



Marcelo Rodrigo Schons

**ESTUDO DA DISTORÇÃO NA SOLDAGEM MAG
ROBOTIZADA EM CHAPAS DE AÇO DOMEX 700 COM
ESPESSURA DE 6,35MM**

Horizontina

2015

Marcelo Rodrigo Schons

**ESTUDO DA DISTORÇÃO NA SOLDAGEM MAG ROBOTIZADA EM
CHAPAS DE AÇO DOMEX 700 COM ESPESSURA DE 6,35MM**

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: Richard Thomas Lermen, Dr.

Horizontina

2015

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“Estudo da distorção na soldagem MAG Robotizada em chapas de aço
DOMEX 700 com espessura de 6,35mm”**

Elaborada por:

Marcelo Rodrigo Schons

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

**Aprovado em: 24/11/2015
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Prof. Esp. Valmir Vilson Beck
FAHOR – Faculdade Horizontalina**

**Prof. Me. Valtair de Jesus Alves
FAHOR – Faculdade Horizontalina**

**Horizontalina
2015**

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Jaime e Marilene, pelo incentivo e motivação que demonstraram em todos os momentos.

A minha namorada Fernanda, que me apoiou e incentivou, ajudando durante a graduação.

Ao professor orientador, Dr. Richard T. Lermen, pela dedicação e ensinamento durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de empresa e amigos, que prestaram grande suporte durante a realização deste trabalho.

“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado”.

Roberto Shinyashiki

RESUMO

O interesse das indústrias em expandir o controle sobre as distorções provocadas durante o processo de soldagem de aços de alta resistência, se dá pelo fato de que as tolerâncias geométricas e dimensionais estão cada vez mais rigorosas nos projetos. Isto instiga as engenharias de manufatura a desenvolver em processos estáveis para atender a rotina de produção. Este trabalho teve como objetivo analisar a influência de diferentes parâmetros sobre a distorção ocorrida durante a soldagem robotizada dos aços DOMEX 700. Os testes experimentais de soldagem foram realizados de acordo com o projeto de experimentos, o qual segue a metodologia estatística de Taguchi. Neste projeto, foi utilizado a matriz L36 contendo cinco fatores, sendo o sentido de deslocamento da tocha de soldagem, o tipo de tecimento, a frequência do tecimento, a utilização de fixação durante a soldagem e o sentido de laminação da chapa, três desses fatores possuem dois níveis e outros dois fatores possuem três níveis. Para a soldagem, foram utilizadas chapas de aço DOMEX 700, as quais foram unidas através do processo de soldagem robotizada MAG. Os corpos de prova foram medidos em uma máquina de medição tridimensional antes e após a soldagem, em quatro regiões específicas. Os fatores determinantes que influenciaram nas distorções obtidas, foram o sentido de deslocamento da tocha e a utilização de fixação dos componentes durante a soldagem.

Palavras-chaves:

Distorção - soldagem robotizada – DOMEX 700

ABSTRACT

The interest of industries in expanding control over the distortions caused during the welding process of high-strength steels, is given by the fact that the geometric and dimensional tolerances are increasingly stringent in the projects. This instigates the manufacturing engineering to develop stable processes to meet the routine production. This work aims to analyze the influence of different parameters on the distortion occurred during robotic welding of steel DOMEX 700. The experimental welding tests were carried out according to the experiment design, which follows the statistical methodology of Taguchi. In this design was used to L36 array containing five factors, and the welding displacement direction, the type of weaving, the frequency of damping, the use of fixing during welding and the direction of the plate laminating three of these factors have two levels and two other factors have three levels. For the welding of steel sheets were used DOMEX 700 which were joined by the robotic MAG welding process. The samples were measured in a three-dimensional measuring machine before and after welding in four specific regions. The determining factors that influenced the obtained distortions were the torch moving direction and the use of clamping components during soldering.

Keywords:

Distortion - Robot welding - DOMEX 700

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desenvolvimento de aços avançados de alta resistência.....	13
Figura 2: Forma de onda da corrente no processo MAG Pulsado.....	15
Figura 3: Formas de ataque e deslocamento.....	17
Figura 4: Padrões de tecimento do arame.....	18
Figura 5: Variações geométricas e dimensionais.....	22
Figura 6: Pontos de medição.....	26
Figura 7: Forma de medição.....	27
Figura 8: Célula de soldagem utilizado.....	29
Figura 9: Dispositivo de soldagem fixado à mesa.....	29
Figura 10: Máquina de medição tridimensional.....	30
Figura 11: Efeitos dos parâmetros sobre a distorção na linha 1.....	32
Figura 12: Gráficos da razão S/N sobre a distorção na linha 1.....	33
Figura 13: Efeitos dos parâmetros sobre a distorção na linha 2.....	34
Figura 14: Gráficos da razão S/N sobre a distorção na linha 2.....	35
Figura 15: Efeitos dos parâmetros sobre a distorção na linha 3.....	36
Figura 16: Gráficos da razão S/N sobre a distorção na linha 3.....	37
Figura 17: Efeitos dos parâmetros sobre a distorção linha 4.....	38
Figura 18 Gráficos da razão S/N sobre a distorção na linha 4.....	39
Figura 19: Corpo de prova 17.....	40
Figura 20: Corpo de prova 28.....	40
Figura 21: Corpo de prova 22.....	41
Figura 22: Corpo de prova 29.....	41
Figura 23: Corpo de prova 7.....	42
Figura 24: Corpo de prova 10.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Projeto de Experimentos.....	24
Tabela 2 - Parâmetros de soldagem.....	25
Tabela 3 - Análise da variância para a distorção na soldagem Linha 1.....	31
Tabela 4 - Análise da variância para a distorção na soldagem Linha 2.....	33
Tabela 5 - Análise da variância para a distorção na soldagem Linha 3.....	35
Tabela 6 - Análise da variância para a distorção na soldagem Linha 3.....	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA	11
1.2 OBJETIVOS	11
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1 AÇOS DE ALTA RESISTENCIA E BAIXA LIGA.....	13
2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM MAG ROBOTIZADO	14
2.3 ARCO PULSADO	14
2.4 GÁS DE PROTEÇÃO.....	16
2.5 SENTIDO DE DESLOCAMENTO DA TOCHA	16
2.6 TECIMENTO	17
2.7 FREQUÊNCIA DO TECIMENTO.....	19
2.8 SENTIDO DE LAMINAÇÃO	19
2.9 DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO.....	20
2.10 DISTORÇÕES ANGULARES	20
2.11 METODOLOGIA TAGUCHI.....	23
3 METODOLOGIA	24
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS.....	24
3.1.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	25
3.1.2 IDENTIFICAÇÃO DO SENTIDO DE LAMINAÇÃO.....	26
3.1.3 MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA	26
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	28
3.2.1 MATERIAL BASE	28
3.2.2 CÉLULA DE SOLDAGEM	28
3.2.3 DISPOSITIVO DE SOLDAGEM	29
3.2.4 EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO.....	30
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	31
4.1 ANÁLISE DE DISTORÇÃO LINHA 1	31
4.2 ANÁLISE DE DISTORÇÃO LINHA 2	33
4.3 ANÁLISE DE DISTORÇÃO LINHA 3	35
4.4 ANÁLISE DE DISTORÇÃO LINHA 4	37
4.5 ANÁLISE DE DISTORÇÃO 3D	40
5 CONCLUSÕES	43
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
APÊNDICE A – AMPLITUDES DAS LINHAS.....	47

1. INTRODUÇÃO

Em função da crescente demanda e do avanço tecnológico, as indústrias, especificamente do ramo metal/mecânico, estão cada vez mais, trabalhando para reduzir seus custos e aumentar a sua capacidade produtiva, assegurando qualidade e segurança de seus produtos. De modo a aumentar a produtividade, garantindo a qualidade, os departamentos de engenharia estão desenvolvendo novos materiais e aprimorando os seus processos de fabricação, tornando estes processos mais confiáveis e produtivos.

Além da redução do custo do processo de fabricação, é intuito das empresas reduzir o consumo de energia de trabalho de seus produtos, e por este motivo é que se faz necessária a busca contínua de novos materiais, que sejam capazes de apresentar alta qualidade metalúrgica, como é o caso dos aços ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga).

Nos últimos anos, a indústria vem aplicando este material em componentes estruturais, devido a relação de resistência/peso e por apresentar uma boa soldabilidade e conformabilidade, podendo-se reduzir consideravelmente a espessura das chapas metálicas. Dessa maneira, atingem os mesmos resultados exigidos, com redução do peso do produto final.

Para a confecção de produtos estruturais, a soldagem se destaca, por ser um processo especial e que demanda rigoroso controle, desde a qualificação dos procedimentos e operadores, até o controle geométrico e dimensional, todos visando a qualidade do produto final especificado em projeto.

Por ser necessário que as empresas intensifiquem o controle sobre seus processos produtivos, o ideal é encontrar a maneira mais adequada de gerenciar cada processo. No processo de soldagem, que trabalha com altas temperaturas, o produto acaba apresentando deformações que muitas vezes, não são previstas na fase de projeto. Com a evolução dos softwares de desenhos, começou-se a desenvolver nos projetos geometrias mais complexas, que vieram a exigir tolerâncias geométricas mais justas. Sendo assim, por consequência, os setores de engenharia de processo e manufatura são instigados a cada vez desenvolver processos mais confiáveis e estáveis.

A maioria dos processos de soldagem opera com aquecimentos intensos e localizados, onde a temperatura atinge entre 2.000 e 20.000°C. Devido às altas temperaturas ocorre dilatação nas juntas soldadas, onde faz-se a adição do material

base que forma a solda pela fusão e solidificação da junta. Este fato se dá pela concentração de uma alta intensidade de energia, a qual ocasiona tensões e deformações plásticas, que por sua vez, alteram as estruturas dos materiais e, conseqüentemente, ocorrem distorções e deformações angulares. O fenômeno de distorções e tensões residuais durante o processo de soldagem está sendo alvo de estudos ao longo do tempo, verificando-se que uma série de problemas quando há a presença destes fenômenos, tais como, a ocorrência de fratura frágil e variabilidade dimensional.

Nas indústrias, surge a necessidade de elevar o controle das distorções nos processos de soldagem, com a finalidade de evitar problemas durante a montagem de conjuntos soldados em linha de produção. A fim de atingir os padrões exigidos, a confecção de dispositivos de solda e sequências de soldagem são os procedimentos mais usuais. Nos roteiros operacionais de fabricação, não é rotina ou hábito, especificar características técnicas como o sentido de laminação das chapas para corte, tipos de tecimento e sentido de avanço da tocha de soldagem. Sobre tais características, são poucos os estudos de comportamento, e reais influências de cada uma delas sobre às distorções em aços de alta resistência e baixa liga (ARBL).

1.1 JUSTIFICATIVA

Como resultado da globalização, a competitividade entre as empresas está aumentando cada vez mais, e como consequência disto, intensifica-se a procura por processos de soldagem que garantam a qualidade, e ainda apresentem alta produtividade e confiabilidade ao processo.

Visto que, as tolerâncias geométricas e dimensionais dos projetos estão cada vez mais rigorosas, é necessário aprimorar o sistema de controle sobre as deformações provocadas no processo de soldagem. Através deste estudo, busca-se detectar as variáveis de soldagem, que interferem na distorção angular no material DOMEX 700.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho foi analisar o comportamento dimensional de um aço de Alta Resistencia, o DOMEX 700, aplicando diferentes procedimentos de soldagem, em soldagem robotizada. O estudo foi realizado aplicando-se dois ângulos de soldagem, dois sentidos de laminação, dois tipos de fixação, três tipos de tecimento e três frequências no tecimento, situações apresentadas no programa experimental.

A partir disso, buscou-se identificar qual combinação de variáveis apresentou melhor desempenho, ou seja, aquela que aponta a menor deformação angular. Com base no melhor processo identificado, buscou-se o maior controle das deformações provocadas pela soldagem. Utilizando este objetivo como princípio, apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar cordões de solda em juntas de tipo plana, utilizando corpos de prova de aço DOMEX 700, com chapa de espessura 6,35 mm;
- Medir as chapas previamente à soldagem, para verificar a real deformação exercida pela solda, desconsiderando as deformações ocorridas do processo de laminação e corte;
- Realizar um projeto experimental, alternando os parâmetros de solda como: tecimento, frequência do tecimento, fixação, sentido de deslocamento da tocha de soldagem e sentido de laminação da chapa, a fim de encontrar os melhores parâmetros para uma menor deformação;
- Analisar, a influência dos parâmetros de entrada sobre a distorção.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura consiste em descrever os fundamentos referentes a distorção angular em aços de alta resistência e baixa liga na soldagem MIG/MAG robotizada.

2.1 AÇOS DE ALTA RESISTENCIA E BAIXA LIGA

Com o contínuo avanço tecnológico e a necessidade de implantar bens de consumo duráveis para o homem, exige-se o desenvolvimento de materiais que apresentem custos reduzidos, que atendam desempenho equivalente e requisitos mecânicos, físicos e químicos necessários para variadas aplicações, e a Figura 1 mostra o desenvolvimento nas últimas décadas (GORNÍ,2008).

