP5 e CP6.

Foi possível perceber que a dureza sofreu variações principalmente, na ZAC, pois a dureza diminuiu, confirmando assim os dados levantados na revisão da literatura deste trabalho. Também tensões maiores resultaram em maiores regiões com menor dureza, situação esta que pode ser verificada através dos corpos de prova (CP) ilustrados na Figura 13.

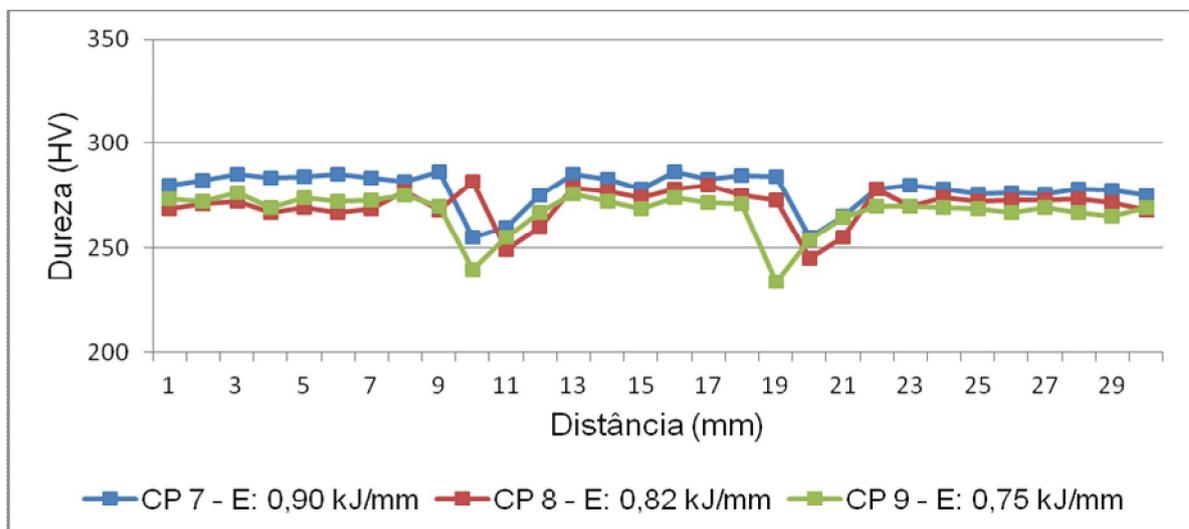


Figura 13: Perfil de microdureza dos corpos de prova CP7, CP8 e CP9.

A utilização de metal de adição com características de resistência ao escoamento similar ao metal de base proporcionou um perfil de microdureza constante sem grandes variações.

Os diversos parâmetros de processo utilizados proporcionaram que cada corpo de prova apresentasse valor de energia de soldagem diferente. Energias de soldagem mais elevadas resultaram menor dureza na área da ZAC.

Foi possível analisar, desconsiderando o rendimento do arco elétrico, que três pequenas retas foram formadas, isso principalmente devido a utilização de três diferentes tensões para os corpos de prova, conforme pode ser verificado através da Figura 14.

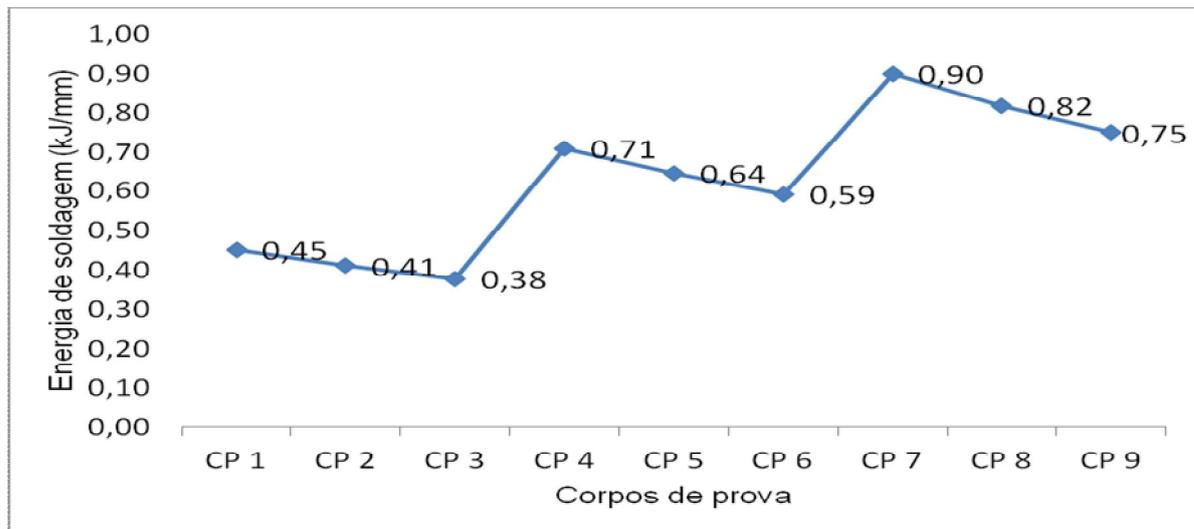


Figura 14: Energia de soldagem em cada corpo de prova.

O corpo de prova CP1 apresentou a energia de soldagem mais favorável, conforme recomendado pela revisão da literatura, porém não foram identificadas descontinuidades decorrentes de energias de soldagem tanto maiores quanto menores ao recomendado para a soldagem do aço com característica de 700 MPa de limite de resistência ao escoamento.

