

Investigação da influência do sentido e sequência de soldadura nas distorções do processo GMAW

LUCAS MARTINS GARCIA

Relatório Final da Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em
ENGENHARIA INDUSTRIAL

Bragança

2020

Investigação da influência do sentido e sequência de soldadura nas distorções do processo GMAW

LUCAS MARTINS GARCIA

Relatório Final da Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em
ENGENHARIA INDUSTRIAL

Orientador do Instituto Politécnico de Bragança:
Prof.º Dr. João Eduardo Pinto Castro Ribeiro
Orientadora do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais:
Prof.ª Dr.ª Ivanilza Felizardo

Bragança

2020

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus pais Vandyck e Creuza pelo amor incondicional, dedicação e educação que sempre me proporcionaram. Serei eternamente grato pelo imenso esforço e pelas dificuldades que enfrentaram para que eu pudesse seguir os meus sonhos.

Ao Prof. Dr. João Ribeiro, pelos ensinamentos, por todo apoio, confiança, dedicação e amizade durante o período da elaboração deste trabalho.

À Prof. Dra. Ivanilza Felizardo que, mesmo distante, esteve presente nos momentos cruciais, auxiliando em soluções que permitiram a continuidade deste trabalho.

Ao Instituto Politécnico de Bragança e ao Brigantia Ecopark pela disponibilidade dos equipamentos e materiais, pela oportunidade e confiança.

Aos professores do CEFET-MG e do IPB pelo aprendizado e aos técnicos do Laboratório de Tecnologia Mecânica da ESTiG, o qual prestaram apoio técnico nos momentos necessários.

Aos colaboradores do SRI, por proporcionarem o programa de dupla diplomação, o qual me permitiu adquirir experiências acadêmicas, pessoais e profissionais extraordinárias.

À Verônica, por todo carinho, amor e cumplicidade. Obrigado pelo apoio incondicional, incentivo e companheirismo de todos esses anos, por ser meu porto seguro e por sempre estar ao meu lado, inclusive nos momentos difíceis. Pela imensa paciência e por fazer os meus dias muito melhores e mais leves.

À minha irmã Carolina, por todo companheirismo e amizade durante a vida, pelos ensinamentos sociais e por influenciar positivamente na construção do meu caráter.

Aos meus grandes amigos Álvaro, Antonelli, Arthur, Bruno, Caio, Douglas, Edgard, Everton, Filipe, Gabriel, Glauco, João, Kaíque, Marco, Montillo, Nathalya, Paulo, Rogério, Samuel e Túlio pela amizade sincera e pelos momentos memoráveis durante a trajetória acadêmica no CEFET-MG e no IPB. As muitas histórias geradas e risadas ao longo dos cursos tornaram tudo muito mais gratificante.

A todos, meu sincero muito obrigado.

*“A idéia de perfeição constitui
uma imperfeição humana”*

(Carlos Drummond de Andrade – O avesso das coisas, 1990)

Resumo

A utilização do processo de soldadura em escala industrial tornou-se expressiva com o passar dos anos e, atualmente, está entre os principais processos de união de materiais metálicos. Ao longo da soldadura ocorrem alterações estruturais e metalúrgicas nas proximidades da junta. As tensões térmicas e distorções geométricas são majoritariamente indesejáveis e complexas de serem previstas com precisão. Utilizando como material de base o aço S235JR, realizou-se experimentos laboratoriais por meio do processo GMAW com diferentes sequências de soldadura, tendo como o objetivo a investigação da influência da direção e do sentido nas distorções dos provetes. Para a aferição das distorções, aplicou-se uma metodologia utilizando equipamentos de identificação das coordenadas no espaço operacional com precisão metrológica e posteriormente aplicou-se uma segunda metodologia por meio de equipamentos analógicos com o objetivo de compará-las e verificar a eficiência das metodologias. Por meio das análises metrológicas e estatísticas, constatou-se que a direção de soldadura foi um fator significativo para a soldadura sobre chapas, enquanto para as soldaduras em juntas de topo o fator sentido mostrou-se influenciar significativamente as distorções finais. Como resultado da comparação entre as metodologias, ambas as obtiveram resultados semelhantes e provaram ser eficazes em identificar os padrões de distorções.

Palavras-chave: distorções, sequência de soldadura, tensões residuais, soldadura, GMAW, multipasses, juntas de topo

Abstract

The use of the welding procedure in an industrial scale has become expressive over the years and currently is between the main joining processes. Along the welding occurs structural and metallurgical changes nearby the joint. The thermal stresses and geometrical distortions are mostly undesirable and complicated to be precisely foreseen. Using as a base material the S235JR steel, were performed laboratory experiments by GMAW process with different welding sequences, having as an aim the investigation of the influence of direction and orientation in the distortion of the samples. For the measurement of the distortions, it was applied a methodology using equipment to identify the coordinates in the operational space with metrological precision and posteriorly it was applied a second methodology through analogical equipment with the aim of making their comparison and to verify the efficiency of the methodologies. Through metrological and statistical analysis, it was found that the welding direction was a significant factor for the bead-on-plate welding, while for the butt welding, the orientation factor was shown to significantly influence the final distortions. As a result of the comparison between the methodologies, both obtained similar results and proved to be effective in identifying the patterns of distortions.

Keywords: welding distortion, welding sequence, residual stress, welding, GMAW, multipass, butt joint.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS.....	XIV
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.1.1 Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO II.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 SOLDADURA: CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	4
2.2 SOLDADURA GMAW.....	5
2.2.1 Aplicações.....	6
2.2.2 Equipamentos.....	6
2.2.2.1 Equipamento robotizado.....	7
2.3 OPERACIONALIZAÇÃO E VARIÁVEIS DO PROCESSO.....	8
2.3.1 Técnica operatória.....	14
2.4 TENSÕES RESIDUAIS E DISTORÇÕES.....	15
2.4.1 Tensões residuais.....	18
2.4.2 Distorções.....	19
2.4.2.1 Soldadura multipasses.....	22
2.4.3 Sequência de soldadura.....	25
2.4.4 Efeito dos parâmetros nas distorções.....	27
CAPÍTULO III.....	29
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	29
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	30

3.1.1	Equipamento de soldadura.....	30
3.1.2	Metal de base e metal de adição	31
3.1.3	Gás de proteção.....	33
3.1.4	Equipamento metrológico computadorizado	33
3.1.4.1	C-Track.....	33
3.1.4.2	MetraSCAN 3D.....	34
3.1.4.3	HandyPROBE	35
3.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	36
3.2.1	Soldadura sobre chapas (I).....	36
3.2.1.1	Preparação das superfícies	37
3.2.1.2	Processo de soldadura sobre chapas.....	37
3.2.1.3	Metrologia analógica.....	39
3.2.1.4	Metrologia computadorizada.....	40
3.2.2	Soldadura multipasses com chanfro em V nas juntas de topo (II).....	42
3.2.2.1	Preparação das superfícies	43
3.2.2.2	Processo de soldadura multipasses em juntas de topo	43
3.2.2.3	Metrologia computadorizada.....	45
3.2.3	Soldadura em juntas de topo nas chapas finas (III)	45
3.2.3.1	Preparação das superfícies	46
3.2.3.2	Processo de soldadura em juntas de topo	46
3.2.3.3	Metrologia computadorizada.....	48
3.3	TRATAMENTO DE DADOS	48
3.3.1	Rotação das matrizes na soldadura em juntas de topo (Grupo III).....	49
3.3.2	Análise estatística.....	49
3.3.3	Comparação entre metodologias metrológicas	50
CAPÍTULO IV.....		51
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51