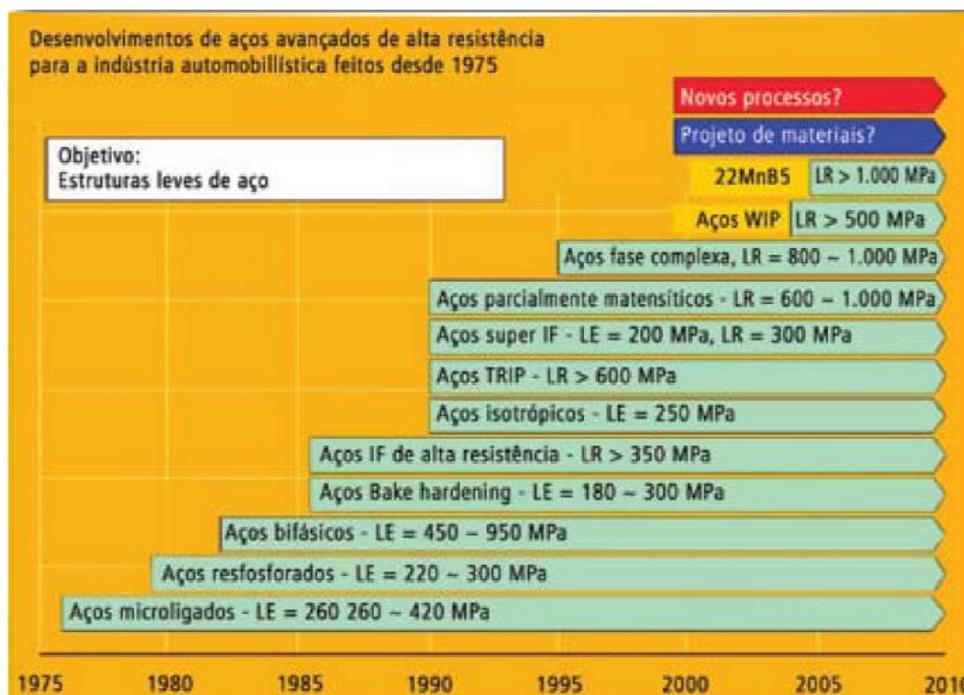


Figura 1: Desenvolvimento de aços avançados de alta resistência. Fonte: GORNÍ, 2008.

A fabricação de aços destinados à produção de componentes menos densos, ou seja, que utiliza menor quantidade de material, proporcionando níveis satisfatórios de resistência, tornou-se um fator determinante e a partir desta necessidade, surgiram os Aços de Alta Resistência e Baixa Liga – ARBL (“*High Strength Low Alloy*” – HSLA), que apresentam micro-adições de nióbio, titânio e vanádio, contendo uma microestrutura ferrítica-perlítica mais refinada e com capacidade de endurecimento por precipitação, o que lhe proporciona maior nível de resistência mecânica (GORNÍ, 2008).

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM MAG ROBOTIZADO

Segundo Alves (2009), a automação e robótica nas indústrias começou aproximadamente nos últimos 30 anos, e houve uma evolução ascendente desde o seu princípio. Os robôs são utilizados em vários processos de soldagem, como na solda ponto, soldagem a arco com proteção gasosa MAG e soldagem a LASER. O crescimento da robótica está diretamente relacionado com os seguintes fatores: ausência de mão de obra qualificada; controle dos processos; aumento de produção; custo de produção e altos padrões de qualidade.

Para Perez (2007), o processo de soldagem robotizado MIG/MAG é um processo de soldagem automático, pois o metal de adição é alimentado de forma contínua por um cabeçote e o robô faz o controle de posicionamento e velocidade da tocha durante o processo de soldagem, garantindo assim as variáveis previamente programadas como a velocidade da soldagem, tecimento, posição da tocha e o “stick-out”.

O processo de soldagem mais utilizado no processo robotizado nas indústrias, é o MAG com eletrodo sólido, contínuo, sob proteção gasosa. Neste processo, o metal base e o metal de adição são aquecidos pelo arco elétrico, sendo que o fornecimento é de forma contínua, sendo assim há a fusão e a distribuição do metal base de solda através da tocha pelo robô sobre a junta soldada. Para o processo de soldagem MAG é necessária uma fonte de energia de soldagem com tensão constante, um alimentador de arame conectado a uma fonte de controle de velocidade, um sistema de gás e uma tocha (BARROS, 2006).

Segundo Perez (2007), os principais equipamentos do sistema de soldagem robotizado são: a fonte de energia, o manipulador ou robô de soldagem com sua unidade de controle e programação, a unidade de alimentação do arame de soldagem, a tocha de soldagem e sua unidade de refrigeração.

2.3 ARCO PULSADO

A soldagem com arco pulsado se caracteriza pelas transferências globular, que tem baixa corrente, e o spray, por apresentar alta produtividade. O processo tem sido fonte de inúmeros estudos, os quais visam melhorar a produtividade e a qualidade do processo (SANTOS, 2009).

De acordo com Bracarense (2008), a transferência é projetada por spray que se caracteriza pela diminuição do diâmetro da gota até o estrangulamento na ponta

do arame. O arco pulsado é composto de dois níveis de corrente, a corrente de base, que é o baixo nível, e tem a função de manter o arco e aquecer o arame, a corrente de pico, que é o nível mais alto e responsável por gerar a energia necessária para soltar a gota do arame e projetá-la através do arco. Este processo apresenta baixo nível de respingo de solda, podendo ser aplicado em todas as posições de soldagem e todas as espessuras de material.

SANTOS (2009) destaca que, no modo pulsado a corrente média e a frequência da transferência podem ser manipuladas, produzindo assim uma gota menor, tornando o processo mais adequado para a soldagem fora de posição. Com condição de corrente pulsada o processo MAG é otimizado das seguintes maneiras:

- Possibilita a soldagem em todas as posições;
- Reduz o nível de respingo em comparação ao curto-circuito;
- Aumenta a velocidade de soldagem em aproximadamente 35% em relação ao curto circuito;
- Diminui a distorção quando comparado a transferência goticular, em função da introdução de menor energia;
- Otimiza a aparência do cordão de solda e reduz a taxa de geração de fumos.

Segundo AWS (1991, apud Santos, 2009, p. 17) a soldagem por arco pulsado é evidenciada em forma de onda, e descrita em quatro grandezas, I_p (corrente de pulso), t_p (tempo de pulso), I_b (corrente de base) e t_b (tempo de base), conforme verifica-se na Figura 2.

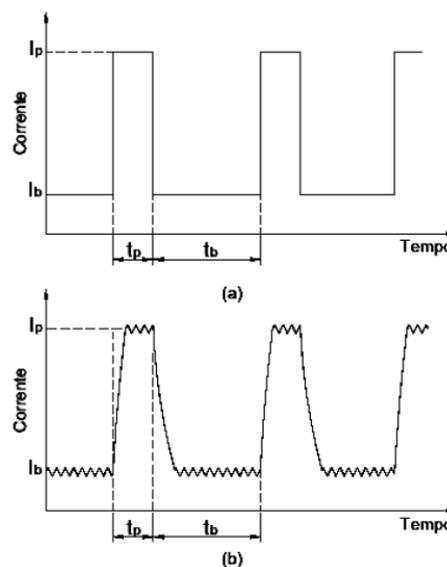


Figura 2: Forma de onda da corrente no processo MAG Pulsado: (a) Idealizada; (b) Representativa para equipamentos comerciais. Fonte: Santos, 2009.

Esses parâmetros devem ser aplicados junto às variáveis tradicionais do processo MAG, que são o comprimento do arco, gás de proteção, velocidade de alimentação. Os tempos de base e pico também interferem no T_T (período de pulso) conforme Equação 1, que é o contrário da F (frequência de pulsação) representada na Equação 2 e do CT (ciclo de trabalho) de acordo com a Equação 3.

$$T_T = t_p + t_b \quad (1)$$

$$F = \frac{1}{t_p + t_b} \quad (2)$$

$$CT = \frac{t_p}{t_p + t_b} \cdot 100\% \quad (3)$$

2.4 GÁS DE PROTEÇÃO

Segundo Alves (2009), o gás de proteção tem como função, proteger o arame, a poça de fusão e o arco contra efeitos prejudiciais do ar atmosférico. O gás possui também, a responsabilidade na abertura e na estabilidade do arco elétrico e influencia diretamente na transferência do metal de adição durante o processo de soldagem.

Para complementar, Jönsson (1995 apud SANTOS, 2009, p.13) salienta que, a proteção gasosa interfere diretamente nas características do cordão de solda, como formato, regularidade, propriedades mecânicas, fenômenos de transferência metálica, estabilidade do arco e sentidção. Para escolha do gás de proteção a ser aplicado na soldagem, deve-se analisar o material base que será utilizado, o tipo de arame e respectivo diâmetro, a posição de soldagem e a transferência metálica. No que tange às características do gás de proteção, as principais são, potencial de ionização, condutividade térmica e potencial de oxidação

2.5 SENTIDO DE DESLOCAMENTO DA TOCHA

De acordo com Bracarense e Felizardo (2003), o ângulo da tocha e o sentido da soldagem (Figura 3) influenciam diretamente na geometria do cordão afetando a largura e a penetração. O ângulo da tocha define-se como a medida de inclinação tomada entre a linha no eixo da solda e outra linha perpendicular a face da chapa.

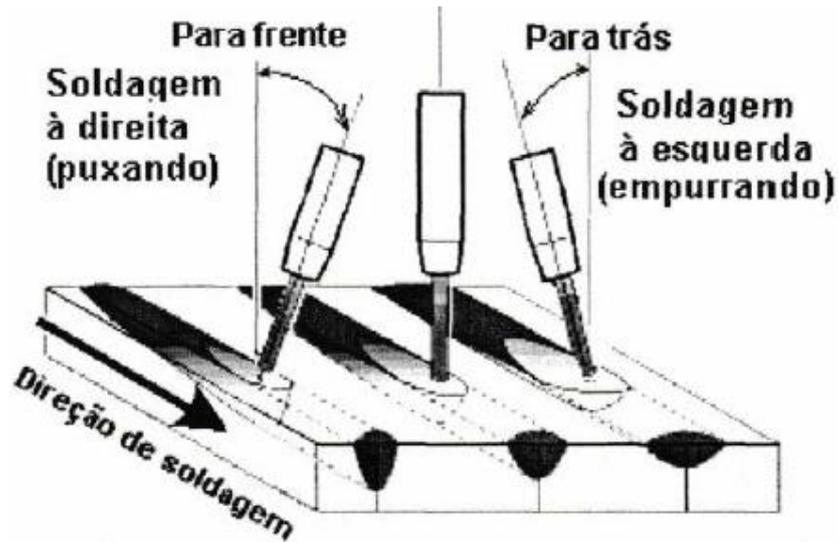


Figura 3: Formas de ataque e deslocamento. Fonte: SÁBIO, 2007.

Conforme Sábio (2007), na soldagem à direita (puxando), obtém-se um ângulo de deslocamento positivo, onde o jato de plasma empurra o metal líquido para trás, e o arco incide diretamente no metal base, gerando assim um cordão com largura reduzida, porém com grande penetração e com reforço convexo. Entretanto, na soldagem à direita (puxando), o controle na operação de soldagem é difícil e o efeito do gás de proteção tende a diminuir, acarretando geração de porosidades. Já na soldagem à esquerda (empurrando), auferem-se um ângulo de deslocamento negativo, e desta forma o jato de plasma espalha o material líquido em forma de um colchão fluido, ocasionando aumento na largura do cordão de solda e redução da penetração e do reforço.

2.6 TECIMENTO

O tecimento é o deslocamento lateral do arame em relação ao cordão de solda, realizado através de movimentos realizados com a tocha de soldagem e ilustrados na Figura 4. Este movimento é aplicado para depositar mais material de adição, tornando o cordão de solda mais largo. Este processo tem a finalidade de fazer a escória flutuar, garantido a fusão nas paredes laterais da junta, reduzindo a variação da temperatura no processo de soldagem. O tecimento tem restrição à aplicação quando a amplitude é menor que 3 vezes o diâmetro do arame (MODENESI, 2004).

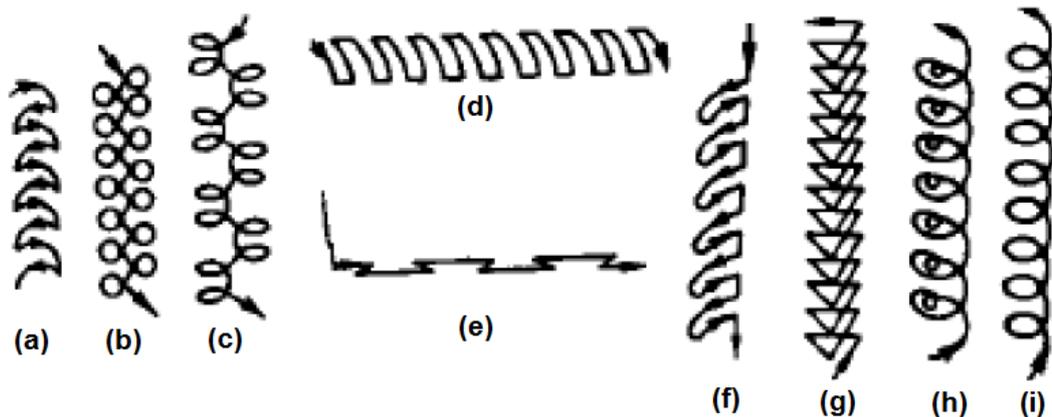


Figura 4: Padrões de tecimento do arame. Fonte: SANTOS, 2009.