4.2 ZONA AFETADA PELO CALOR

Ao analisar a ZAC, percebe-se, que a influência térmica do processo de soldagem no material é significativa. Esta influência pode ser percebida na ZAC devido a mudança na microestrutura do material, visto que, em casos onde o parâmetro de processo tensão foi maior, a largura da ZAC aumentou, formando zonas termicamente afetadas, as quais podem ser verificadas na Figura 15.

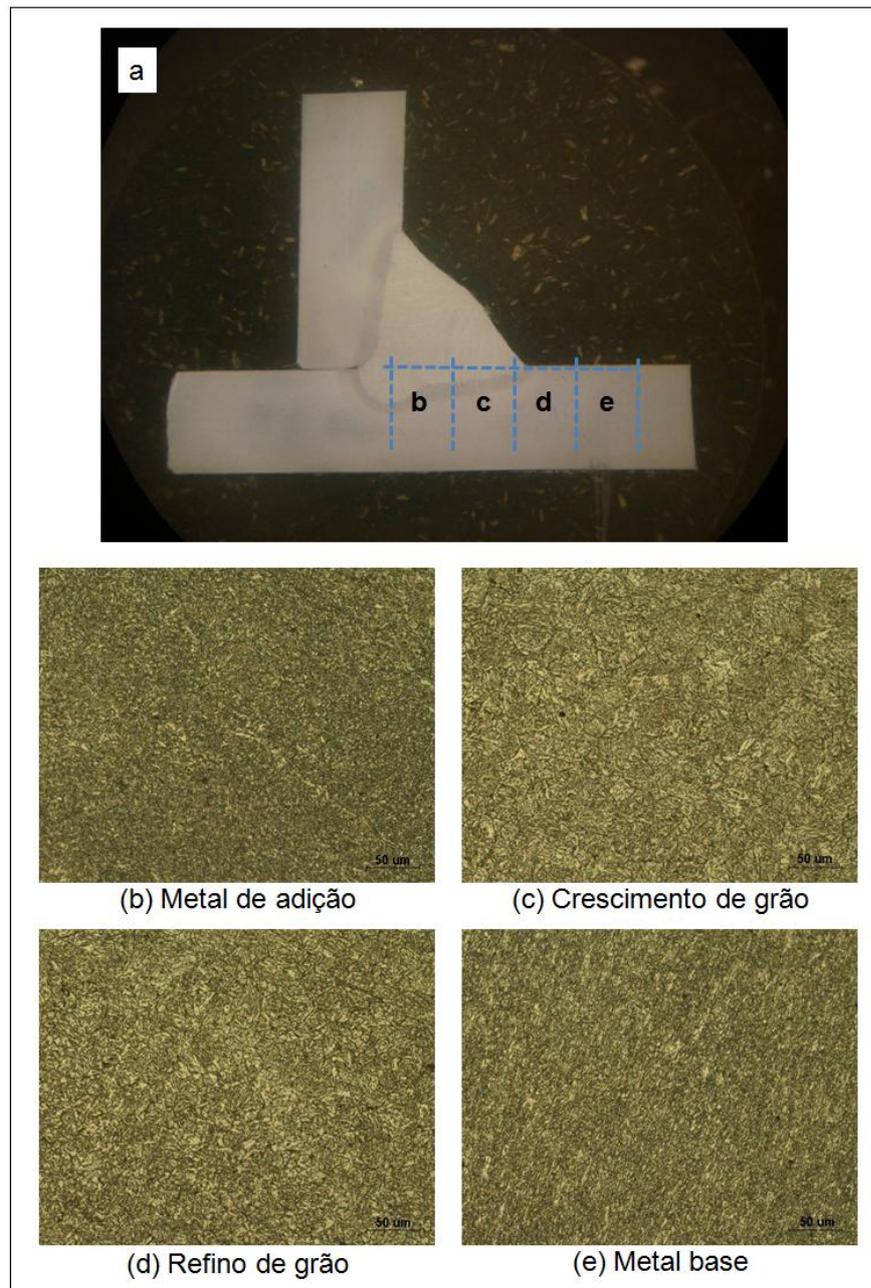


Figura 15: (a) Macrografia da junta soldada (b) microestrutura do metal de adição (c) microestrutura da zona de crescimento de grão (d) microestrutura da zona de refino de grão (e) microestrutura do metal de base.

Com nível de confiabilidade de 95%, pode-se dizer que os três fatores analisados tiveram influência significativa sobre as dimensões da ZAC, pois, o valor de probabilidade P foi menor que 0,05. Da mesma forma, as variáveis que tiveram maior influência sobre a ZAC são determinadas pelos valores de F, ou seja, quanto maior o valor de F maior será a influência do mesmo sobre o critério da ZAC. Assim,

os fatores de maior influência respectivamente foram tensão, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame (Tabela 9).

Tabela 9
Análise de variância para a zona afetada pelo calor.

Fonte	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Médias dos Quadrados	Valor de F	Valor de P
Tensão	189,4450	2	94,72252	409,1171	0,000000
Velocidade de soldagem	27,1017	2	13,55087	58,5277	0,000000
Velocidade do arame	15,2130	2	7,60650	32,8533	0,000000
Resíduo	4,6306	20	0,23153	****	****

Para uma melhor análise dos efeitos dos parâmetros de processo sobre a ZAC foram plotados gráficos, os quais permitiram visualizar a influência destes parâmetros sobre o efeito do critério analisado.

A Figura 16 apresenta a área média da ZAC em função da tensão. O tamanho da ZAC teve significativo aumento quando houve o aumento da tensão.