4.1	INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS SEQUÊNCIAS DE SOLDADURA NAS DISTORÇÕES.....	51
4.1.1	Soldadura sobre chapas (I).....	51
4.1.1.1	Comparação entre sentidos de soldadura (Único x alternado).....	52
4.1.1.2	Comparação entre direção de soldadura (Longitudinal x Transversal).....	54
4.1.1.3	Comparação e interação entre direção e sentido de soldadura.....	56
4.1.2	Soldadura multipasses com chanfro em V nas juntas de topo (II).....	57
4.1.2.1	Comparação entre sentidos de soldadura (Único x alternado).....	58
4.1.3	Soldadura juntas de topo nas chapas finas (III)	60
4.1.3.1	Comparação entre sequências de soldadura (SS x SR x SC)	62
4.2	COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS METROLÓGICAS	66
	CAPÍTULO V.....	68
5.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	68
5.1	CONCLUSÕES.....	68
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
	ANEXOS	77
	ANEXO I: Matrizes e gráficos de superfície com projeção	77
	ANEXO II: Projeto da mesa de granito utilizada na metodologia computadorizada	116
	ANEXO III: Relatórios estatísticos	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de classificação de soldadura a arco elétrico. Adaptado de [8]	5
Figura 2: Esquema genérico do equipamento para soldadura GMAW [15].....	7
Figura 3: Desenho esquemático do processo de soldadura GMAW [17].....	8
Figura 4: Polaridade reversa (a) e polaridade direta (b) na soldadura GMAW	9
Figura 5: Efeito da tensão nos parâmetros de penetração, reforço e largura do cordão de solda [14].....	10
Figura 6: Efeito da corrente nos parâmetros de penetração, reforço e largura do cordão de solda [14].....	11
Figura 7: Efeito da velocidade de soldadura nos parâmetros de penetração, reforço e largura do cordão [14].....	12
Figura 8: Influência do <i>stick-out</i> na geometria do cordão de solda [18]	13
Figura 9: Fases de auto regulagem, quando se altera a distância tocha/metal-base [13].....	13
Figura 10: Posições longitudinais da tocha [11]	15
Figura 11: Tensões residuais longitudinais (L) e transversais (T) em uma junta de topo [25] 16	
Figura 12: Representação esquemática de distorções em juntas de topo. Adaptado de [23]... 17	
Figura 13: Tensões residuais x Distorções em função do grau de restrição [33]	18
Figura 14: Distribuição da temperatura e da tensão durante a soldadura sobre chapas. Adaptado de [23]	19
Figura 15: Variações dimensionais fundamentais que ocorrem em soldaduras. Adaptado de [23].....	20
Figura 16: Distorção rotacional em juntas de topo: (a) SMAW e (b) SAW. Adaptado de [23]	21
Figura 17: Deflexão de uma barra em um processo de soldadura em movimento longitudinal em função do tempo. Adaptado de [23].....	21
Figura 18: Efeito do tempo na contração e temperatura (a) Contração x Tempo e (b) Temperatura x Tempo. Adaptado de [23].....	23
Figura 19: Exemplos de ciclos térmicos experimentados por um ponto da zona afetada pelo cordão perto da raiz de uma solda multipasse topo-a-topo [36]	23

Figura 20: Aumento da contração transversal na soldagem multipasse de uma junta de topo: (a) Relação entre a quantidade de material depositado por unidade de comprimento de solda, w , e contração transversal, S e (b) Relação entre $\text{Log } w$ e S . Adaptado de [23]	24
Figura 21: Sequências de soldadura utilizadas para reduzir tensões residuais e distorções. Adaptado de [23].....	25
Figura 22: Fluxograma da metodologia laboratorial	30
Figura 23: Máquina de soldadura MIG 453 Modular	31
Figura 24: Equipamento CNC com adaptação da tocha de soldadura.....	31
Figura 25: Gás de proteção utilizado: Ar 82% e CO ₂ 18%.....	33
Figura 26: Equipamento de aquisição de coordenadas geométricas (C-Track 780).....	34
Figura 27: Equipamento C-Track e MetraSCAN 3D de digitalização geométrica	35
Figura 28: Equipamento portátil para medição de coordenadas (HandyPROBE).....	35
Figura 29: Refletores ópticos magnéticos.....	35
Figura 30: Distribuição recomendada dos refletores ópticos.....	36
Figura 31: Exemplificação da malha de controle: (a) Dimensões da malha de controle, (b) identificação das linhas e colunas da malha de controle	37
Figura 32: Sentido e sequência da execução dos cordões da soldadura: (a) L[u], (b) L[a].....	38
Figura 33: Sentido e sequência da execução dos cordões da soldadura: (a) T[u], (b) T[a].....	38
Figura 34: Equipamentos de metrologia utilizados para aferição das distorções dos corpos de prova	40
Figura 35: Arranjo experimental para medição das distorções dos corpos de prova.....	41
Figura 36: Malha de uma amostra da sequênica T[u] digitalizada por meio do MetraSCAN.41	
Figura 37: Exemplificação da malha de controle criada nos corpos de prova de soldadura multipasses em juntas de topo.....	42
Figura 38: Caracterização geométrica do chanfro realizado.....	42
Figura 39: Preparação pré-soldadura dos corpos de prova para soldadura multipasses em juntas de topo.....	43
Figura 40: Disposição dos cordões para o preenchimento do chanfro com sentido de corte indicado.....	44
Figura 41: Sequência e sentido de passes a serem executados na soldadura multipasses em juntas de topo	45
Figura 42: Exemplificação da malha de controle criada nos corpos de prova de soldadura em juntas de topo	46
Figura 43: Preparação dos corpos de prova para soldadura em juntas de topo	46

Figura 44: Soldadura em junta de topo: SS (a), SR (b), SC (c)	47
Figura 45: Arranjo sem restrições de movimento durante o processo de soldadura em juntas de topo	48
Figura 46: Esquema de normalização do plano de referência	49
Figura 47: Gráficos de deformações: (a) L[u], (b) L[a], (c) T[u], (d)T[a].....	52
Figura 48: Gráficos de dispersão de L[u] x L[a] – Seções A ~ H.....	52
Figura 49: Gráficos de dispersão de L[u] x L[a] – Seções 1 ~ 4	53
Figura 50: Gráficos de dispersão de T[u] x T[a] – Seções A ~ H.....	53
Figura 51: Gráficos de dispersão de T[u] x T[a] – Seções 1 ~ 4	53
Figura 52: Gráficos de dispersão de L[u] x T[u] – Seções A ~ H	54
Figura 53: Gráficos de dispersão de L[u] x T[u] – Seções 1 ~ 4	54
Figura 54: Gráficos de dispersão de L[a] x T[a] – Seções A ~ H.....	55
Figura 55: Gráficos de dispersão de L[a] x T[a] – Seções 1 ~ 4	55
Figura 56: Gráficos das médias de deslocamento das sequências L[u], L[a], T[u] e T[a]	56
Figura 57: Gráficos de deformações: (a) M[u], (b) M[a].....	58
Figura 58: Gráfico de dispersão de M[u] x M[a] – Seções A ~ H.....	58
Figura 59: Gráfico de dispersão de M[u] x M[a] – Seções 1 ~ 4.....	59
Figura 60: Gráficos das médias de deslocamento das sequências M[u] e M[a]	60
Figura 61: Gráficos de deformações: (a) SS, (b) SR e (c) SC	61
Figura 62: Gráficos de dispersão de SS x SR x SC – Seções A ~H	62
Figura 63: Gráficos de dispersão de SS x SR x SC – Seções 1 ~8	63
Figura 64: Gráficos das médias de deslocamento das sequências SS, SR e SC	64
Figura 65: Gráfico <i>boxplot</i> das diferenças entre metodologias metrológicas.....	66
Figura 66: Comparação dos gráficos de superfície do provete T[u]_1: (a) Metodologia computadorizada, (b) Metodologia analógica.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixas de corrente utilizáveis com arames de diferentes diâmetros para aço carbono e baixa liga [3]	12
Tabela 2: Efeitos das variáveis de procedimento na contração transversal em juntas de topo [23].....	25
Tabela 3: Sequências de deposição de passes durante o processo de soldadura em juntas de topo [38].....	26
Tabela 4: Composição química do aço S235JR [47]	32
Tabela 5: Composição química do eletrodo AWS 5.18 ER 70S-6 [48]	32
Tabela 6: Propriedades mecânicas do eletrodo AWS 5.18 ER 70S-6 [49].....	32
Tabela 7: Parâmetros recomendados pela ESAB para o eletrodo AWS 5.18 ER 70S-6 [50] .	32
Tabela 8: Parâmetros utilizados na soldadura sobre chapas	38
Tabela 9: Resultados de calibração no VXEelements do C-Track e HandyProbe.....	40
Tabela 10: Parâmetros utilizados na soldadura multipasses em juntas de topo.....	44
Tabela 11: Parâmetros utilizados na soldadura em juntas de topo	47
Tabela 12: Somatório das distorções dos provetes na soldadura sobre chapas	56
Tabela 13: Teste de efeitos entre fatores Direção e Sentido (ANOVA).....	57
Tabela 14: Somatório das distorções dos provetes na soldadura multipasses	59
Tabela 15: ANOVA entre os sentidos da soldadura multipasses	60
Tabela 16: Somatório das distorções dos provetes da soldadura em Juntas de Topo.....	64
Tabela 17: ANOVA entre as sequências de soldadura em juntas de topo.....	65
Tabela 18: Teste Tukey – Comparações múltiplas entre as sequências	65