Perez (2007) indica que, os padrões de tecimento (a) e (i) são mais utilizados em soldagens de topo, (d) e (g) são mais aplicados em solda de ângulo, (b) é particularmente mais adequado para chapas grossas, (f) é recomendado quando for necessário aplicar mais calor em uma borda.

Segundo Coraini (2011), estudos realizados mostram que a amplitude do tecimento está diretamente relacionada com o diâmetro do arame de solda, sendo que ótimos resultados foram encontrados em amplitudes entre 2,0 a 2,5 vezes ao diâmetro do arame de solda.

Para um cordão de solda homogêneo, é necessário que o movimento de tecimento seja mantido constante. Para atingir uma solda de alta qualidade, que obtenha boa penetração, os movimentos do soldador devem ser bem controlados, fato que só é conquistado através da prática e experiência. Na soldagem robotizada existem programas pré-definidos, que são escolhidos de acordo com a necessidade do processo e em função da estabilidade do manipulador, eliminando assim os imprevistos do tecimento realizado manualmente, que depende da habilidade do soldador (PEREZ, 2007).

Porém é importante dizer que quando se impõe o movimento de tecimento à tocha de soldagem, como é usual no passe de raiz, há também variação na frequência de transferência de gotas, que ocasiona a variação da corrente e tensão de soldagem, surgindo a tendência à falta de fusão ou excessiva fluidez da poça e recuo do reforço da raiz. Ainda quanto ao passe de raiz, variações na abertura de raiz também podem afetar o processo, mas estudos foram feitos soldando-se chapas de topo de até 15mm de espessura onde aberturas de raiz variando de 0 até 6mm não afetaram significativamente a resistência da junta. (PEREZ, 2007, p. 18).

2.7 FREQUÊNCIA DO TECIMENTO

Segundo Carvalho et al. (1997, p.4), é perceptível que baixas frequências de trabalho ocasionam defeitos conhecidos como mordeduras, isto é atribuído pelo uso de alta velocidade de soldagem, o que conseqüentemente gera a falta de fusão nas laterais do cordão de solda. Na utilização de frequências maiores, realiza-se uma soldagem de revestimento com velocidades superiores às alcançadas com frequências menores, resultando em menores índices de poros, evidências de trincas ou quaisquer irregularidades na superfície dos cordões soldados.

Carvalho et al. (1997, p.8) complementa que, nos experimentos realizados com frequências de tecimento de 2 a 5 Hz, obteve-se resultados satisfatórios com a frequência de tecimento de 5 Hz, melhorando o aspecto visual do cordão de solda, atingindo maior penetração e altura de reforço, quando comparado à frequência de 2 Hz. Além da solda com a frequência mais elevada proporcionar depósito de forma regular ao longo de todo o cordão soldado, alcança maiores tempos de vida para os revestimentos.

2.8 SENTIDO DE LAMINAÇÃO

Nos processos de conformação mecânica, a deformação plástica acontece principalmente por deslizamento de determinados planos cristalinos. Ocorre a rotação do reticulado por deslizamento de planos para orientações mais favoráveis, denominada textura de deformação. Os principais fatores que influenciam na textura final de deformação são: a mudança de forma imposta ao material na conformação; a orientação inicial dos grãos antes da deformação e a temperatura em que o material foi deformado.

Para Coraini (2009), uma variável metalúrgica que influencia nas distorções das ligas encruadas é o sentido de laminação. A partir de estudos acerca desta variável, concluiu que a presença da textura tipo *Brass*, foi o parâmetro responsável na influência da direção de soldagem sobre as distorções, sendo a anisotropia das propriedades mecânicas relacionadas a textura do material, fator que beneficiou grande parte da distorção na situação em que corpos de prova foram soldados paralelo ao sentido de laminação.

As características de textura do metal de base também influenciam a textura da junta soldada, particularmente o tamanho médio dos grãos, uma vez que, dependendo das diferenças de composição e estrutura cristalina do metal de base, pode haver crescimento epitaxial ou nucleação heterogênea no metal

de solda. Prevalecerá um maior crescimento epitaxial no metal de solda quando o metal base apresentar uma textura cuja direção cristalográfica favoreça a epitaxial e que esteja alinhada com a direção de extração de calor (FRAGA, 2009, p. 28).

Fraga (2009), comparou condições de soldagem paralela a direção de laminação, e perpendicular a direção de laminação de um mesmo material. A soldagem realizada na direção paralela a laminação apresentou as maiores distorções, obtendo um coeficiente de distorção de 0,33, enquanto os corpos de prova soldados perpendicularmente ao sentido de laminação apresentaram um coeficiente de distorção longitudinal de 0,27 a 0,32. Concluiu-se que as contrações volumétricas nos conjuntos soldados são as mesmas, e que a direção da soldagem não apresentou influências estatisticamente significativas sobre as distorções.

2.9 DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO

De acordo com Soares (2006), para atender a alta demanda produtiva e as exigências da qualidade do produto final, vários recursos devem ser aplicados juntamente ao processo de solda para atingir esses resultados. Na montagem de conjuntos soldados é bastante comum utilizar dispositivos para fixar os componentes, que são responsáveis por garantir o posicionamento das peças em conformidade com as exigências e tolerâncias exigidas nos projetos, garantindo assim, as medidas corretas antes e depois do processo de soldagem, o qual propicia bruscas alterações na forma em função das tensões térmicas. Baseado na demanda de produção e aplicação é aconselhável desenvolver dispositivos que assegurem a repetitividade do processo, visando ganhos de produtividade.

Além de fazer o posicionamento das peças, os dispositivos de fixação têm como função reduzir os problemas causados pelas tensões durante a soldagem, estes dispositivos são capazes de fazer a pré-deformação nas partes montadas antes da soldagem, com objetivo de atingir a forma correta somente após o alívio da pré-deformação.

2.10 DISTORÇÕES ANGULARES

Segundo Modenesi (2001), a soldagem por fusão é caracterizada pelo aquecimento localizado em determinadas regiões da peça, conseqüentemente o restante do material permanece em temperaturas bastante inferiores. As partes aquecidas tendem a dilatar, contudo as partes adjacentes submetidas a temperaturas

menores dificultam o aquecimento, resultando no desenvolvimento de deformações elásticas e plásticas no material. No final do processo de soldagem a peça apresentará tensões internas (tensões residuais) e distorções que resultarão em mudanças geométricas e dimensionais.

Distorção é a alteração geométrica e dimensional que componentes soldados sofrem como resultado do movimento do material, decorrente das tensões térmicas originadas durante o processo de soldagem. A distorção que ocorre durante a soldagem, é resultado da expansão e contração do material de adição e do material base no decorrer do ciclo térmico (aquecimento e resfriamento). Ao longo do processo de aquecimento e resfriamento, vários fatores interferem na contração do metal, causando as distorções, bem como alterações nas propriedades físicas e mecânicas, justamente devido ao calor aplicado sobre os componentes soldados (Soares, 2006).

Para AWS (2001 apud CORAINI, 2011, p36), as distorções podem ser controladas de variadas maneiras, as técnicas mais comuns utilizadas antes e durante o processo de soldagem, visando maior controle da geometria das peças soldadas são:

- Preparação dos componentes soldados para que as distorções geradas durante a soldagem adquiram a geometria final (pré-deformação);
- Restringir os componentes para evitar a distorção durante a soldagem (dispositivos de fixação);
- Realizar procedimento de soldagem, de modo que o material de adição seja balanceado em ambos lados da junta;
- Sequência de soldagem.

Conforme Santos (2009), existem três tipos fundamentais de variações dimensionais, ocorrem durante o processo de soldagem em estruturas soldadas: contração transversal Figura 5 (A), que ocorre no sentido perpendicular ao cordão de solda, contração longitudinal Figura 5 (B) que acontece em paralelo ao cordão de solda e distorção angular Figura 5 (C) e 5 (D), que se dá em torno circular ao cordão de solda.

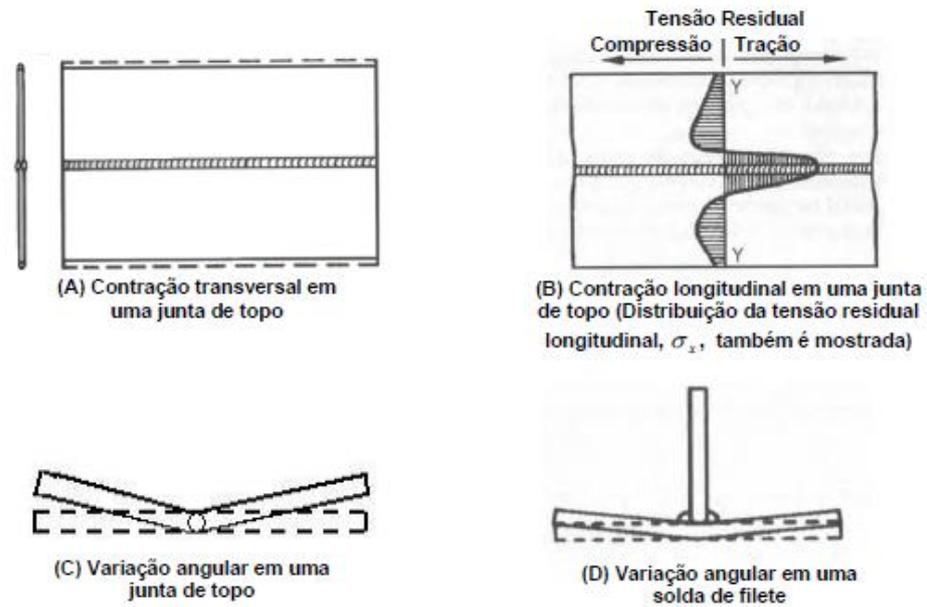


Figura 5: Variações geométricas e dimensionais. Fonte: SANTOS, 2009.

A maior parte da contração transversal acontece após a soldagem, isso ocorre em temperaturas inferiores às alcançadas durante a realização da soldagem, ou seja, durante o resfriamento. A contração transversal uniforme, na prática, nem sempre se concretiza, devido a influência do dimensionamento da junta, restrição não uniforme da junta e soldagem com vários passes.

A contração longitudinal surge das tensões residuais longitudinais que ocorrem ao longo da soldagem, esta tensão acarreta deformações resultantes das desigualdades de temperaturas entre o metal de adição, região adjacente e o restante do metal base, que é influenciada pela energia de soldagem e a seção transversal da junta. Aproximadamente, a quantidade de contração longitudinal em juntas de topo é de 1/1000 do comprimento de solda, muito menor quando comparada à contração transversal (CORAINI, 2011).

Santos (2009) identifica que, a distorção angular é ocasionada pelas diferenças de temperaturas entre as faces inferior e superior do cordão de solda, essas diferenças de temperatura provocam variações nos valores da magnitude de contração no sentido da espessura da chapa. Tal fenômeno ocorre na maioria das vezes, em juntas de tipo topo quando a contração transversal não é uniforme na direção da espessura chapa. A distorção angular é menor em chapas com espessuras finas, caso sejam utilizadas chapas com espessuras extremamente grossas, a distorção será menor devido as restrições impostas pelo próprio metal base.

Os principais fatores que influenciam na magnitude da distorção são:

- Profundidade e largura da zona de fusão em relação a espessura da chapa;
- Tipo de junta;
- Parâmetros de soldagem;
- Propriedades termomecânicas do material.

2.11 METODOLOGIA TAGUCHI

Segundo Montgomery (2001 apud CARBAS, 2008, p.16), o método de Taguchi é uma série de testes em que são feitas alterações nas variáveis de entrada de um sistema ou processo, de modo que seja possível identificar e justificar as razões para as alterações nas variáveis de saída.

O método Taguchi é um método de projeto de experimentos fatoriais, ou seja, é somente executada uma fração do número total de combinações das variáveis de entrada. Para isso, o Dr. Genichi Taguchi propôs a utilização de matrizes compostas por vetores ortogonais para definir os testes a serem realizados (MOITA, 2007, p. 20).

A ferramenta estatística ANOVA, ou análise de variância, é utilizada para indicar as influências dos parâmetros iniciais sobre as variáveis de saída. Na análise de variância, o valor de F indica a quantidade de influência de cada parâmetro sobre a saída ou resposta, e quanto mais elevado o valor de F, os efeitos do parâmetro sobre o resultado final serão maiores. O valor de P é o indicativo da probabilidade de que determinado parâmetro influencie sobre a saída, ou seja, é o grau de veracidade de que o parâmetro está efetivamente interferindo nos resultados; costuma-se afirmar que certo parâmetro exibe influências consideráveis sobre a saída, na ocasião em que o valor de P for igual ou inferior a 0,05, o que aponta um índice de confiabilidade igual ou superior a 95% (ANAWA; OLABI, 2008).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo estão descritos os métodos e técnicas aplicadas para a realização deste trabalho, bem como os materiais e equipamentos utilizados.

3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

Foi desenvolvido um projeto de experimentos, utilizando a metodologia Taguchi para avaliar os efeitos da distorção sobre a soldagem robotizada nos aços DOMEX 700. Este projeto possui cinco fatores (parâmetros), sentido de deslocamento da tocha, sentido de laminação da chapa, tipo de tecimento e a frequência do tecimento com os respectivos níveis 2,2,2,3,3. A característica almejada é a penetração total nos corpos de prova, apresentando a menor deformação dimensional possível.