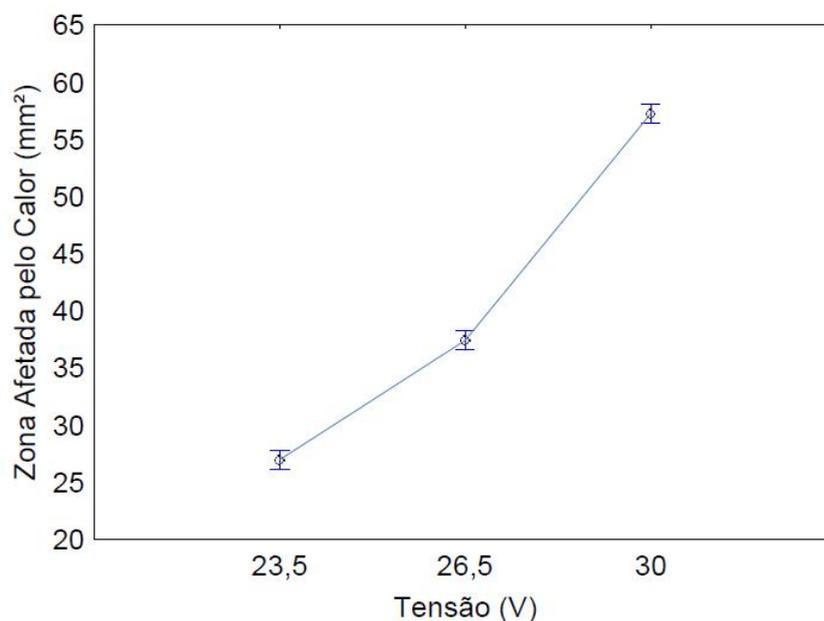


Figura 16: Área da ZAC em função da tensão.

A área da ZAC em função da velocidade de soldagem mostrou que, em média, a área da ZAC diminuiu com o aumento da velocidade de soldagem, conforme pode ser verificado através da Figura 17. Assim, para menor ZAC, a velocidade de soldagem 10 mm/s apresenta melhores resultados.

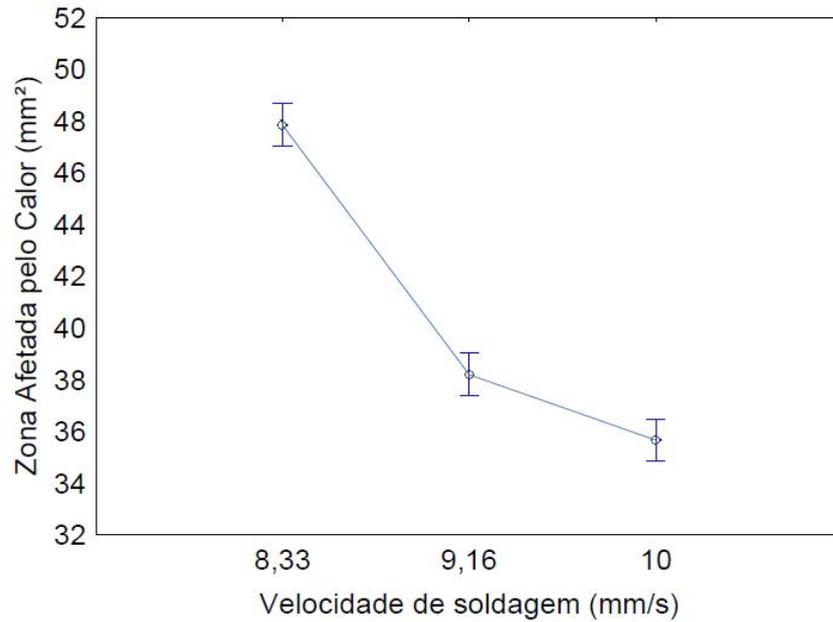


Figura 17: Área da ZAC em função da velocidade de soldagem.

Já a relação da área da ZAC em função da velocidade do arame mostrou menor influência dentre os três parâmetros de processo variados, conforme Figura 18. A área da ZAC aumentou com o aumento da velocidade do arame. Para tanto, menores áreas de ZAC serão obtidas quando utilizado velocidade do arame 12,6 m/min.

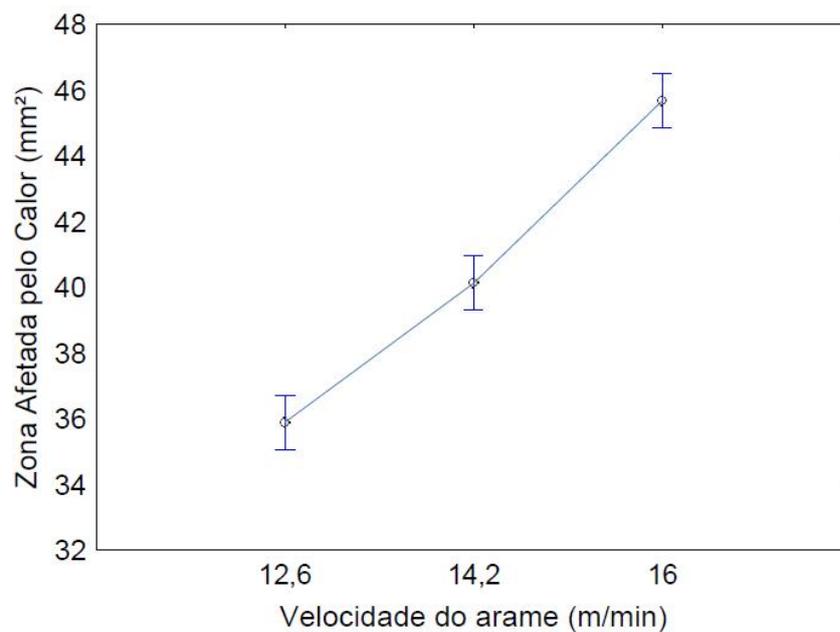


Figura 18: Área da ZAC em função da velocidade do arame.