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ANOVA	análise de variância
AWS	<i>American Welding Society</i>
CC-	soldadura em corrente contínua com o eletrodo no polo negativo
CC+	soldadura em corrente contínua com o eletrodo no polo positivo
ESTiG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
FCAW	sigla para o termo <i>Fluxed-Cored Arc Welding</i>
GMAW	sigla para o termo <i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	sigla para o termo <i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
h	espessura
I_b	corrente de base no processo MIG Pulsado (A)
I_p	corrente de pulso processo MIG Pulsado (A)
I_s	valor instantâneo ou médio da corrente ao longo da soldadura
L	largura
L[a]	sequência de soldadura longitudinal com sentido alternado
L[u]	sequência de soldadura longitudinal com sentido único
LERM	Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais
LMCM	Laboratório de Materiais de Construção Mecânica
LTM	Laboratório de Tecnologia Mecânica
M[a]	sequência de soldadura multipasses com sentido alternado
M[u]	sequência de soldadura multipasses com sentido único
MAG	sigla para o termo <i>Metal Active Gas</i>
MIG	sigla para o termo <i>Metal Inert Gas</i> ;
MIG-P	denominação do processo MIG/MAG Pulsado;
PAW	sigla para o termo <i>Plasma Arc Welding</i>
S	contração transversal
SAW	sigla para o termo <i>Submerged Arc Welding</i>
SC	sequência de soldadura de passe corrido
SMAW	sigla para o termo <i>Shielded Metal Arc Welding</i>
SR	sequência de soldadura de passes em retrocesso
SS	sequência de soldadura simétrica
T	temperatura

t	tempo
T[a]	seqüência de soldadura transversal com sentido alternado
T[u]	seqüência de soldadura transversal com sentido único
U_a	valor instantâneo ou médio da tensão do arco ao longo da soldadura
V_{alim}	velocidade de alimentação do arame eletrodo
V_s	velocidade de soldadura
w	material depositado por unidade de comprimento de solda
ZAC	zona afetada pelo calor
δ	deflexão
δf	distorção

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A soldadura é um dos processos de uniões microscópicas de metais mais utilizados em diversos ramos da atividade industrial. Dentre os procedimentos mais comuns, está o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), o qual possui características favoráveis para a robotização, como ótima estabilidade do arco, a possibilidade de solda em todas as posições e de passes sucessivos sem limpeza intercalar.

No decorrer do processo de soldadura, mudanças estruturais e metalúrgicas ocorrem à medida que a soldadura avança ao longo de uma junta. As regiões mais aquecidas tendem a dilatar, no entanto, são restringidas pelas partes adjacentes com temperaturas inferiores, ocasionando deformações elásticas e plásticas concentradas nas regiões aquecidas. No final do processo, em consequência das deformações plásticas localizadas, tensões internas permanecem na junta soldada, podendo provocar distorções geométricas.

Para obter-se uma maior confiabilidade das estruturas metálicas, deve-se considerar os efeitos da tensão residual e as distorções durante a fase de projeto. O controle destes fenômenos pode ser alcançado por meio de várias técnicas, dentre elas tem-se a escolha da sequência de soldadura e a sequência de deposição dos passes e cordões. As sequências desejadas são as que minimizam a ocorrência de tensões residuais e distorções, pois estas podem influenciar diretamente na funcionalidade e resistência do conjunto soldado.

A aferição das distorções geométricas ocasionadas após o processo de soldadura é, na maioria das vezes, laboriosa e de alto custo. Silva [1] e Marção [2] propuseram uma metodologia simplificada e de baixo custo para aferir com eficiência distorções em chapas.

Por meio de equipamentos de captação de pontos no espaço de alta precisão, utilizou-se no presente trabalho uma metodologia semelhante para realizar uma comparação de resultados dos dois métodos com o objetivo de verificar se o método analógico de baixo custo foi capaz de identificar as distorções dos provetes com eficiência.

Conjuntamente com a comparação entre as metodologias metrológicas, realizou-se uma investigação sobre a influência da sequência de soldadura nas distorções geométricas em soldaduras sobre chapas, multipasses com chanfro em V e em juntas de topo com chapas finas.

Uma vez que, na maioria dos casos, estes fenômenos ocasionados por tensões térmicas são indesejáveis, buscar um maior entendimento sobre a influência das sequências de soldadura

torna-se essencial para prevenir, controlar ou corrigir as tensões térmicas e distorções geométricas prejudiciais dentro do ambiente industrial,

1.1 OBJETIVOS

Investigação da influência do sentido e sequência de soldadura em distorções no processo GMAW automatizado e comparação entre metodologias metrológicas para aferição de distorções geométricas proposta por Silva [1] e Marção [2] com metodologia proposta no presente trabalho.

1.1.1 *Objetivos específicos*

I – Soldadura sobre chapas

- Investigar a influência da sequência de soldadura na geração de distorções variando a direção (transversal e longitudinal) e o sentido (único ou alternado) no processo GMAW em chapas de 10 mm de aço S235JR;
- Comparar a metodologia de medição analógica de baixo custo proposta por Silva [1] e Marção [2] com a metodologia metrológica computadorizada, proposta no presente trabalho.

II - Soldadura multipasses com chanfro em V em juntas de topo

- Investigar a influência da sequência de soldadura em juntas de topo na geração de distorções variando o sentido do passe (único ou alternado) no processo GMAW multipasses em chapas de 10 mm de aço S235JR;

III – Soldadura em juntas de topo em chapas de 3 mm

- Investigar a influência da sequência na geração de distorções de acordo com a classificação de soldadura em chapas de 3 mm do aço S235JR, comparando a sequência simétrica (do centro para as extremidades), com a sequência de passes em retrocesso (com direção e progressão de passes opostas) e com passes em sequência corrida.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica de tópicos importantes para a compreensão do trabalho, expondo um resumo teórico sobre conceitos e técnicas já validadas.

2.1 SOLDADURA: CARACTERÍSTICAS GERAIS

A união dos metais pode ser classificada através da ação de duas principais forças, as macroscópicas e as microscópicas. As uniões concebidas por forças macroscópicas possuem a resistência da junta dada pela resistência ao corte acrescida das forças de atrito entre as superfícies que estão em contato. No caso das uniões concebidas pelas forças microscópicas, as junções ocorrem devido às interações entre os átomos ou moléculas dos materiais a serem unidos, acrescidas ou não de um material adicional na junção [3], [4].