Através do software Minitab 16 uma matriz experimental L36 foi criada, a qual proporcionou o cruzamento de dados, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Projeto de Experimentos

Ordem Experimental	Sentido de Deslocamento	Sentido da Laminação	Fixação	Tipo de Tecimento	Frequência
1	Puxando (10°)	Longitudinal	Sim	Linear	2 Hz
2	Puxando (10°)	Longitudinal	Sim	Onda	2,5 Hz
3	Puxando (10°)	Longitudinal	Sim	Circulo	3 Hz
4	Puxando (10°)	Longitudinal	Sim	Linear	2 Hz
5	Puxando (10°)	Longitudinal	Sim	Onda	2,5 Hz
6	Puxando (10°)	Longitudinal	Sim	Circulo	3 Hz
7	Puxando (10°)	Longitudinal	Não	Linear	2 Hz
8	Puxando (10°)	Longitudinal	Não	Onda	2,5 Hz
9	Puxando (10°)	Longitudinal	Não	Circulo	3 Hz
10	Puxando (10°)	Transversal	Sim	Linear	2 Hz
11	Puxando (10°)	Transversal	Sim	Onda	2,5 Hz
12	Puxando (10°)	Transversal	Sim	Circulo	3 Hz
13	Puxando (10°)	Transversal	Não	Linear	2,5 Hz
14	Puxando (10°)	Transversal	Não	Onda	3 Hz
15	Puxando (10°)	Transversal	Não	Circulo	2 Hz
16	Puxando (10°)	Transversal	Não	Linear	2,5 Hz
17	Puxando (10°)	Transversal	Não	Onda	3 Hz
18	Puxando (10°)	Transversal	Não	Circulo	2 Hz
19	Empurrando (10°)	Longitudinal	Não	Linear	2,5 Hz
20	Empurrando (10°)	Longitudinal	Não	Onda	3 Hz

21	Empurrando (10°)	Longitudinal	Não	Circulo	2 Hz
22	Empurrando (10°)	Longitudinal	Não	Linear	2,5 Hz
23	Empurrando (10°)	Longitudinal	Não	Onda	3 Hz
24	Empurrando (10°)	Longitudinal	Não	Circulo	2 Hz
25	Empurrando (10°)	Longitudinal	Sim	Linear	3 Hz
26	Empurrando (10°)	Longitudinal	Sim	Onda	2 Hz
27	Empurrando (10°)	Longitudinal	Sim	Circulo	2,5 Hz
28	Empurrando (10°)	Transversal	Não	Linear	3 Hz
29	Empurrando (10°)	Transversal	Não	Onda	2 Hz
30	Empurrando (10°)	Transversal	Não	Circulo	2,5 Hz
31	Empurrando (10°)	Transversal	Sim	Linear	3 Hz
32	Empurrando (10°)	Transversal	Sim	Onda	2 Hz
33	Empurrando (10°)	Transversal	Sim	Circulo	2,5 Hz
34	Empurrando (10°)	Transversal	Sim	Linear	3 Hz
35	Empurrando (10°)	Transversal	Sim	Onda	2 Hz
36	Empurrando (10°)	Transversal	Sim	Circulo	2,5 Hz

3.1.1 Definição dos Parâmetros de soldagem

A definição dos parâmetros de soldagem foi baseada na revisão da literatura, com relevância naqueles que influenciam diretamente nos critérios de qualidade, como a velocidade da tocha de soldagem a tensão e a corrente. Testes experimentais prévios foram realizados, para determinar os parâmetros de soldagem ideais para atingir os critérios de qualidade, parâmetros estes que foram mantidos constantes. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de soldagem mantidos constantes durante os experimentos.

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem

Parâmetros de soldagem	
Distância do bico de contato até o corpo de Prova	12,7 mm
Velocidade de soldagem	600 mm/min
Ângulo da tocha	10°
Vazão do gás de proteção (75%Ar e 25%CO ₂)	13 l/min
Intensidade de corrente elétrica	250 A
Voltagem (d.d.p)	32 V
Amplitude do tecimento	2,0 mm
Material de Adição	OK AristoRod 12.50 AWS ER70S
Diâmetro do arame de adição	1,0 mm

3.1.2 Identificação do sentido de laminação

O sentido de laminação da matéria prima foi informado pelo fornecedor SSAB e as chapas foram cortadas em máquina de corte a LASER da marca Bystronic, modelo Byspeed 4020. Preparou-se 36 unidades com corte no sentido longitudinal da laminação, identificadas posteriormente com as letras PA e outras 36 unidades com corte no sentido transversal da laminação, identificadas com as letras PE.

3.1.3 Medição tridimensional e análise estatística

Para simplificar a análise dos dados, considerou-se apenas a medição no contorno dos corpos de prova, de acordo com a Figura 6.

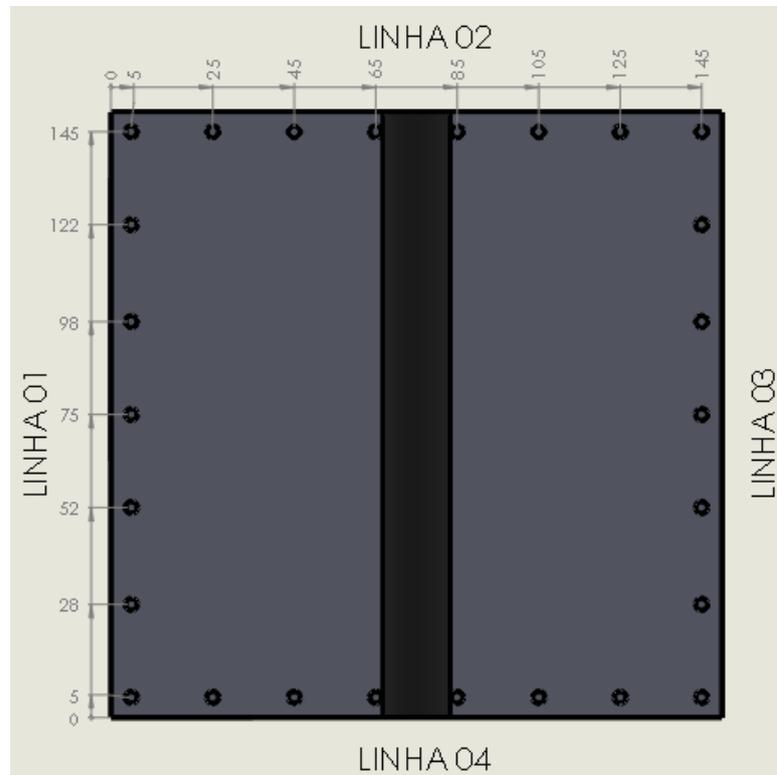


Figura 6: Pontos de medição.

- Linha 01 – paralelo ao cordão de solda, para visualização da flexão longitudinal;
- Linha 02 – perpendicular ao cordão de solda, parte que inicia o processo de soldagem, para visualizar a distorção angular transversal;
- Linha 03 - paralelo ao cordão de solda, para visualização da flexão longitudinal;

- Linha 04 - perpendicular ao cordão de solda, parte onde termina o processo de soldagem, para visualizar a distorção angular transversal, gerando no total 26 pontos.

Foram elaborados gráficos em 3D, para melhor visualização das distorções dos experimentos. As marcações dos pontos de medição foram realizadas com auxílio de um traçador de altura, criando 28 pontos em cada componente, totalizando 56 pontos de medição no corpo de prova soldado, visualizado na Figura 7 (a). Na realização das medições, os corpos de prova foram apoiados nas extremidades, próximo às arestas, em dois prismas magnéticos, conforme a Figura 7 (b).

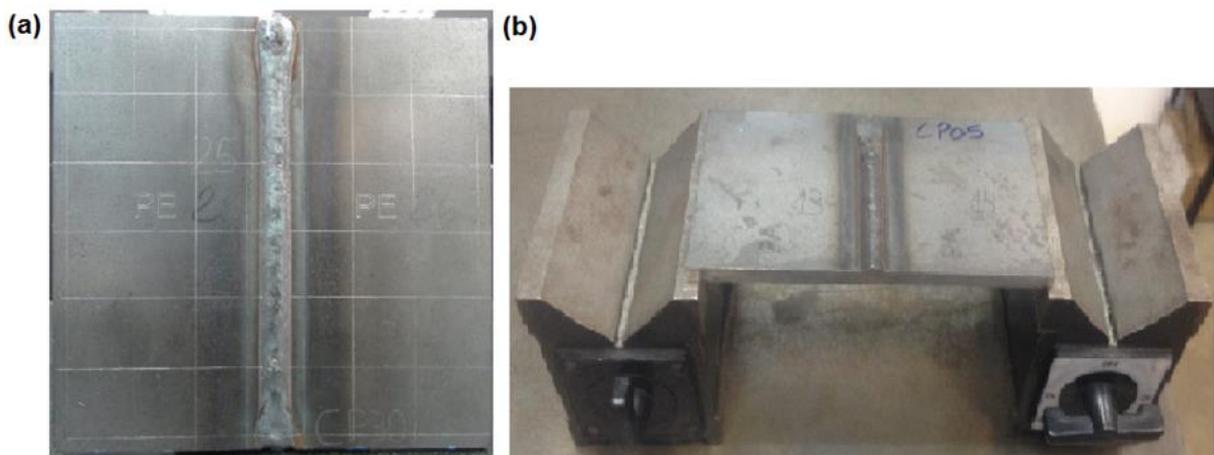


Figura 7: Forma de medição: (a) Marcação dos pontos de medição; (b) Apoio para medição.

Através de uma máquina de medição tridimensional, realizou-se a medição das alturas dos pontos, na coordenada cartesiana Z, a medição das alturas foi em relação a um plano criado e nivelado nos dois prismas magnéticos, onde os corpos de prova foram apoiados. As medições foram efetuadas antes ($Z_{Ponto\ Inicial}$) e após a soldagem ($Z_{Ponto\ Final}$), isso para desconsiderar qualquer distorção originada antes do processo de soldagem, isto é, durante o corte a LASER ou devido ao próprio processo de fabricação da chapa. Dessa maneira, obteve-se a estimativa das distorções angulares reais, representada pela Equação 4.

$$\Delta Z_{PONTO} = Z_{Ponto\ Final} - Z_{Ponto\ Inicial} \quad (4)$$

Com os valores obtidos e calculados, produziu-se os gráficos, com o auxílio do software *Excel 2013*. Para cada linha foi gerado um gráfico em 2D, apresentado anteriormente na Figura 6, e um gráfico em 3D para uma melhor visualização das distorções baseado nos pontos identificados pela Figura 7(a). Posteriormente, a

amplitude da distorção de cada linha foi calculada utilizando a Equação 5. Com base nos valores das amplitudes, comparou-se estatisticamente os resultados, empregando o software *Minitab 16*, especificamente aplicando a ferramenta de análise da variância (*Anova*). Esta ferramenta é usada para testes de hipóteses, que consistem em verificar se as médias dos resultados dentro do experimento, são estatisticamente iguais ou diferentes, bem como analisar se há interação entre essas variáveis.

$$Amplitude = |\Delta Z_{Ponto\ max} - \Delta Z_{Ponto\ min}| \quad (5)$$

3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Todas as etapas de procedimentos experimentais, bem como a coleta de dados, foram realizadas na Metalstar Industria Metalúrgica, a qual disponibilizou toda a estrutura e recursos necessários para a realização deste trabalho.

3.2.1 Material base

O material selecionado para a fabricação das amostras é um aço de alta resistência e baixa liga, o (DOMEX 700MC), em conformidade com a norma DIN EM 10149 (SSAB, 2015).

Para a realização dos experimentos, foram utilizados 36 corpos de prova, compostos de 02 chapas com espessura de 6,35 mm, largura 75 mm e comprimento de 150 mm produzidos através de corte a LASER.

3.2.2 Célula de Soldagem

A Figura 8 (a) apresenta uma imagem da célula de soldagem, modelo MODUCCELL AL do fabricante SUMIG, utilizada na realização dos experimentos. Esta célula de soldagem é composta por robô, Figura 8 (b) que trabalha com 6 graus de liberdade e possui 6 eixos, usado especificamente para processos de soldagem. O mesmo pode ser alimentado de duas formas, por barrica ou carretel, neste caso por carretel. O robô é composto por uma tocha robótica de soldagem com ângulo de 45° e um bocal cônico de 15,5 mm de diâmetro, a qual possui um fluxo de água que flui até o dissipador de calor, proporcionando uma boa refrigeração. A fonte de soldagem identificada na Figura 8 (c) possui capacidade de saída de 30 a 400 A, com possibilidade de trabalhar em curto circuito, arco pulsado e aerossol. Para os experimentos, a fonte foi configurada no modo de arco pulsado.