Com a razão sinal-ruído para a área da ZAC, pode-se afirmar com confiabilidade de 95% que os três parâmetros de processo (tensão, a velocidade de soldagem e a velocidade de alimentação do arame) são fatores de influência para a área da ZAC, sendo para isso a razão S/N menor é melhor, conforme pode ser verificado através da Figura 19. A maior qualidade no resultado da soldagem perante a área da ZAC será obtida através da tensão 23,5 V, velocidade de soldagem 10 mm/s e velocidade do arame 12,6 m/min forem escolhidas.

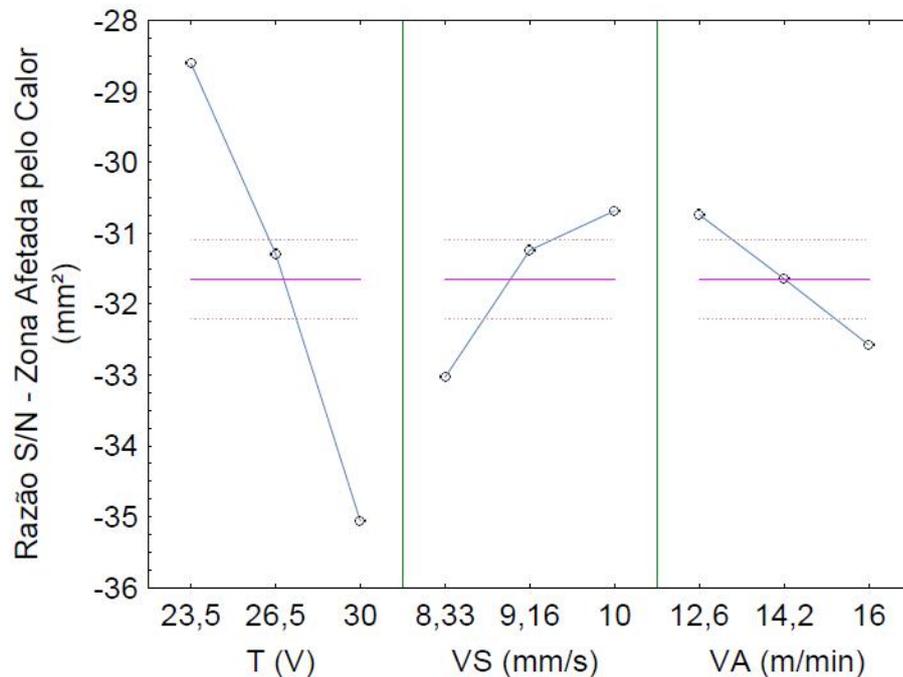


Figura 19: Razão S/N da área da ZAC para os fatores analisados.

O novo corpo de prova para validação com os parâmetros de processo tensão 23,5 V, velocidade de soldagem 10 mm/s e velocidade do arame 12,6 m/min mostrou menor área de ZAC, tendo o valor de 22 mm², conforme pode ser verificado através da Figura 20.

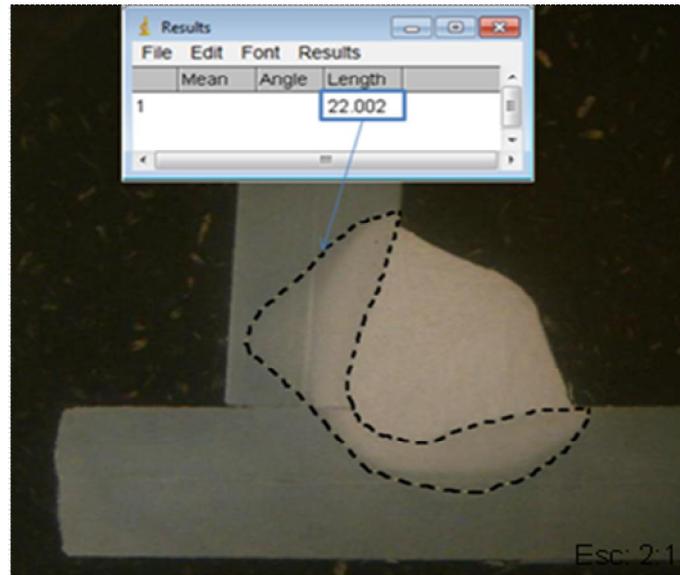


Figura 20: Validação da zona afetada pelo calor.

A realização do corpo de prova para validação, proporcionou a comprovação da relação expressa pela razão sinal ruído tendo a condição menor é melhor.