Dentre os processos de uniões microscópicas, a soldadura é o mais utilizado industrialmente na junção de metais devido a sua produtividade, confiabilidade e custo [5], [6], [7]. Podendo o mesmo, por definição, ser classificado como um procedimento que tem como objetivo a união localizada de materiais através do estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às forças interiores dos materiais a serem unidos [3].

Os processos de soldadura podem ser classificados em soldadura por pressão e soldadura por fusão. Sendo o primeiro concebido por procedimentos como forjamento, explosão, ultrassom, fricção, entre outros métodos. O grupo de soldadura por fusão pode ser subdividido em outros grupos, dispondo entre os mesmos o processo de soldadura a arco elétrico, sendo este o mais utilizado atualmente no meio industrial [3].

Os processos de soldadura por fusão a arco elétrico, no qual a solubilidade ocorre na fase líquida, podem ser classificados de acordo com a proteção gasosa utilizada. Esta classificação pode ser vista de forma simplificada conforme o fluxograma da Figura 1 [8].

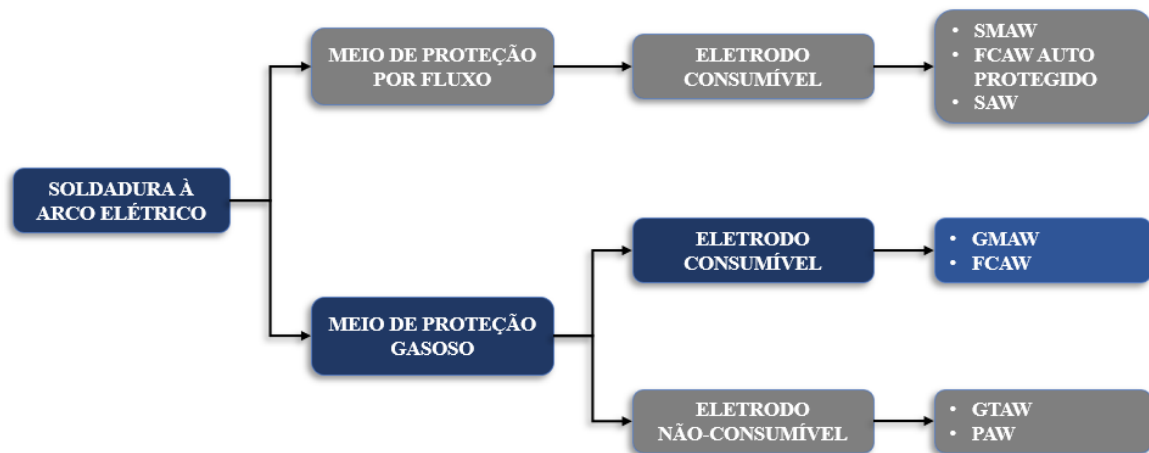


Figura 1: Fluxograma de classificação de soldadura a arco elétrico. Adaptado de [8]

2.2 SOLDADURA GMAW

Entre os processos de soldadura a arco, um dos mais utilizados atualmente na indústria é o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), comumente conhecido como MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*) [9], [10].

O desenvolvimento dos conceitos elementares da soldadura GMAW ocorreu por volta de 1920 com o surgimento da sua viabilidade comercial apenas em 1948 [8]. Primeiramente, utilizou-se o procedimento para soldadura de alumínio como metal de base, tendo gás inerte como fluxo de proteção gasosa. Posteriormente, com avanços tecnológicos e experimentais, evoluiu-se o processo possibilitando-o para uma ampla variedade de materiais, utilizando também como fluxo de proteção gases ativos e misturas de gases [11].

A soldadura GMAW consiste em um procedimento no qual o arco elétrico é estabelecido entre o metal de base e o eletrodo. Sendo o eletrodo um consumível em forma de arame que alimenta continuamente o cordão de solda [9], [11].

Durante o processo, um fluxo gasoso proporciona a proteção de modo a evitar a contaminação da poça de fusão e do eletrodo, podendo o mesmo ser composto por gás inerte, ativo ou uma mistura. Além da função protetora, o gás também é responsável pelo meio ionizante, concedendo as propriedades de estabilidade do arco e influenciando na fusão do metal de base, no tipo de transferência metálica e no consumo do arame-eletrodo [12].

2.2.1 Aplicações

Atualmente o processo GMAW é amplamente utilizado na indústria, pois além de possuir um custo atrativo quando comparado os demais processos de soldadura, é possível produzir cordões de excelente qualidade em elevadas velocidades. Entre suas principais características, a capacidade da alta taxa de deposição pode ser citada como uma das mais relevantes, visto que além de melhorar a produtividade devido ao aumento da velocidade do processo, ocorrerá menos distorções no metal de base devido à distribuição de calor mais efetiva [11].

Quando analisado em larga escala, o processo GMAW dispõe de outras características convenientes para o aumento da produtividade e redução de custos de produção. Entre essas características, tem-se como exemplo a possibilidade da ausência de escória, alimentação contínua do material de adição e o aproveitamento de praticamente todo o eletrodo, que, quando comparado com as interrupções e as perdas de pontas dos eletrodos do processo SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), pode-se considerar que o GMAW possui uma grande vantagem [11].

Além disso, existe a possibilidade de execução da solda em todas as posições e em todos os metais comercialmente importantes, desde que a seleção do gás, do arame e das variáveis sejam adequadas, o que o torna um processo extremamente versátil [8].

2.2.2 Equipamentos

Durante a soldadura GMAW a manipulação da tocha pode ser realizada pelo operador ou por máquina, sendo que, em ambos, a alimentação do arame-eletrodo ocorre mecanicamente por meio do equipamento, o qual também é responsável pela velocidade de alimentação e o comprimento do arco [12], [13].

Os componentes do equipamento necessário para a soldadura GMAW podem ser observados esquematicamente na Figura 2, sendo estes compostos por:

Painel de controle: Componente do equipamento onde as configurações dos parâmetros de soldadura são selecionadas (comumente localizado em frente à fonte de energia) pelo operador [3].

Fonte de energia: Podendo ser convencional, eletromagnética ou eletrônica (modernas), cabe a fonte de energia a função de receber a energia elétrica da rede e fornecer a tensão e a corrente de soldadura para o processo. A escolha do tipo de fonte vai de acordo com

a necessidade e análise de custo/benefício, pois ela influencia diretamente na qualidade e produtividade do processo [3], [14].

Alimentador de arame: Responsável pela alimentação do eletrodo consumível por meio do conduíte, o alimentador possui a tração dos roletes realizada por um motor que empurra o arame-eléctrodo para a tocha de soldadura a uma velocidade geralmente constante. Curvas e dobras do conduíte que ligam o alimentador à tocha e variações no diâmetro do arame ou nos furos, causam resistência variável a passagem do arame. Esta resistência variável pode ocasionar oscilações indesejadas da velocidade da alimentação, dificultando assim a estabilidade do arco que conseqüentemente irá influir na geração de respingos e porosidade [3], [13], [14].

Tocha de soldadura: Consiste em um equipamento cujas principais funções são: sustentar o bico de contato (responsável pela energização do eletrodo), orientar o fluxo de proteção gasosa e o eletrodo [3], [12].