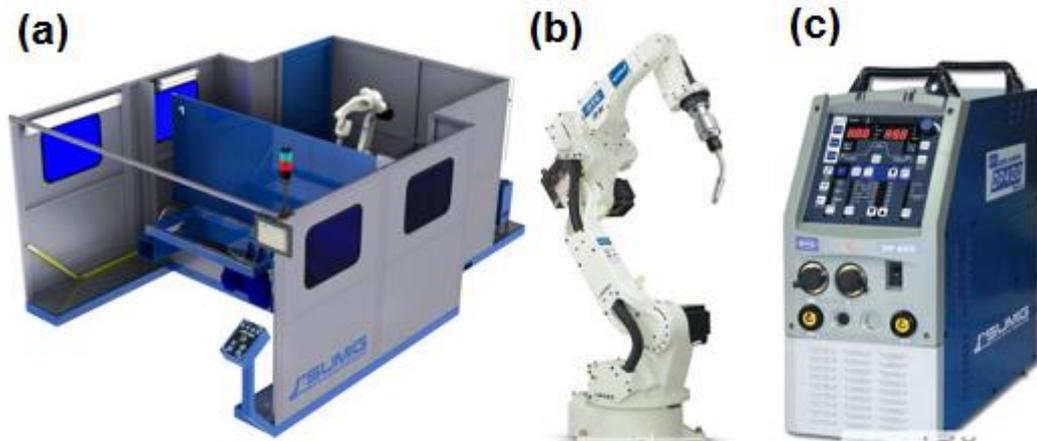


Figura 8: Célula de soldagem utilizado: (a) Célula de Soldagem SUMIG, (b) Robô de Solda OTC, (c) Fonte de Solda Fonte: SUMIG, 2015

3.2.3 Dispositivo de soldagem

Para o desenvolvimento dos experimentos de soldagem foi utilizado um dispositivo para posicionar e fixar as chapas, com dois apertos mecânicos, que possibilitam a troca das peças de acordo com as configurações de soldagem definidas. As chapas foram posicionadas com espaçamento de 1 mm entre elas, como pode-se visualizar na Figura 9. Também foi utilizado um apoio na parte inferior da solda, com a finalidade de auxiliar na contenção do material fundido no processo de soldagem, chamado de cobre junta.



Figura 9: Dispositivo de soldagem fixado à mesa.

3.2.4 Equipamento de medição

O mapeamento da distorção angular foi executado por uma máquina de medição tridimensional, do fabricante Mitutoyo, modelo Criyta-Plus M7106, ilustrada pela Figura 10, com cursos de medição de 700 mm no eixo X, 1000 mm no eixo Y e 600 mm no eixo Z, e resolução de 0,0005 mm.

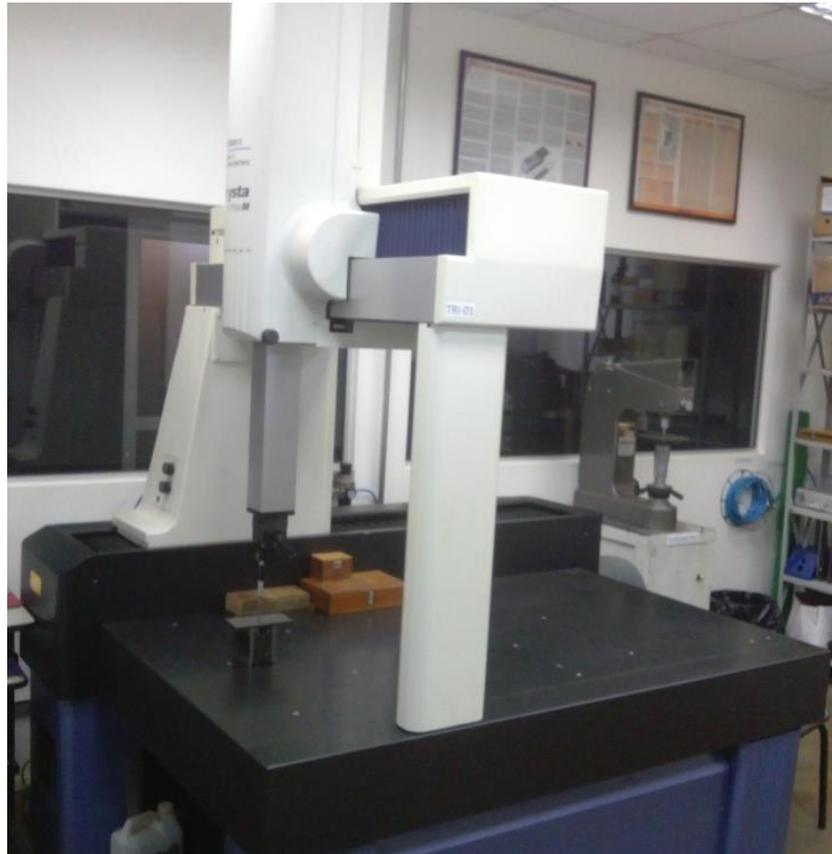


Figura 10: Máquina de medição tridimensional.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A apresentação e análise dos resultados estão distribuídas em quatro etapas: análise de distorção da linha 1, análise de distorção da linha 2, análise de distorção da linha 3 e análise de distorção da linha 4.

4.1 ANÁLISE DE DISTORÇÃO LINHA 1

Por meio da análise de variância, é possível assegurar com 95% de confiabilidade que os parâmetros utilizados com influência significativa sobre a distorção, foram o sentido de deslocamento da tocha, a utilização de fixação nos componentes durante a soldagem e a frequência do tecimento. Esta afirmação se justifica pelo fato do valor de P encontrado ser menor do que 0,05, (Tabela 3). A ordem decrescente dos parâmetros que mais influenciaram a distorção, é mensurada a partir dos valores de F, sendo a aplicação da fixação nos componentes soldados, a frequência do tecimento e o sentido do deslocamento da tocha, isto é, maior valor de F, maior influência.

Tabela 3 - Análise da variância para a distorção na soldagem Linha 1

Linha 1					
Parâmetros	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Médias dos Quadrados	Valor de F	Valor de P
Sentido de Deslocamento	0,016299	1	0,016299	5,37	0,028
Sentido da Laminação	0,002567	1	0,002567	0,85	0,365
Fixação	0,056803	1	0,056803	18,73	0,000
Tipo de Tecimento	0,010324	2	0,005162	1,7	0,201
Frequência	0,044428	2	0,022214	7,32	0,003
Residual	0,84935	28	0,003033		

A Figura 11 (a) mostra o gráfico da distorção em função do sentido de deslocamento da tocha, onde observa-se que a tendência para alcançar menores valores de distorção é o deslocamento da tocha de soldagem no sentido puxando. Em contrapartida, o parâmetro empurrando a tocha de soldagem resultou em valores mais elevados de distorção. A Figura 11 (b) apresenta graficamente, a distorção em função do sentido de laminação da chapa, concluindo-se que, para este fator, as menores distorções foram obtidas no sentido transversal a laminação. A Figura 11 (c) ilustra a distorção em função da aplicação ou não aplicação de um dispositivo de fixação, e

verifica-se que, para este parâmetro os valores encontrados foram mais expressivos, obteve-se valores menores de distorção quando utilizada fixação nos componentes durante a soldagem. Através da análise da Figura 11 (d), constata-se que, com o tecimento do tipo senoidal, menores são os valores de distorções apresentadas. Evidencia-se pela Figura 11 (e), que a frequência de 3Hz no tecimento, foi a que apontou as menores distorções.

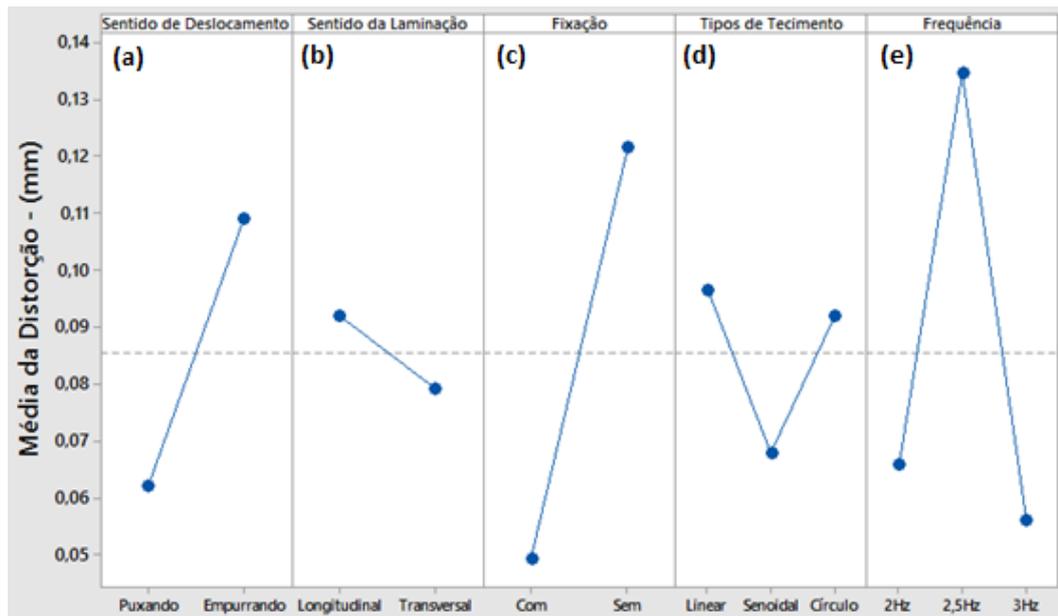


Figura 11: Efeitos dos parâmetros sobre a distorção na linha 1: (a) Sentido de deslocamento; (b) Sentido da laminação; (c) Fixação; (d) Tipo de tecimento; (e) Frequência.

O estudo do processo constituiu na redução da distorção na soldagem. Foi plotado o gráfico da razão do sinal-ruído (razão S/N), que representa que a menor deformação é a mais indicada (menor/melhor), conforme a Figura 12. Pode-se observar que os níveis ideais dos parâmetros, são os que representam a maior razão S/N. Nota-se, a queda da distorção na soldagem utilizando o sentido puxando de deslocamento, empregando a laminação transversal, aplicando fixação nos componentes durante a soldagem, tecimento do tipo senoidal e a frequência de tecimento de 3Hz.

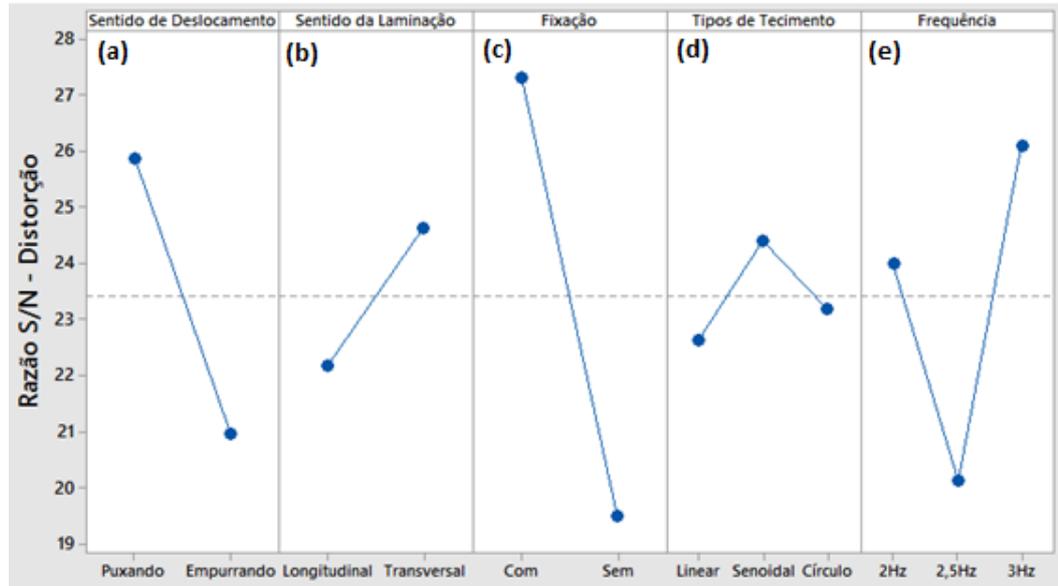


Figura 12: Gráficos da razão S/N sobre a distorção na linha 1: (a) Sentido de deslocamento; (b) Sentido da laminação; (c) Fixação; (d) Tipo de tecimento; (e) Frequência.

4.2 ANÁLISE DE DISTORÇÃO LINHA 2

Através da análise de variância, é possível assegurar com 95% de confiabilidade, que os parâmetros que influenciaram significativamente sobre a distorção na linha 2, foram o sentido de deslocamento da tocha e a utilização de fixação nos componentes durante a soldagem. Esta afirmação é confirmada devido ao valor de P encontrado ser inferior a 0,05, como mostra a Tabela 4. A ordem decrescente dos parâmetros que mais influenciaram a distorção é mensurada a partir dos valores de F, sendo a aplicação da fixação nos componentes soldados e o sentido do deslocamento da tocha, isto é, maior valor de F, maior influência.