4.3 CONVEXIDADE

A Figura 21 ilustra a mensuração do critério de qualidade convexidade sobre uma junta soldada. A convexidade sofreu significativas variações, apresentando valores entre 0,39 a 1,54 mm, conforme pode ser verificado através da Tabela 4

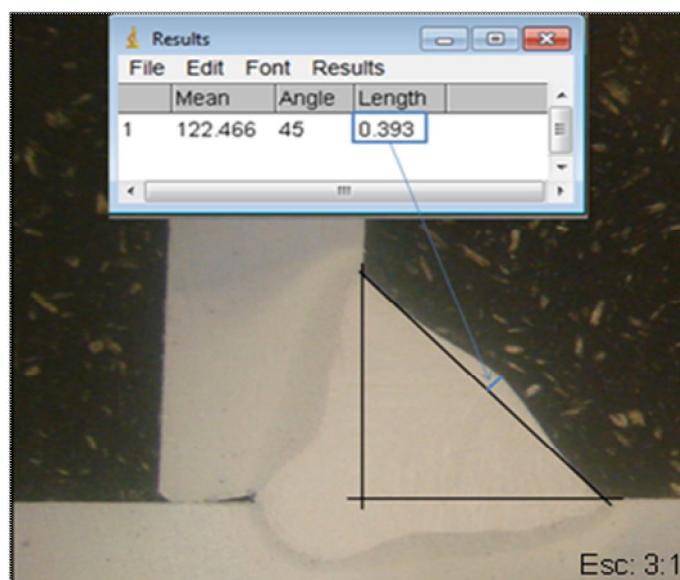


Figura 21: Mensuração da convexidade.

A análise de variância mostrou resultado com nível de confiabilidade de 95% para o fator tensão e velocidade de soldagem sobre a convexidade. Através desta análise, observou-se que o valor de probabilidade P foi menor que 0,05 e, conseqüentemente, pode-se dizer que estas variáveis tiveram influência significativa sobre a convexidade. Da mesma forma, as variáveis que tiveram maior influência sobre a convexidade são determinadas pelos valores de F, ou seja, quanto maior o valor de F maior será a influência do mesmo sobre o critério da convexidade. Assim, os fatores de maior influência respectivamente foram tensão, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame, conforme pode ser verificado através da Tabela 10.

Tabela 10
Análise de variância para a convexidade.

Fonte	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Médias dos Quadrados	Valor de F	Valor de P
Tensão	434,3106	2	217,1553	63,10567	0,000000
Velocidade de soldagem	37,9313	2	18,9657	5,51145	0,012402
Velocidade do arame	14,4389	2	7,2195	2,09798	0,148892
Resíduo	68,8227	20	3,4411	****	****

Para uma melhor análise dos efeitos dos parâmetros de processo sobre a convexidade foram plotados gráficos, os quais permitiram visualizar a influência destes parâmetros sobre o efeito do critério analisado.

A Figura 22 apresenta os resultados de convexidade em função da tensão. Percebe-se considerável influência da tensão sobre os resultados de convexidade. A convexidade, em média, sofreu significativa redução com o aumento da tensão. Assim, a tensão 30 V apresenta melhores resultados para menor convexidade.

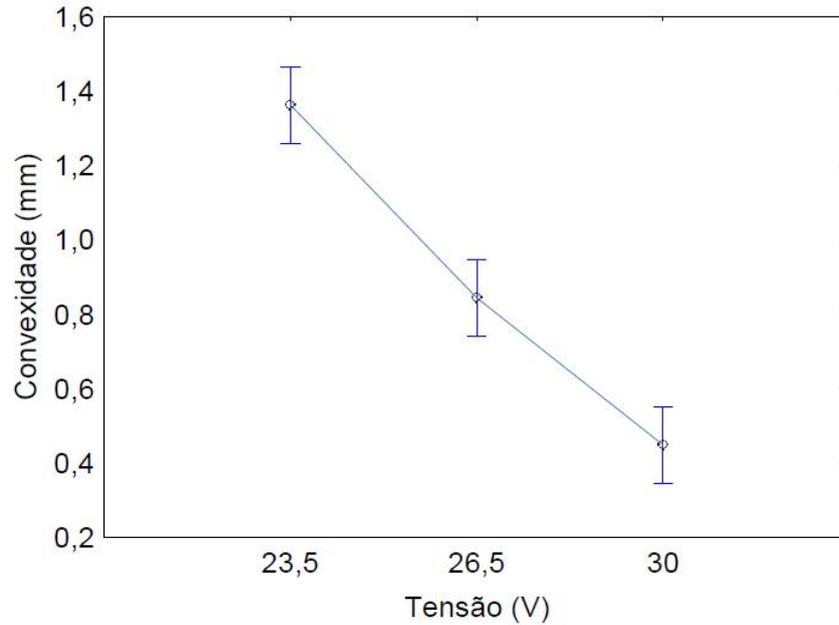


Figura 22: Convexidade em função da tensão.

A convexidade em função da velocidade de soldagem mostrou influência, porém de forma menos significativa, conforme Figura 23. Os valores mostram que, melhores resultados para a convexidade serão obtidos quando utilizada velocidade de soldagem de 10 mm/s.