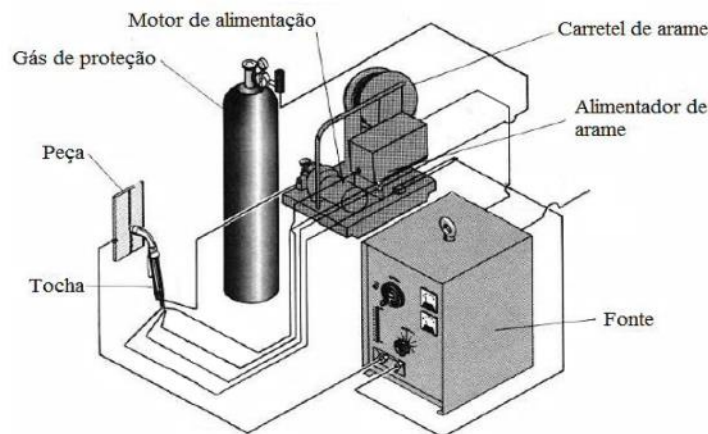


Figura 2: Esquema genérico do equipamento para soldadura GMAW [15]

2.2.2.1 Equipamento robotizado

Dispondo de características como a ótima estabilidade do arco, a possibilidade de solda em todas as posições e de passes sucessivos sem limpeza prévia, o processo possui conveniência para automatização [10], [14].

Um equipamento robotizado industrial constitui-se de um conjunto de elos conectados e articulados. Geralmente tem-se o primeiro elo vinculado a uma base fixa e o último elo (também denominado como extremidade terminal) acoplado com a tocha de soldadura. Desta

maneira, a tocha é manipulada pela movimentação da extremidade terminal, a qual é controlada pela programação realizada previamente pelo operador no robô [16].

De acordo com Bracarense, et al. [16], a sequência para programação do robô segue a seguinte sequência:

- a) Calibração da posição da tocha de soldadura;
- b) Localização dos componentes de trabalho e determinação do tipo de fonte de energia;
- c) Definição do percurso que a tocha de soldadura irá seguir e da localização dos cordões de solda;
- d) Determinação das condições de soldadura associadas com as coordenadas de movimentação do robô. Contendo nesta programação informações sobre o início (abertura do arco) e final da trajetória (extinção do arco);
- e) Refinamento da programação por meio de inspeção do desempenho e de controles básicos para soldadura.

2.3 OPERACIONALIZAÇÃO E VARIÁVEIS DO PROCESSO

O processo de abertura do arco se dá pela aproximação do eletrodo juntamente com o acionamento do gatilho (responsável também pelo início do fluxo de proteção gasosa). No instante em que a tensão criada pela fonte de energia supera a rigidez dielétrica do meio, o arco é iniciado, dando início assim a fusão do arame próximo à peça, o qual alimenta continuamente a poça de fusão. Um esquema genérico deste processo pode ser observado na Figura 3 [11].

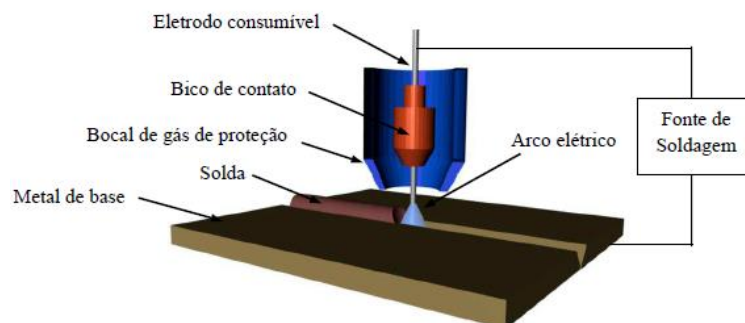


Figura 3: Desenho esquemático do processo de soldadura GMAW [17]

Segundo Marques *et al.* [3] a otimização dos parâmetros é considerada complexa de ser alcançada em soldagens utilizando o processo GMAW. Isto ocorre devido as variáveis existirem em grande quantidade e serem interdependentes.

De acordo com Machado [14], após a definição do metal de base, consumíveis e junta, primeiramente deve-se definir as variáveis consideradas fixas, como corrente, bitola do eletrodo (que será determinada de acordo com a corrente, espessura do metal de base, penetração desejada, taxa de deposição, posição de soldadura e geometria desejada do cordão) e o tipo de gás de proteção a ser utilizado.

Após a definição destas variáveis consideradas fixas, os parâmetros de soldadura ajustáveis devem ser determinados. Entre os principais, tem-se:

Polaridade: Nos polos voltaicos de um arco elétrico em corrente contínua, os fenômenos físicos que sucedem nos mesmos são distintos. A temperatura do anodo mantém-se maior que a do cátodo. Devido a este motivo, em soldagens com eletrodo consumível, a polaridade é comumente reversa, o qual o arame-eletrodo é conectado ao polo positivo (ânodo) enquanto o metal de base é conectado ao polo negativo (cátodo). Deste modo, a soldadura resulta em maior estabilidade do arco e maiores penetrações. Um desenho esquemático das diferentes polaridades pode ser observado na Figura 4, onde (a) está com polaridade reversa (CC+) e (b) como polaridade direta (CC-) [8], [12].

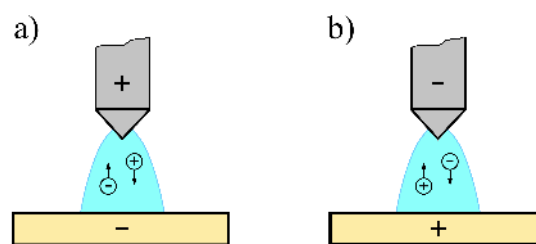


Figura 4: Polaridade reversa (a) e polaridade direta (b) na soldadura GMAW

Tensão: Influencia diretamente no comprimento do arco, na largura do cordão e no método de transferência metálica. Para ser determinada, deve-se levar em consideração principalmente a corrente de operação e o gás de proteção [3].

Em fontes de potência com curva característica tensão constante, o valor da tensão é estabelecido no equipamento. Entretanto, em fontes do tipo corrente constante, o valor da tensão será de acordo com o comprimento do arco, que é controlado pelo soldador [3].

Segundo Marques *et al.* [3], tensões elevadas podem ocasionar em cordões mais largos e com um grande número de respingos. Em situações de tensões baixas, a absorção de gases da atmosfera fica mais propensa, podendo resultar no aumento de porosidade e outros problemas associados. Instabilidade do arco, má concordância do cordão e concavidades excessivas também podem ocorrer com valores de tensões baixas.

Na Figura 5, a influência da corrente na penetração, reforço e na largura do cordão podem ser observadas de modo genérico, respectivamente.

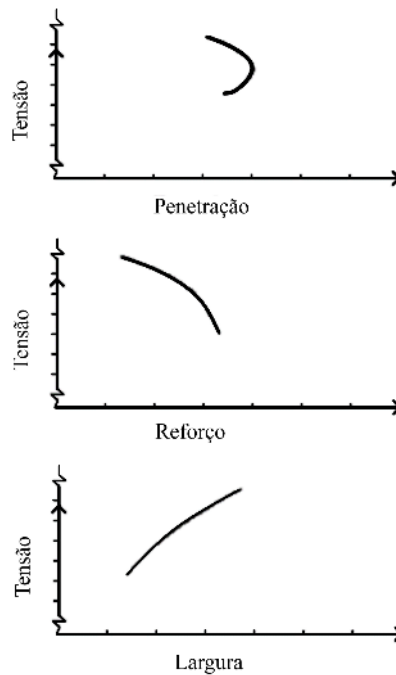


Figura 5: Efeito da tensão nos parâmetros de penetração, reforço e largura do cordão de solda [14]

Corrente: A corrente tem influência direta na profundidade da penetração, largura e reforço do cordão, taxa de deposição do material de adição, energia de soldadura e no método de transferência metálica [13].

Em fontes de potência com curva característica tensão constante, o controle da corrente é realizado de acordo com a velocidade de alimentação, tendo ambos uma relação diretamente proporcional. Já em fontes de potência com curva característica corrente constante, este controle é realizado de maneira independente [14].