Tabela 4 - Análise da variância para a distorção na soldagem Linha 2

Linha 2					
Parâmetros	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Médias dos Quadrados	Valor de F	Valor de P
Sentido de Deslocamento	0,07084	1	0,07084	6,70	0,015
Sentido da Laminação	0,00008	1	0,00008	0,01	0,930
Fixação	6,43721	1	6,43721	608,53	0,000
Tipo de Tecimento	0,02059	2	0,01030	0,97	0,390
Frequência	0,01943	2	0,00972	0,92	0,411
Residual	0,29619	28	0,01058		

A Figura 13 (a) demonstra o gráfico da distorção em função do sentido de deslocamento da tocha, onde verifica-se que a tendência para atingir menores valores de distorção é o deslocamento da tocha de soldagem no sentido puxando. Em compensação, o sentido empurrando a tocha de soldagem resultou em maiores valores de distorção. A Figura 13 (b) ilustra graficamente, a distorção em função do sentido de laminação da chapa, entende-se que, para este fator, as menores distorções foram encontradas no sentido longitudinal a laminação. A Figura 13 (c) apresenta a distorção em função da aplicação ou não, de um dispositivo de fixação, e certifica-se que, para este parâmetro os valores foram mais expressivos, os menores valores de distorção foram identificados quando utilizado dispositivo de fixação nos componentes durante a soldagem. Por meio da análise da Figura 13 (d), examina-se que, com a utilização do tecimento do tipo circular, os valores de distorção apresentam-se reduzidos. A Figura 13 (e) afirma que a frequência de 3Hz no tecimento, foi a que retratou as menores distorções.

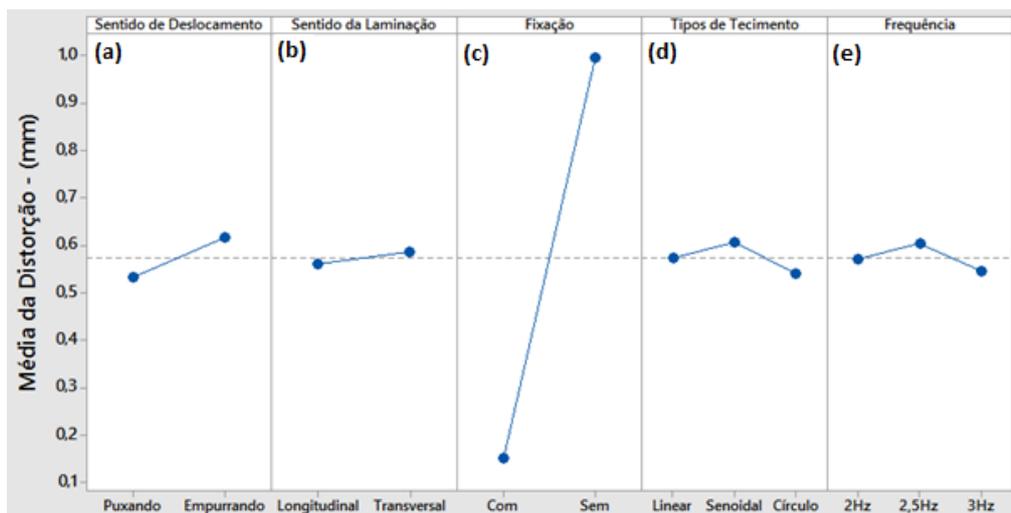


Figura 13: Efeitos dos parâmetros sobre a distorção na linha 2: (a) Sentido de deslocamento; (b) Sentido da laminação; (c) Fixação; (d) Tipo de tecimento; (e) Frequência.

Para a otimização da distorção angular na linha 2, selecionou-se a opção menor é melhor, demonstrando que se almeja alcançar as menores distorções angulares possíveis nos parâmetros de soldagem utilizados. Um gráfico da razão do sinal-ruído (razão S/N), foi plotado e pode ser verificado na Figura 14. Pode-se perceber que os níveis ideais dos parâmetros, são os que indicam a maior razão S/N. A redução da distorção na soldagem pode ser notada quando utilizado o sentido puxando de deslocamento, com o uso da laminação longitudinal, executando a fixação nos componentes durante a soldagem, com o tecimento do tipo linear e a frequência de tecimento de 3Hz.

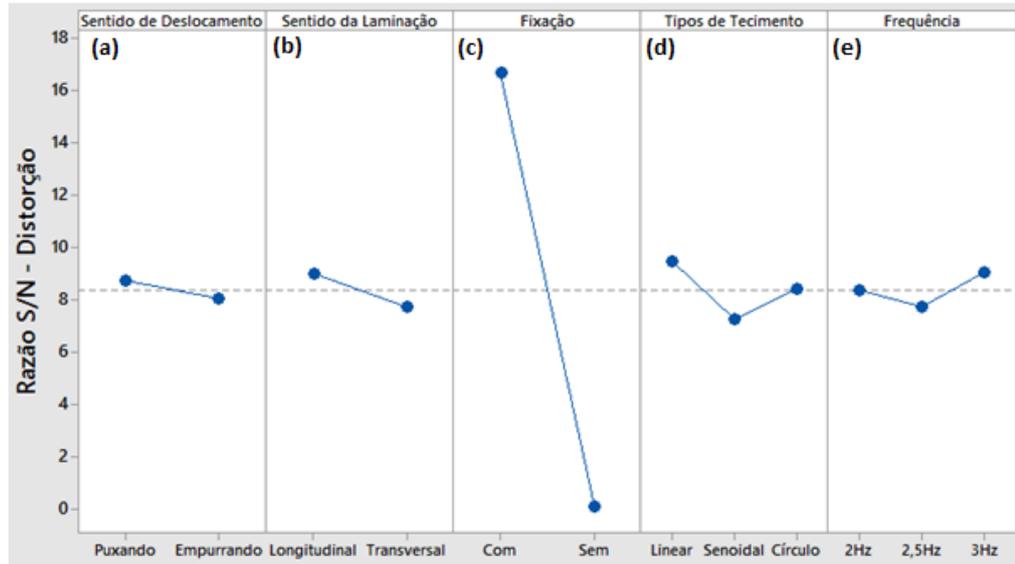


Figura 14: Gráficos da razão S/N sobre a distorção na linha 2: (a) Sentido de deslocamento; (b) Sentido da laminação; (c) Fixação; (d) Tipo de tecimento; (e) Frequência.

4.3 ANÁLISE DE DISTORÇÃO LINHA 3

Por meio da análise de variância, é possível assegurar com 95% de confiabilidade, que os parâmetros utilizados, com influência significativa sobre a distorção, foram o sentido de deslocamento da tocha, a utilização de fixação nos componentes durante a soldagem, o tipo de tecimento e o sentido de laminação. Esta afirmação se justifica pelo fato do valor de P encontrado ser menor do que 0,05, conforme a Tabela 5. A ordem decrescente dos parâmetros que mais influenciaram a distorção, é mensurada a partir dos valores de F, sendo a aplicação da fixação nos componentes soldados, o sentido de deslocamento da tocha, o tipo de tecimento e o sentido de laminação, isto é, maior valor de F, maior influência.

Tabela 5 - Análise da variância para a distorção na soldagem Linha 3

Linha 3					
Parâmetros	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Médias dos Quadrados	Valor de F	Valor de P
Sentido de Deslocamento	0,09090	1	0,09090	12,52	0,001
Sentido da Laminação	0,04403	1	0,04403	6,06	0,020
Fixação	5,39865	1	5,39865	743,52	0,000
Tipo de Tecimento	0,10859	2	0,05429	7,48	0,003
Frequência	0,04516	2	0,02258	3,11	0,060
Residual	0,20331	28	0,00726		

A Figura 15 (a) demonstra o gráfico da distorção em função do sentido de deslocamento da tocha, onde observa-se que a tendência para alcançar menores valores de distorção é o deslocamento da tocha de soldagem no sentido puxando. Em contrapartida, o parâmetro empurrando a tocha de soldagem resultou em distorção com valores mais elevados. A Figura 15 (b) apresenta graficamente, a distorção em função do sentido de laminação da chapa, concluindo-se que, para este fator, as menores distorções foram obtidas no sentido transversal a laminação. A Figura 15 (c) ilustra a distorção em função da aplicação ou não aplicação, de um dispositivo de fixação, e verifica-se, que para este parâmetro, os valores encontrados foram mais expressivos, sendo que se obteve menores valores de distorção quando utilizada fixação nos componentes durante a soldagem. Através da análise da Figura 15 (d), constata-se que, com o tecimento do tipo círculo, menores foram os valores de distorções apresentadas. Evidencia-se pela Figura 15 (e), que a frequência de 3Hz no tecimento, foi a que apontou as menores distorções.

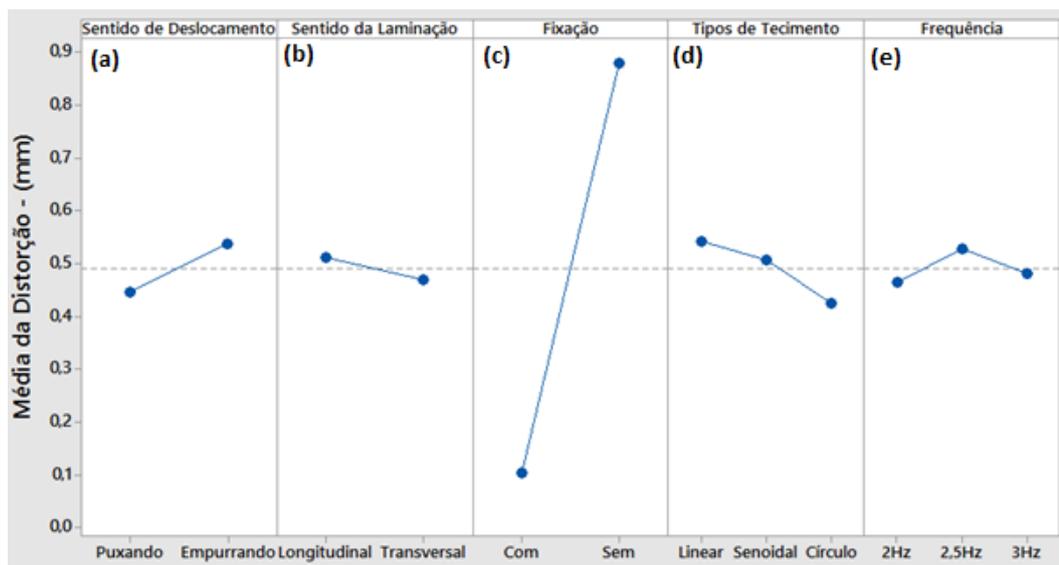


Figura 15: Efeitos dos parâmetros sobre a distorção na linha 3: (a) Sentido de deslocamento; (b) Sentido da laminação; (c) Fixação; (d) Tipo de tecimento; (e) Frequência.

O estudo do processo constituiu na redução da distorção na soldagem. Foi plotado o gráfico da razão do sinal-ruído (razão S/N), que representa que a menor deformação é a mais indicada (menor/melhor), conforme a Figura 16. Pode-se observar, que os níveis ideais dos parâmetros são os que representam a maior razão S/N. Nota-se, a queda da distorção na soldagem utilizando o sentido puxando de deslocamento, empregando a laminação transversal, aplicando fixação nos componentes durante a soldagem, tecimento do tipo circular e a frequência de tecimento de 3Hz.

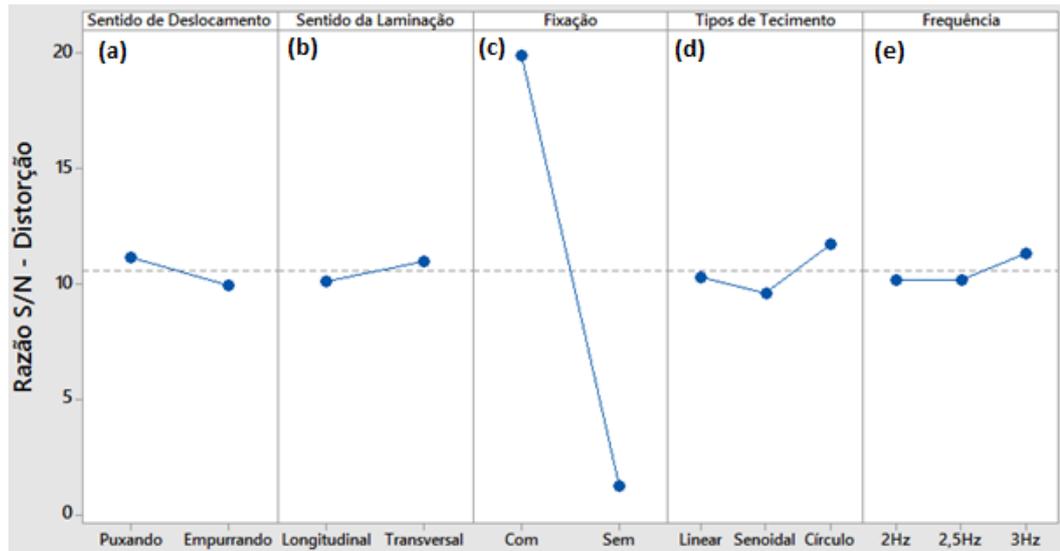


Figura 16: Gráficos da razão S/N sobre a distorção na linha 3: (a) Sentido de deslocamento; (b) Sentido da laminação; (c) Fixação; (d) Tipo de tecimento; (e) Frequência.

4.4 ANÁLISE DE DISTORÇÃO LINHA 4

Através da análise de variância, é possível assegurar com 95% de confiabilidade, que os parâmetros utilizados para a linha 4, com influência significativa sobre a distorção, foram o sentido de deslocamento da tocha e a utilização de fixação nos componentes durante a soldagem. Esta afirmação é confirmada devido ao valor de P encontrado ser inferior a 0,05, como mostra a Tabela 6. A ordem decrescente dos parâmetros que mais influenciaram a distorção é mensurada a partir dos valores de F, sendo a aplicação da fixação nos componentes soldados e o sentido do deslocamento da tocha, isto é, maior valor de F, maior influência.