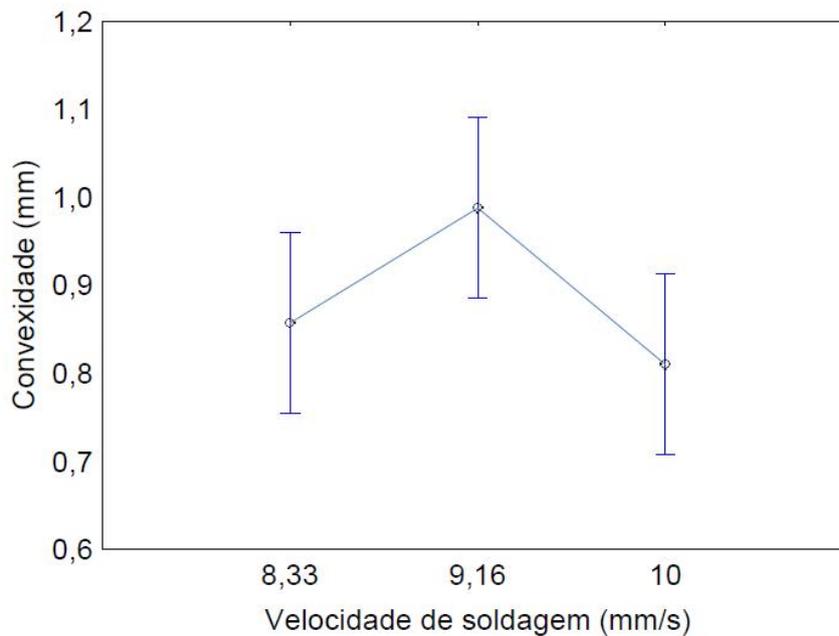


Figura 23: Convexidade em função da velocidade de soldagem.

Através da análise da convexidade em função da velocidade de alimentação do arame é possível verificar que a relação é menos determinante para resultados

de convexidade, conforme pode ser verificado através da Figura 24. Em média, a convexidade aumentou quando houve aumento da velocidade de alimentação do arame e corrente. Ainda, para melhores resultados de convexidade é aconselhável a utilização de velocidade de alimentação do arame 12,6 m/min.

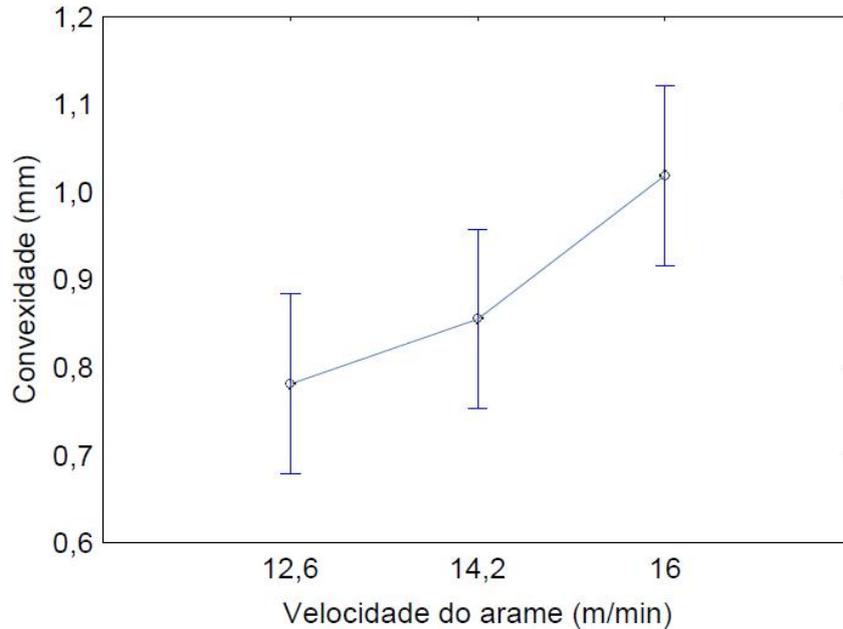


Figura 24: Convexidade em função da velocidade do arame.

Com a razão sinal-ruído para a convexidade, pode-se afirmar com confiabilidade de 95% que a tensão e a velocidade de soldagem são os fatores de maior influência para a convexidade, sendo para isso a razão S/N menor é melhor, conforme Figura 25. A maior qualidade no resultado da soldagem perante a convexidade será obtida através da tensão 30 V, velocidade de soldagem 10 mm/s e velocidade de alimentação do arame 12,6 m/min.

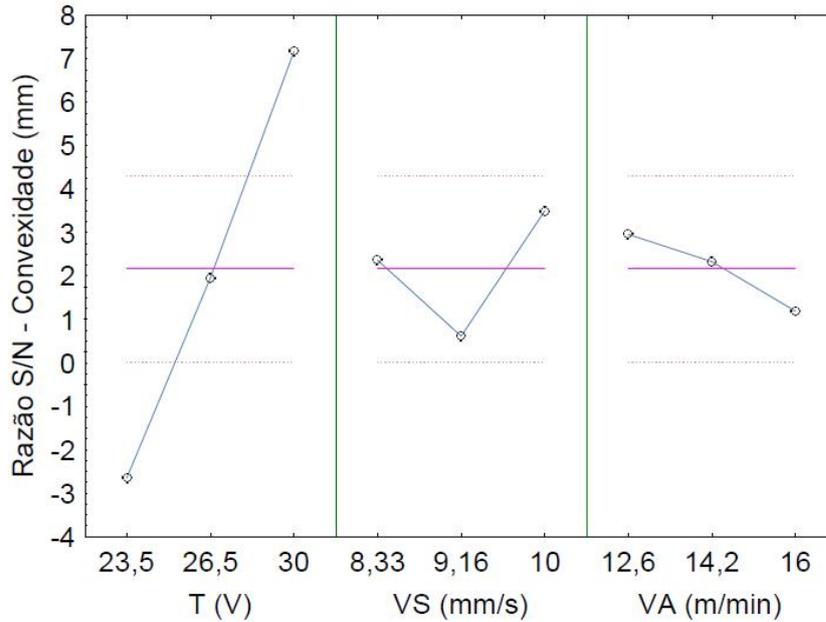


Figura 25: Razão S/N da largura da convexidade para os fatores analisados.