Conforme indicado de maneira simplificada na Figura 6, podem ser visualizadas as influências da corrente na penetração, reforço e na largura do cordão, respectivamente.

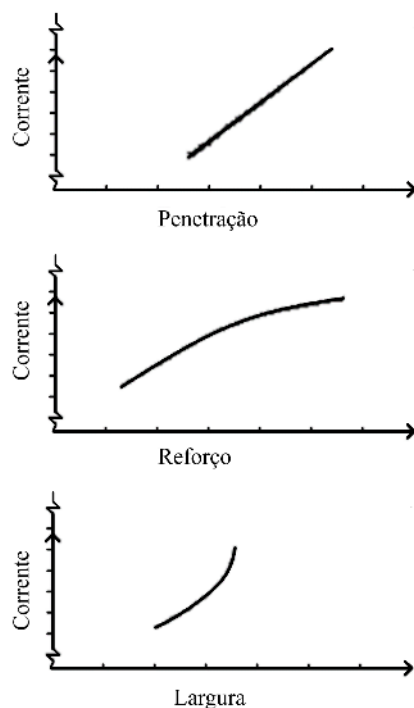


Figura 6: Efeito da corrente nos parâmetros de penetração, reforço e largura do cordão de solda [14]

Velocidade de soldadura: Além de ser um dos principais fatores relacionados a produtividade, a velocidade de soldadura também possui influência direta na velocidade de deposição e na geometria da poça de fusão [12].

Considerando os demais parâmetros estáveis, o aumento da velocidade pode causar uma menor distorção da estrutura, uma ZAC (zona afetada pelo calor) mais estreita, grãos do metal de solda mais refinados e diminuição das dimensões gerais do cordão. Porém, o seu valor em excesso pode ocasionar defeitos como as fissuras de solidificação, mordeduras, falta de fusão e/ou penetração do cordão de solda [12].

Velocidades muito baixas também são indesejáveis, pois além de influenciarem negativamente na produtividade, podem ocorrer defeitos metalúrgicos acarretados pela elevada energia de soldadura cedida para a peça [14].

De acordo com Machado [14], a penetração não é afetada de modo constante pela velocidade de soldadura, a qual alcança um valor máximo e posteriormente decresce com o aumento da velocidade. Este comportamento pode ser visualizado de maneira simplificada na Figura 7.

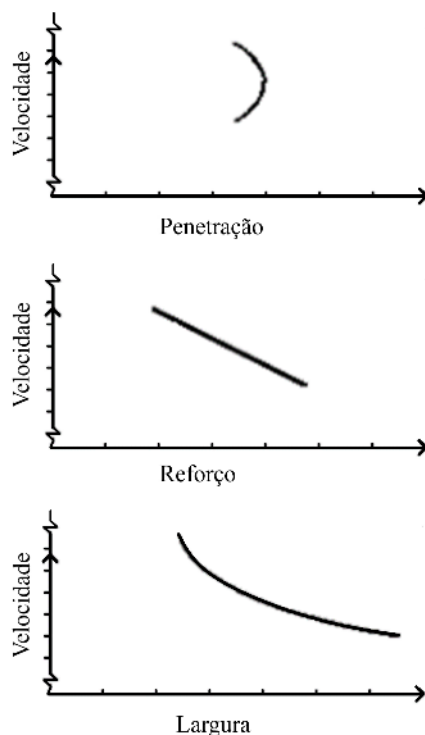


Figura 7: Efeito da velocidade de soldadura nos parâmetros de penetração, reforço e largura do cordão [14]

Diâmetro do eletrodo: A seleção do diâmetro do arame-eléctrodo é realizada principalmente em conformidade com a espessura do metal de base, da posição de soldadura, energia de soldadura – capacidade de calor que pode ser cedida à peça – e com outros fatores que possuem influência no tamanho da poça de fusão e do cordão de solda [3].

Eletrodos de diferentes diâmetros possuem uma faixa de corrente operacional apropriada para cada tipo de material. De acordo com Marques, *et al.* [3], aplicando as faixas de corrente utilizáveis em função do diâmetro e do material, conforme descrito na Tabela 1, o arco apresentará condições de operação adequadas.

Tabela 1: Faixas de corrente utilizáveis com arames de diferentes diâmetros para aço carbono e baixa liga [3]

Material	Diâmetro do eletrodo (mm)	Faixa de corrente (A)
Aço carbono e de baixa liga	0,8	70 – 180
	1,0	90 – 220
	1,2	100 – 270
	1,6	190 – 360
	2,4	280 – 490
	3,2	270 – 580

Comprimento do eletrodo: Intitulado também como *stick-out*, é comumente definido como a distância entre o último ponto de contato elétrico do eletrodo até a ponta do eletrodo ainda não fundida [3]

Um desenho esquemático da distância do comprimento energizado do eletrodo pode ser visualizado na Figura 8, onde nota-se que com o aumento do *stick-out*, a penetração pode diminuir devido a fusão antecipada do eletrodo.

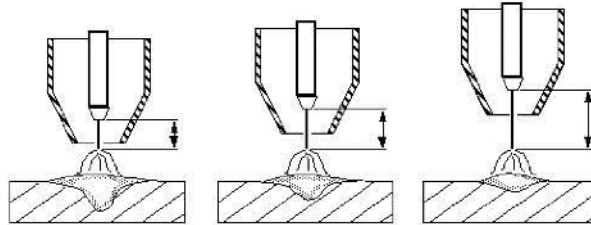


Figura 8: Influência do *stick-out* na geometria do cordão de solda [18]

O aumento da distância irá acarretar o aumento da resistência e conseqüentemente em maior aquecimento do arame por efeito Joule. Sendo assim, menor será a corrente necessária para fundir o eletrodo. Desta forma, o *stick-out* pode ser utilizado – com valor máximo adequado – como estratégia para aumentar a taxa de deposição [3].

A Figura 9 mostra as fases da autorregularem quando a distância da tocha/metal-base é alterada. No Figura 9 (a), a distância do arco, a tensão e a corrente de soldadura estão adequadas para o processo. A energia disponível nesta situação pode ser dada por $(V_s * I_s + R_1 * I_s^2)$. Ao afastar o eletrodo do metal de base – como demonstrado no Figura 9 (b) – a corrente diminui e a tensão aumenta, reduzindo a energia disponível. Devido a esta alteração da energia, a velocidade de fusão do arame-eletrodo também irá reduzir [13].

Ao reaproximar a tocha da peça – conforme pode ser observado no Figura 9 (c) – o comportamento da tensão e da corrente possuem lógica semelhante ao gráfico da Figura 9 (b), deste modo o valor da energia é novamente elevado [13].

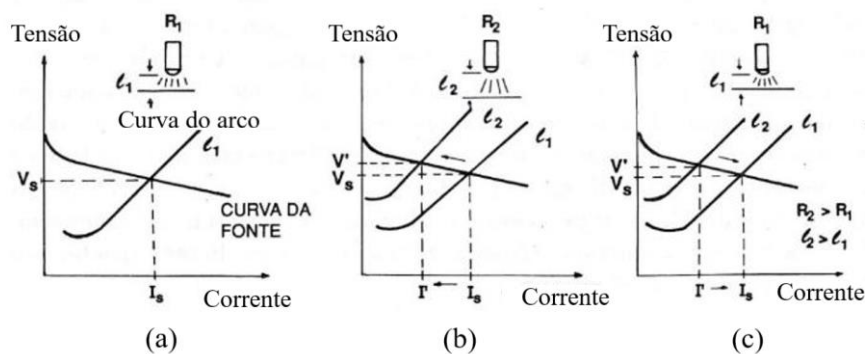


Figura 9: Fases de auto regulação, quando se altera a distância tocha/metal-base [13]

Vazão do gás: O valor da vazão deve ser suficiente para que proteja com eficiência o arco e a poça de fusão, excluindo os gases da atmosfera, além de também cumprir os efeitos desejados no caso da presença de gases ativos no fluxo [12].