Tabela 6 - Análise da variância para a distorção na soldagem Linha 3

Linha 4					
Parâmetros	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Médias dos Quadrados	Valor de F	Valor de P
Sentido de Deslocamento	0,10934	1	0,10934	13,32	0,001
Sentido da Laminação	0,01960	1	0,01960	2,39	0,134
Fixação	5,10459	1	5,10459	621,71	0,000
Tipo de Tecimento	0,00662	2	0,00331	0,40	0,672
Frequência	0,00097	2	0,00049	0,06	0,943
Residual	0,22990	28	0,00821		

A Figura 17 (a) demonstra o gráfico da distorção em função do sentido de deslocamento da tocha, onde verifica-se que a tendência para atingir menores valores

de distorção é o deslocamento da tocha de soldagem no sentido puxando. Em compensação, o sentido empurrando a tocha de soldagem resultou em maiores valores de distorção. A Figura 17 (b) ilustra graficamente, a distorção em função do sentido de laminação da chapa, entende-se que, para este fator, as menores distorções foram encontradas no sentido longitudinal a laminação. A Figura 17 (c) apresenta a distorção em função da aplicação ou não, de um dispositivo de fixação, e certifica-se que, para este parâmetro os valores foram mais expressivos, os menores valores de distorção foram identificados quando utilizado dispositivo de fixação nos componentes durante a soldagem. Por meio da análise da Figura 17 (d), examina-se que, com a utilização do tecimento do tipo linear, os valores de distorção apresentam-se reduzidos. A Figura 17 (e) afirma que a frequência de 3Hz no tecimento, foi a que retratou as menores distorções.

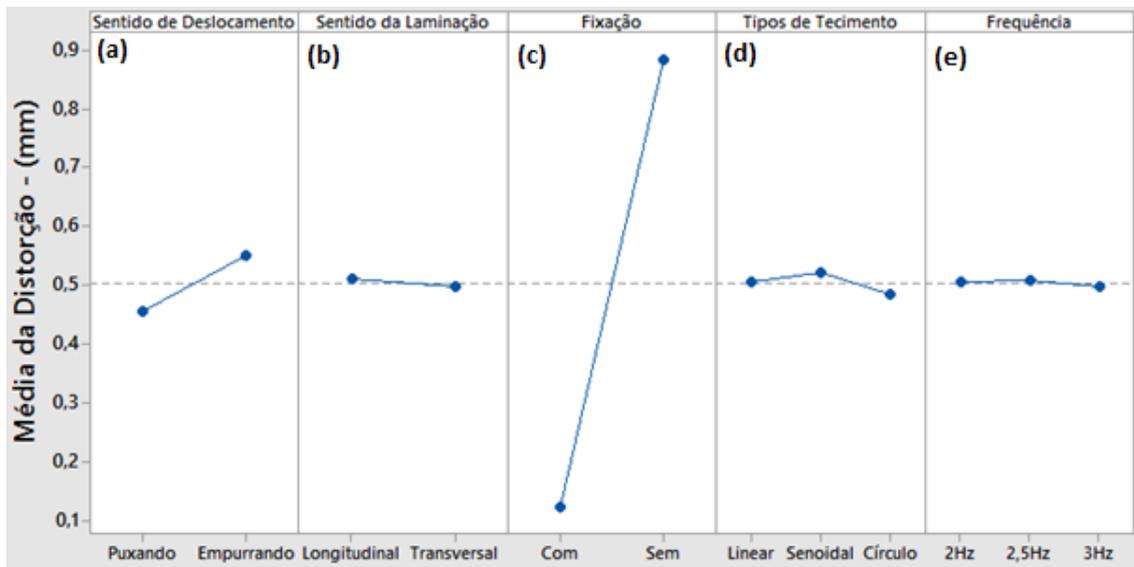


Figura 17: Efeitos dos parâmetros sobre a distorção linha 4: (a) Sentido de deslocamento; (b) Sentido da laminação; (c) Fixação; (d) Tipo de tecimento; (e) Frequência.

Para a otimização da distorção angular na linha 4, selecionou-se a opção menor é melhor, demonstrando que se almeja alcançar as menores distorções angulares possíveis, nos parâmetros de soldagem utilizados. Um gráfico da razão do sinal-ruído (razão S/N), foi plotado e pode ser verificado na Figura 18. Pode-se perceber que os níveis ideais dos parâmetros, são os que indicam a maior razão S/N. A redução da distorção na soldagem é reconhecida quando utilizado o sentido puxando de deslocamento, com o uso da laminação longitudinal, executando a fixação nos componentes durante a soldagem, com o tecimento do tipo linear e a frequência de tecimento de 3Hz.

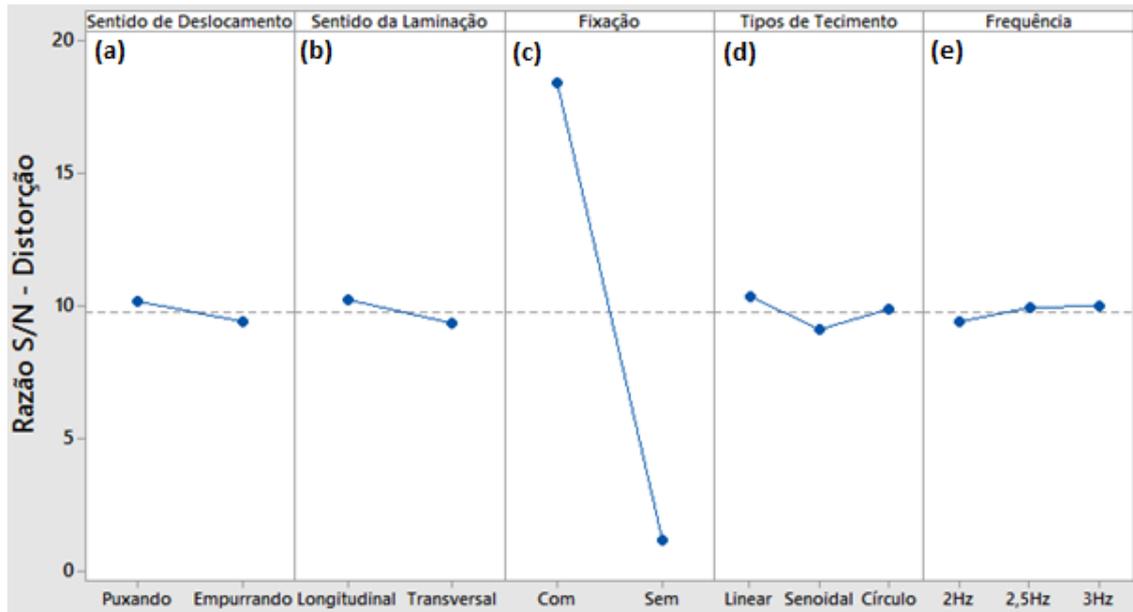


Figura 18 Gráficos da razão S/N sobre a distorção na linha 4: (a) Sentido de deslocamento; (b) Sentido da laminação; (c) Fixação; (d) Tipo de tecimento; (e) Frequência.

4.5 ANÁLISE DE DISTORÇÃO 3D

Foram comparados os corpos de prova 17 e 28, com o intuito de melhorar a visualização das distorções angulares que apresentaram influência do parâmetro sentido de deslocamento. A partir das Figuras 19 e 20, visualiza-se que o corpo de prova soldado com o deslocamento puxando obteve menores distorções.

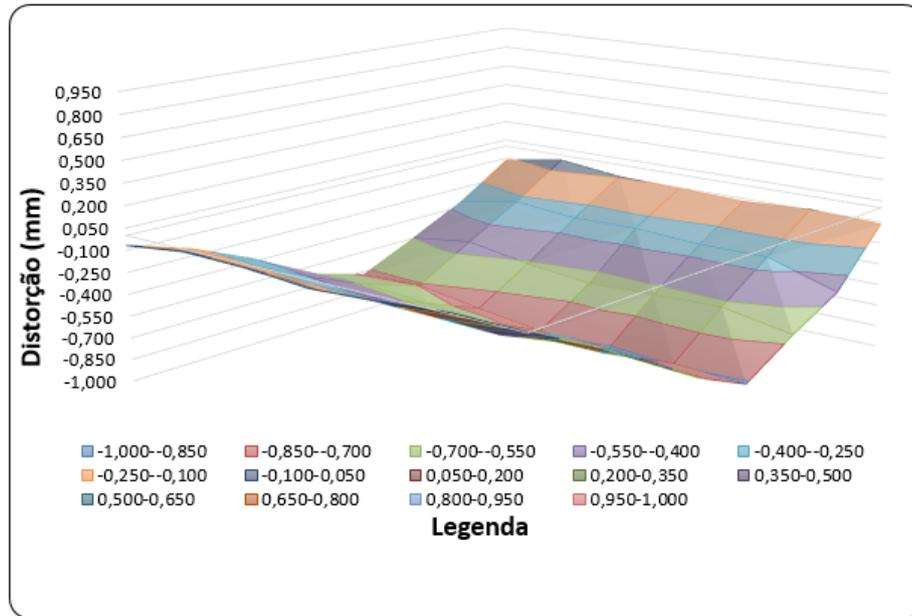


Figura 19: Corpo de prova 17: deslocamento da tocha puxando; sentido de laminação transversal; sem fixação; tecimento onda senoidal; frequência de 3 Hz.

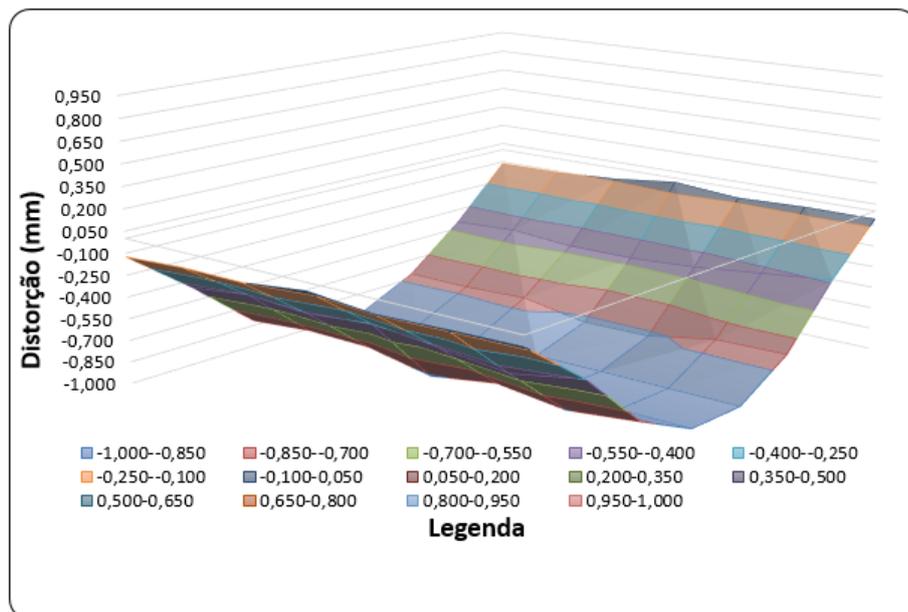


Figura 20: Corpo de prova 28: deslocamento da tocha empurrando; sentido de laminação transversal; sem fixação; tecimento linear; frequência de 3 Hz.

Com o propósito de aprimorar a percepção das distorções angulares com influência do parâmetro sentido de laminação, foram comparados os corpos de prova 22 e 29. As distorções angulares podem ser conferidas através das Figuras 21 e 22, onde visualiza-se que as menores distorções foram encontradas no corpo de prova com sentido de laminação transversal ao cordão de solda.

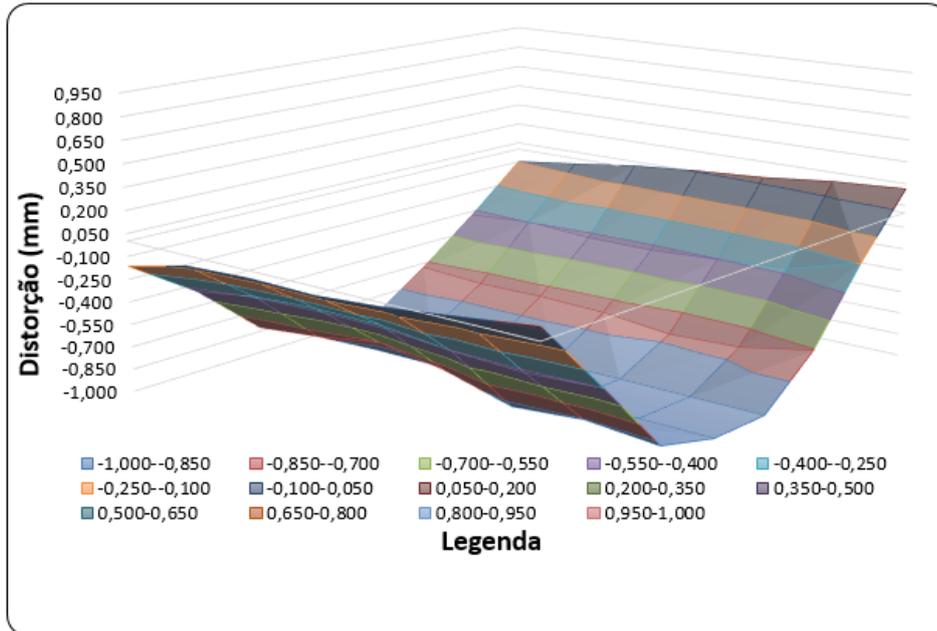


Figura 21: Corpo de prova 22: deslocamento da tocha empurrando; sentido de laminação longitudinal; sem fixação; tecimento linear; frequência de 2,5 Hz.