O novo corpo de prova para validação da convexidade através da utilização dos parâmetros tensão 30 V, velocidade de soldagem 10 mm/s e velocidade de alimentação do arame 12,6 m/min. mostrou valor de 0,38 mm, conforme Figura 26.

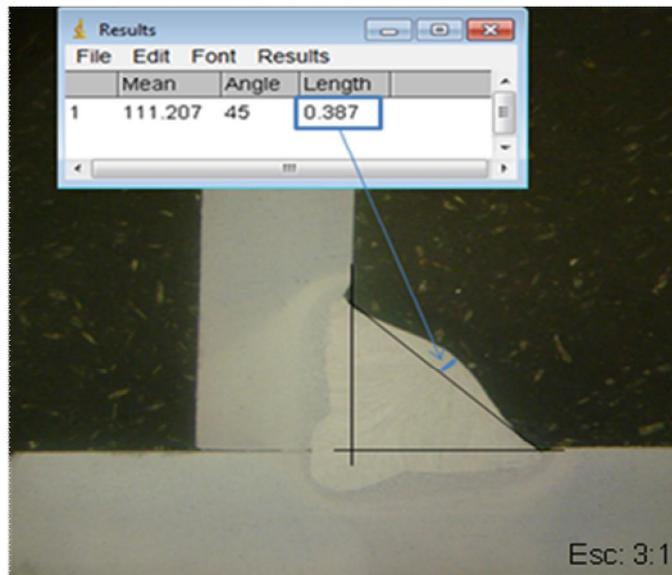


Figura 26: Validação da convexidade.

A realização do corpo de prova para validação mostrou pequena convexidade, proporcionando a comprovação da relação expressa pela razão sinal ruído tendo a condição menor é melhor.

4.4 GARGANTA TEÓRICA E PERNAS

A análise da garganta teórica revelou que os valores encontrados ficaram entre 3,52 a 4,68 mm, conforme pode ser verificado através da Figura 27 (a). Estes valores condizem com resultados aceitáveis para a soldagem realizada.

A análise das pernas mostrou que a perna 1 teve valores entre 4,95 a 7,19 mm, já a perna 2 resultou valores entre 4,87 a 6,19 mm e pode ser verificado através da Figura 27 (b). Todos os valores representaram tamanhos de pernas aceitáveis.

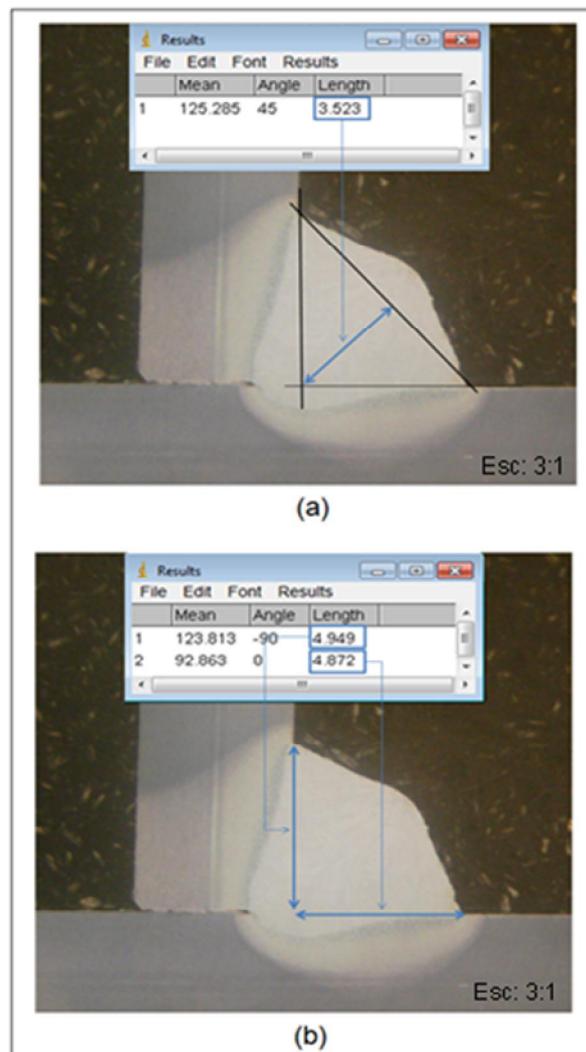


Figura 27: (a) Mensuração da garganta teórica (b) e mensuração de pernas.

Contudo, a análise de variância sobre a garganta teórica e pernas mostrou que o valor de probabilidade P foi maior que 0,05 apresentando valores médios de 0,25, assim expressando baixa confiabilidade nos resultados. Quanto a influência das variáveis nestas dimensões nada pode-se afirmar.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com a caracterização da soldagem MAG robotizada do aço de alta resistência LNE 700, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

Foi realizada a soldagem de filete, junta tipo “T” em chapas do LNE 700 através da soldagem MAG robotizada.

Os melhores parâmetros para soldagem do aço de alta resistência LNE 700, atendendo cada critério de qualidade ZAC e convexidade, foram determinados. O método Taguchi mostrou ser uma importante ferramenta para o projeto de experimento bem como para a análise estatística voltada à validação de um processo produtivo, principalmente quando há um grande número de variáveis envolvidas e qualquer modificação nos fatores de entrada geram consideráveis alterações nos resultados finais da junta soldada.

As análises realizadas comprovaram a influência dos parâmetros de processo na qualidade da soldagem MAG robotizada do aço de alta resistência LNE 700, ainda que em alguns casos as diferenças encontradas em função dos níveis foram de certa forma sutis.