Para a seleção da vazão do gás, deve ser considerado a configuração do bocal da tocha juntamente com o tipo de junta a ser soldada. O fluxo apropriado para praticamente todas as condições de soldadura varia entre 10 a 16 l/min. Valores acima deste costumam ser antieconômicos ou até mesmo ineficientes devido a turbulência que a vazão em excesso pode causar, possibilitando assim a entrada de elementos contaminantes. De acordo com o tipo de junta e a corrente utilizada, valores abaixo da vazão adequada podem ocasionar falta de proteção [12].

Em consequência da não existência de uma regra adequada para selecionar a vazão do gás de proteção, conforme recomendado por Scotti e Ponomarev [12], deve-se primeiramente utilizar a experiência e o bom senso, porém como regra prática para estimativa, pode-se configurar o valor da vazão em l/min igual ao valor do diâmetro do eletrodo multiplicado por dez.

2.3.1 Técnica operatória

Após a definição das variáveis do processo, deve-se determinar a técnica de soldadura que será utilizada e qual método de transferência desejado. Dentre as técnicas existentes, a posição da tocha é uma das que afeta diretamente as características do cordão de solda [11], [14].

Os sentidos de soldadura podem ser observados na Figura 10, onde a esquerda está utilizando a técnica “puxando” e a direita a técnica “empurrando”. Para realização da técnica puxando, deve-se posicionar a tocha de modo que o eletrodo alimente a poça de fusão com sentido contrário ao do deslocamento do arco-elétrico. Entretanto, na técnica empurrando, o eletrodo alimenta a poça no mesmo sentido movimentação do arco [11].

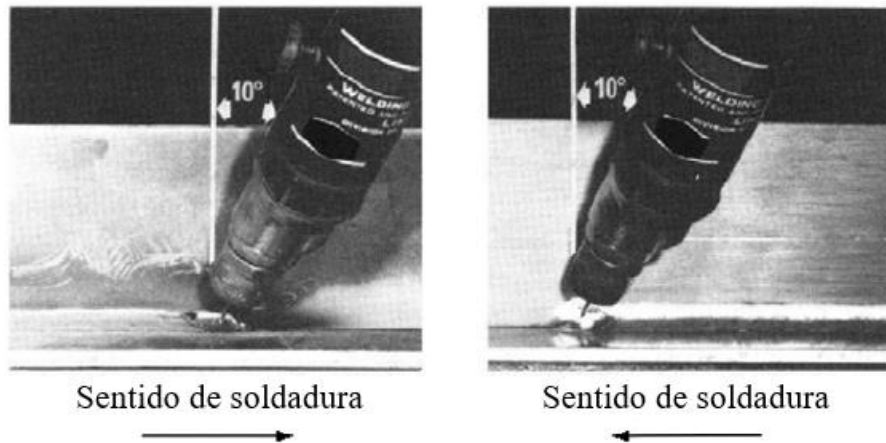


Figura 10: Posições longitudinais da tocha [11]

Em soldaduras em que o modo de transferência desejado é curto-circuito, recomenda-se que a extensão do arame-elétrodo permaneça entre 6 e 13 mm, enquanto a ponta do bico de contato mante-se alinhada com o bocal (ou no máximo 3 mm projetada). Sendo que o ângulo de posicionamento da tocha deve ser positivo (“puxando” a tocha) e estar entre 15° e 20° para situações em que a posição de soldadura seja horizontal ou vertical-descendente. Entretanto, para situações em que a e a posição de soldadura seja vertical-ascendente, recomenda-se o ângulo negativo (“empurrando” a tocha) variando entre 0° e 5° [14].

O método de transferência por spray requer que o bico de contato permaneça dentro do bocal e que sua extensão esteja na faixa entre 19 a 25 mm. Em soldaduras na posição plana ou horizontal, recomenda-se que o ângulo seja negativo (“empurrando” a tocha), variando entre 5° e 10° [14].

2.4 TENSÕES RESIDUAIS E DISTORÇÕES

Tensões residuais são comuns na maioria dos processos de manufatura que provocam a deformação do material, tratamentos térmicos, maquinação e soldadura [19]. A tensão pode elevar-se de modo a provocar escoamento local e deformação plástica, com a possibilidade de modificar expressivamente a aparência, precisão e desempenho do componente [20], [21], [22].

Processos por fusão em soldaduras são caracterizados por um aquecimento localizado nas peças de modo que a distribuição de temperatura durante o processo não é uniforme e as mudanças estruturais e metalúrgicas ocorrem à medida que a soldadura avança ao longo de uma junta. As regiões mais aquecidas tendem a dilatar, no entanto, são restringidas pelas partes adjacentes com temperaturas inferiores, ocasionando deformações elásticas e plásticas

concentradas nas regiões aquecidas. Ao final do processo de soldadura, em consequência das deformações plásticas localizadas, tensões internas (tensões residuais) permanecem na junta soldada, podendo provocar alterações permanentes de forma e dimensões (distorções) [23], [24].

Quando a soldadura é executada de modo progressivo, a parcela da soldadura que se solidificou resiste à contração das partes adjacentes do cordão que está a ser realizado. Como consequência, as primeiras porções soldadas são tensionadas longitudinalmente em relação a solda, reduzindo o comprimento dos cordões. Em juntas de topo, pouca movimentação da solda é permitida devido à preparação da junta. Em consequência da contração da solda, tensões residuais transversais também estão presentes. A Figura 11 exemplifica as tensões longitudinais e transversais em uma junta de topo [23].

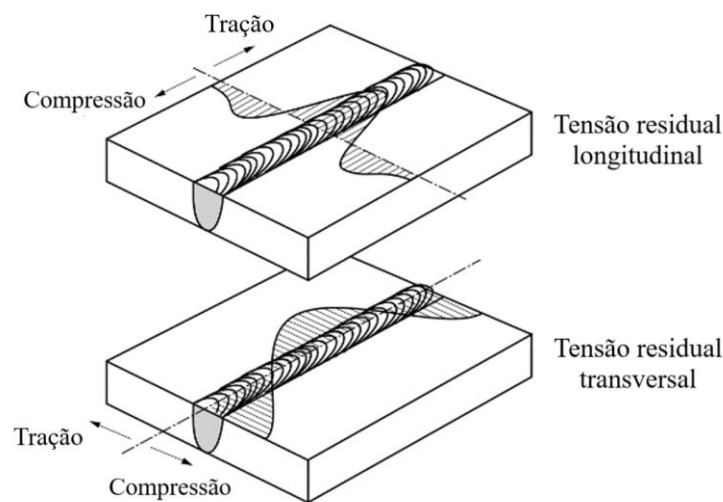


Figura 11: Tensões residuais longitudinais (L) e transversais (T) em uma junta de topo [25]

As tensões resultantes da soldadura podem produzir distorções ou causar fraturas. Distorções em soldadura ocorrem quando a região aquecida contrai de maneira não uniforme, resultando no tensionamento de uma região da junta soldada por gerar forças excêntricas na seção transversal [26].

Além das distorções já citadas, soldaduras em juntas de topo também podem sofrer deformações angulares. O fenômeno ocorre quando a contração transversal não é uniforme na direção da espessura da chapa, de modo que a região superior da solda (face) sofre uma contração superior a região inferior (raiz) [27]. A distorção angular produz uma flexão transversal nas chapas ao longo do cordão de soldadura. Estes efeitos estão ilustrados na Figura 12 [28], [26].