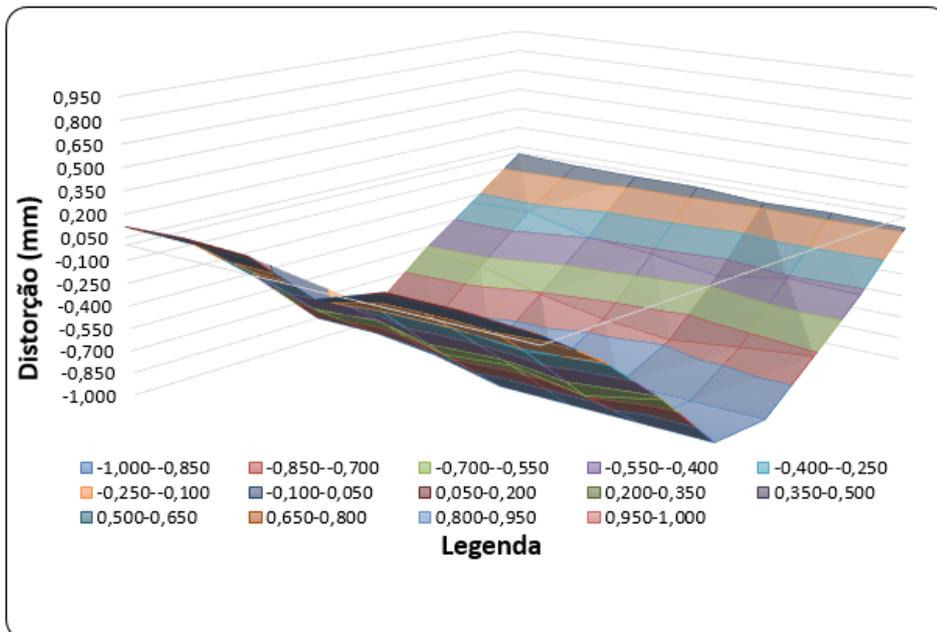


Figura 22: Corpo de prova 29: deslocamento da tocha empurrando; sentido de laminação transversal; sem fixação; tecimento onda senoidal; frequência de 2 Hz.

Também foram comparados os corpos de prova 7 e 10, com o intuito de melhorar a visualização da influência do uso da fixação dos componentes na distorção angular. Percebe-se nas Figuras 23 e 24, que é relevante o fato de que com o uso de fixação durante a soldagem, é possível reduzir grande parte da distorção, sendo a diferença de aproximadamente 1,0 mm.

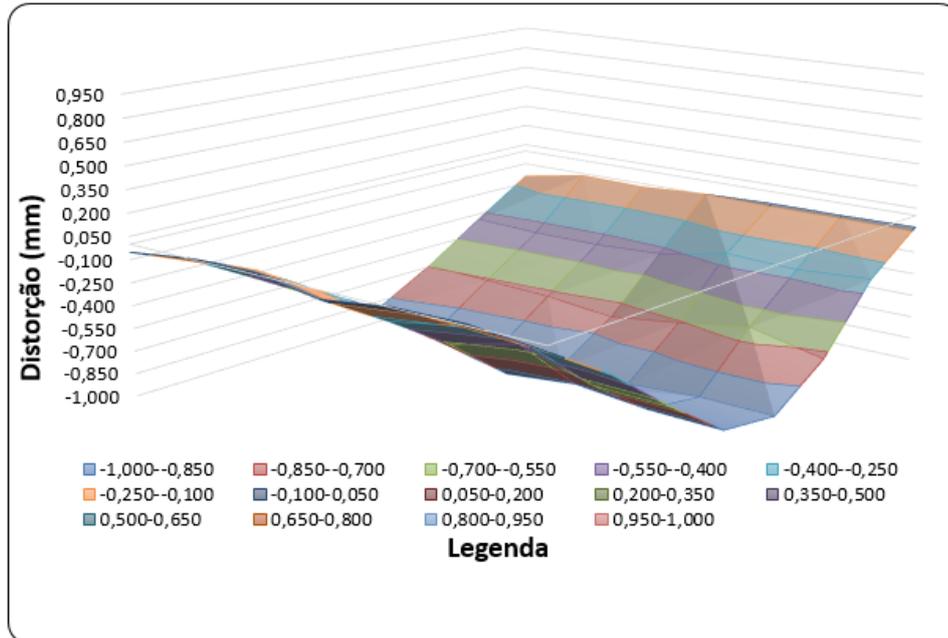


Figura 23: Corpo de prova 7: deslocamento da tocha puxando; sentido de laminação longitudinal; sem fixação; tecimento linear; frequência de 2 Hz.

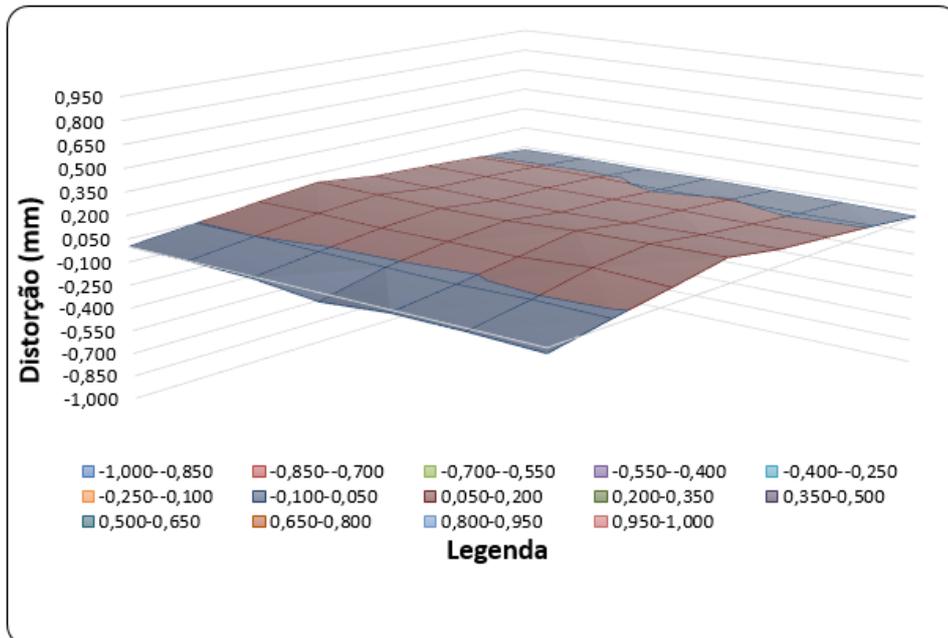


Figura 24: Corpo de prova 10: deslocamento da tocha puxando; sentido de laminação transversal; com fixação; tecimento linear; frequência de 2 Hz.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo experimental de soldagem robotizada com objetivo de avaliar a distorção ocasionada em um material de alta resistência e baixa liga, o aço DOMEX 700. Através da análise dos resultados, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- O sentido puxando de deslocamento da tocha durante a soldagem, apresentou em todos os casos analisados, as menores distorções, por isso pode-se dizer que é vantajoso em relação ao sentido empurrando de deslocamento da tocha, no intuito de atingir distorções reduzidas;
- Somente na linha 3, o sentido de laminação do material em relação ao cordão de solda, apresentou influência na redução das distorções. Com isso, considera-se que este não é um parâmetro que influencia significativamente sobre os corpos de prova;
- A utilização de fixação dos componentes durante a soldagem, foi o fator que apresentou maior influência nas distorções, visto que, foi verificada nas quatro linhas de análise do experimento;
- Considerando a análise estatística, o tecimento não apresenta influências consideráveis sobre às distorções, com exceção para a linha 3. Constata-se, a partir disso que os eventuais problemas de qualidade dimensionais na montagem de conjuntos, podem não estar intimamente ligados às técnicas de tecimento utilizadas pelo soldador ou pelo programador do robô de solda;
- A variável frequência de tecimento, não foi estatisticamente influente nas distorções, porém a frequência de valor mais elevado foi a que apresentou as menores distorções, para todas as linhas estudadas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseando-se nas dificuldades e observações do presente trabalho, os seguintes tópicos são passíveis de estudos futuros, com vistas a evolução e aprimoramento do tema aqui abordado.

- Realizar estudo de macrografia nas juntas soldadas, para verificar os seguintes fatores: melhores penetrações da solda, zonas afetadas pelo calor, largura do cordão de solda, reforço da solda.
- Executar ensaios de tração dos corpos de prova, com objetivo de analisar os maiores resultados, quanto aos limites de resistência à tração.

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.

ANAWA, E. M.; OLABI, A. G. Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components. **Optics & Laser Technology**, v. 40, p. 379–388, 2008.

BARROS, M. R. A. **Estudo da Automação de Células de Manufatura para Montagens e Soldagem Industrial de Carrocerias Automotivas.** 2006. Tese de Doutorado. Dissertação submetida à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, São Paulo, 2006.

BRACARENSE, A. Q.; FELIZARDO, I. **Influência do ângulo da tocha e do sentido de soldagem no crescimento colunar e na penetração de cordões de solda realizados com o processo GMAW robotizado.** 2003. Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Mecânica – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, 2003.

_____. **Apostila de Soldagem robotizada.** 2008. Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Mecânica – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, 2008.

CARBAS, R. J. C. **Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2008.

CARVALHO, R. S. et al. **Estudo sobre a influência da frequência de tecimento nas características dos cordões em operações de revestimentos de modo automatizado.** 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. Caxias do Sul, 2011.

CORAINI, R. **Soldagem GMAW-P robotizada de alumínio: Influência do tipo de chanfro, tecimento e sentido de laminação na distorção angular.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2011.

FRAGA, F. E. N. **Proposta de modelo para caracterizar susceptibilidade a distorção devido a soldagem em chapas de alumínio.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

GORNI, A.A. **Engenharia Microestrutural das chapas de aços avançados de alta resistência.** Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica, Porto Alegre 2008.

MODENESI, P. J. **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico,** Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

_____. **Técnica Operatória da Soldagem SMAW,** Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

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

PEREZ, F. R. C. **A Influência da temperatura de pré-aquecimento e tectimento na microestrutura e propriedades mecânicas na soldagem MIG/MAG Robotizada de aços SAE 8620 com ABNT LN28.**2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2007.

SÁBIO, A. D. **Estudo da viabilidade operacional do processo de soldagem MAG com alimentação adicional de arame frio.**2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

SANTOS, F. J. **Soldagem de Alumínio: Influencia dos parâmetros de pulso na distorção angular.**2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2009.

SOARES, H.C.G. **Estudo de sequência de soldagem para redução e eliminação de distorções.**2006. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Belo Horizonte, 2006.

SSAB. **Certificado de propriedades mecânicas e propriedades químicas do aço DOMEX 700.** Araucária: SSAB Swedish Steel, 2015. (Boletim Técnico, 15421514).

SUMIG, 2015. Disponível em:<<http://www.sumig.com//produtos/ver/robotica>>. Acesso em: 24 setembro 2015.

APÊNDICE A – AMPLITUDES DAS LINHAS

Ordem Experimental	Amplitude Linha 1 (mm)	Amplitude Linha 2 (mm)	Amplitude Linha 3 (mm)	Amplitude Linha 4 (mm)
1	0,064	0,068	0,092	0,063
2	0,052	0,188	0,096	0,093
3	0,044	0,117	0,080	0,147
4	0,031	0,119	0,179	0,112
5	0,053	0,120	0,134	0,099
6	0,018	0,111	0,065	0,117
7	0,064	0,937	0,883	0,851
8	0,091	1,049	0,908	0,879
9	0,060	0,763	0,710	0,816
10	0,031	0,130	0,074	0,137
11	0,016	0,192	0,101	0,150
12	0,016	0,235	0,093	0,142
13	0,069	1,000	0,771	0,711
14	0,034	0,900	0,815	0,763
15	0,072	0,882	0,667	0,710
16	0,310	0,807	0,883	0,710
17	0,075	0,863	0,669	0,657
18	0,114	1,001	0,706	0,824
19	0,328	1,046	1,147	1,035
20	0,088	0,979	0,968	0,863
21	0,080	0,806	0,730	0,799
22	0,244	1,363	1,255	1,122
23	0,179	1,131	1,061	1,139
24	0,110	1,087	0,808	0,933
25	0,058	0,082	0,076	0,073
26	0,052	0,177	0,162	0,156
27	0,133	0,165	0,106	0,096
28	0,057	1,108	1,042	0,979
29	0,080	1,144	0,897	1,031
30	0,257	1,026	0,881	0,929
31	0,050	0,148	0,091	0,126
32	0,079	0,186	0,068	0,136
33	0,061	0,139	0,091	0,138
34	0,031	0,129	0,115	0,129
35	0,050	0,227	0,159	0,174
36	0,043	0,136	0,078	0,107