O perfil de microdureza apresentou valores que condizem com o tipo de material estudado. A utilização de metal de adição com características de resistência ao escoamento semelhante ao metal de base proporcionaram pouca variação, em média na dureza da junta soldada. Os diferentes parâmetros de processo utilizados proporcionaram variações no tamanho da região de menor dureza da ZAC, sendo perceptível que maiores tensões proporcionaram maiores áreas de menor dureza. Os valores de energia de soldagem em cada corpo de prova foram diferentes, porém não foram identificadas descontinuidades decorrentes destas diferentes energias de soldagem.

Os três parâmetros de processo (tensão, velocidade de soldagem e velocidade do arame) apresentaram influência significativa, com intervalo de confiança de 95% sobre o resultado da ZAC.

Foi possível detectar uma forte relação da convexidade com a tensão, onde uma maior tensão resultou em menor convexidade da junta soldada. Dentre os três parâmetros de processo (tensão, velocidade de soldagem e velocidade do arame), a tensão e a velocidade de soldagem apresentaram influência significativa, com intervalo de confiança de 95% sobre os resultados.

A garganta teórica e as pernas apresentaram resultados aceitáveis quanto aos seus valores. Os critérios de qualidade garganta teórica e pernas são menos vulneráveis a estarem em desacordo com as especificações quando comparados com os critérios ZAC e convexidade.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e visando a continuidade da pesquisa, apresentam-se as seguintes propostas de trabalhos futuros:

1) Aplicar a proposta de experimentos apresentada neste trabalho utilizando outras configurações para a soldagem MAG robotizada, sendo uma delas a variação na composição de gás;

2) Analisar o comportamento dos critérios de qualidade descritos neste trabalho através de novos experimentos com o mesmo aço, porém com espessuras diferentes;

3) Estudar o comportamento da soldagem do aço LNE 700 com relação a outros critérios de qualidade, tais como resistência a tração e fadiga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, V. J. **Desenvolvimento de envelopes operacionais para processo MIG/MAG robotizado com diferentes gases de proteção.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica / Minas, Metalúrgica e Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ARCELORMITTAL. **Welding – Steel Solution.** 2010.

AWS. **Welding Handbook. v. 2: Welding Process,** 7 ed. *International Standard Book Number.* 07842b5 0014731-3. American Welding Society. 550 N. W. LeJeune Rd., P. O. Box 351040, Miami, FL 33135, 1991.

_____. **Welding Handbook v. 1: Welding Science & Technology.** 9 ed. *International Standard Book Number.* 08456b6 0016831-2. American Welding Society. 550N. W. LeJeune Rd., P. O. Box 351040, Miami, FL 33135, 2001.

_____. AWS D1.1/D1.1M. **Structural Welding Code – Steel,** 2004.

BARBOSA, R. P. **Tecnologia Mecânica: metalurgia da soldagem, soldabilidade dos materiais.** Minas Gerais: Editado pelo autor, 2007.

BARROS, M. R. A. **Estudo da automação de células de manufatura para montagens e soldagem industrial de carrocerias automotivas,** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BRACARENSE, A. Q.; FELIZARDO, I. **Soldagem robotizada,** 2008.

BRANDI, S. D. Processo MIG/MAG. In: BRANDI, S. D.; WAINER E.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e metalurgia.** 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2004. p. 99-132.

BUTTON, Sérgio T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados.** Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

DIN EN 1043-1. **Hardness testing of welds in metallic materials,** 1995.

DIN EN 10149-2. **Hot-rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming – Part 2: Delivery conditions for thermo mechanically rolled steels,** 2009.

ESAB. **Soldagem MIG/MAG.** São Paulo: ESAB Soldagem e Corte, 2004. (Relatório técnico de soldagem)

_____. **OK AristoRod™ Welders love it and so do robots.** Göteborg: ESAB *Wires to Weld with Robots,* 2010. (Relatório técnico de especificações de arames).

FREIRE Jr., R. C. S. **Influência dos parâmetros de soldagem na formação de trincas a frio em juntas soldadas de aços ARBL.** 1998. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro de Ciências E Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 1998.

FILHO, C. A. **Metalurgia da soldagem**. Belém: Editado pelo autor, 2008.

KRÍZ, A; ZAJÍCEK, M. **Impact of welding process on mechanical properties of domex 700MS steel and comparison of welded joint of S355NJ structural steel**. Trabalho apresentado no Metal 2011, Brno, 2011.

LIAO. M. T.; CHEN, W. J. **The effect of shielding gas compositions on the microstructure and mechanical properties of stainless steel weldments**. *Materials chemistry and physics*, Huwei: Elsevier. v. 55, p. 145-151, mar. 1998.

MODENESI, P. J. **Soldagem I: Descontinuidades e inspeção em juntas soldadas**. Belo Horizonte: Editado pelo autor, 2001.

_____. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte: Editado pelo autor, 2008.

MOITA, N. F. V. C. **Implementação do método Taguchi e análise de experiências na fase de testes de moldes para injeção de plásticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica, Lisboa, 2007.

NILO Jr., L. P. N. **Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

QUITES, A. M. **Introdução à soldagem a arco voltaico**. Florianópolis: Soldasoft, 2002.

SSAB. **Sheet Steel Joining Handbook. Joining of high strength steels**, New York: Tunplatt AB, 2004.

_____. **Welding of Domex and Docol advanced high strength steels**. Stockholm: SSAB, 2009.

USIMINAS. **Certificado de inspeção**. São Paulo, 2011. (Homologação do aço LNE 700).