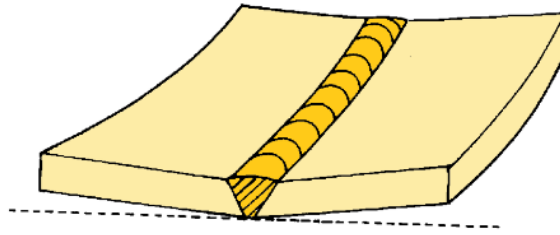


Figura 12: Representação esquemática de distorções em juntas de topo. Adaptado de [23]

Visando uma maior confiabilidade das estruturas metálicas, deve-se considerar durante a fase de projeto os efeitos da tensão residual e as distorções. A redução destes fenômenos pode ser alcançada por meio de várias técnicas, dentre elas tem-se [26], [29], [30], [31]:

1. Escolha dos processos e procedimentos de soldadura, sequência de soldagem, especificação dos materiais, tipos de juntas e fixação das peças;
2. Seleção de procedimentos para alívio da tensão residual e redução de distorções;
3. Usar informações e materiais do projeto para minimizar os efeitos de tensão residual e distorções.

Durante o processo de soldadura, as deformações (deslocamentos e rotações) são transientes e, após o arrefecimento do material, tornam-se permanentes. De acordo com Radaj [32], as tensões residuais e a deformação são antagônicas. Logo, a afirmação de que as tensões residuais resultam na deformação não está correta. Segundo o autor, tensões residuais altas surgem quando as deformações são restringidas, e tensões residuais baixas ocorrem quando as deformações não são restringidas. A Figura 13 correlaciona as tensões residuais e as distorções de acordo com o grau de restrição [26], [28].

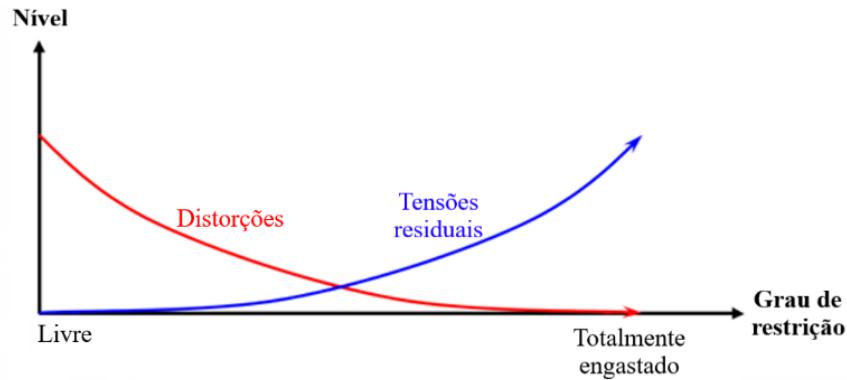


Figura 13: Tensões residuais x Distorções em função do grau de restrição [33]

O controle das distorções em estruturas sempre foi um desafio para os engenheiros, especialmente em estruturas complexas [34]. De acordo com a *American Welding Society* [23], algumas técnicas de controle da geometria da junta soldada são capazes de controlar distorções. Dentre das mais utilizadas tem-se: a preparação das peças a serem soldadas de modo a conduzir as distorções para convergirem com a geometria final desejada (pré-deformação); restrição de movimento das peças por meio de gabaritos, fixando-as para serem soldadas de modo a conter as possíveis distorções; o projeto de realização do procedimento para que haja um balanceado em ambos os lados da junta durante a execução da soldadura; a seleção do processo e a sequência de soldadura com o objetivo de minimizar as distorções [35].

2.4.1 Tensões residuais

Um desenho esquemático da distribuição da temperatura e da tensão durante a soldadura sobre chapas pode ser observado na Figura 14: Distribuição da temperatura e da tensão durante a soldadura sobre chapas. Adaptado de Figura 14. Na seção A-A, a tensão residual devido à soldadura é desprezível. Nas regiões da poça de fusão da seção B-B as tensões também são praticamente inexistentes, uma vez que o metal fundido não pode suportar nenhuma carga. Entretanto, em ambos os lados do cordão de solda nas zonas afetadas pelo calor, existem tensões compressivas visto que a expansão destas áreas está restringida pela vizinhança, que se encontra em uma temperatura mais baixa. A magnitude da tensão de compressão atinge o valor máximo em um pequeno distanciamento da poça de fusão. O equilíbrio nas zonas afetadas pelo calor é alcançado devido as tensões de tração que também surgem a uma certa distância da poça. A distribuição das tensões ao longo das seções pode ser observada na Figura 14 (c)(2) [23].

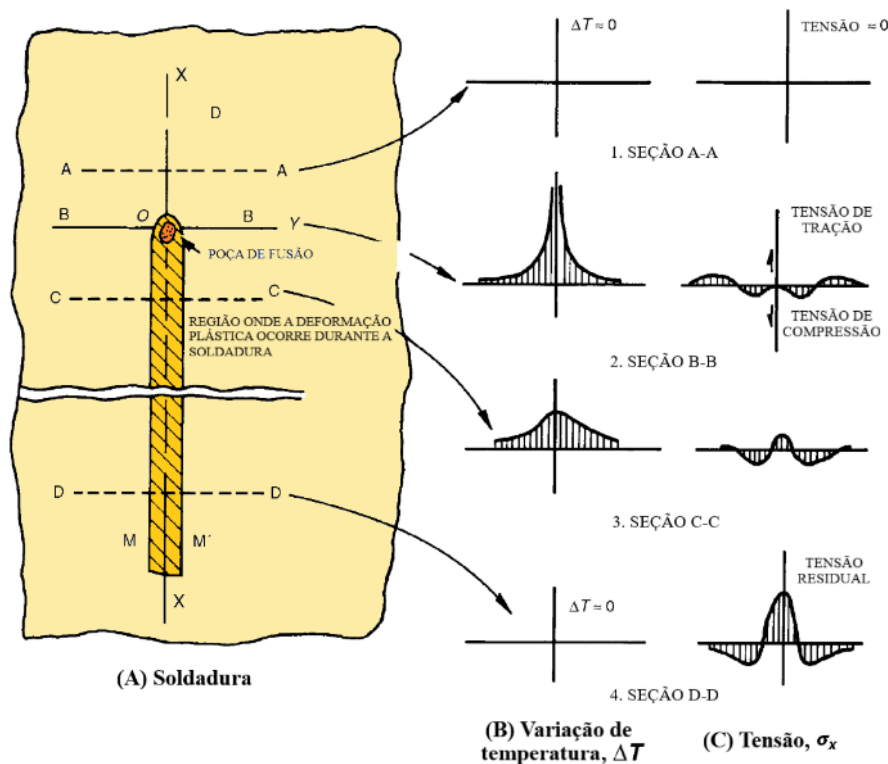


Figura 14: Distribuição da temperatura e da tensão durante a soldadura sobre chapas. Adaptado de [23]

A Figura 14 (c)(3) ilustra a tensão residual da seção C-C. Nesta seção as zonas fundidas e as zonas afetadas pelo calor já arrefeceram um pouco. Como estas tentam se contrair, surgem tensões de tração e conseqüentemente tensões de compressão no metal de base, mantendo assim o equilíbrio. A condição final da tensão residual da seção D-D está ilustrada na Figura 14 (c)(4). Nesta, as zonas já arrefeceram completamente e retornaram a temperatura ambiente. Ao longo desta seção existem elevadas tensões de tração na zona fundida e zona afetada pelo calor, enquanto tensões de compressão estão em regiões mais afastadas do cordão de soldadura [23].

2.4.2 Distorções

As distorções encontradas nas estruturas soldadas são causadas por três alterações dimensionais fundamentais que ocorrem durante o processo: contração transversal perpendicular à direção da soldadura, contração longitudinal (que ocorre paralelamente a linha de soldadura) e distorção angular (que consiste na rotação em torno da linha de soldadura) [23].

A Figura 15 (a) representa uma contração transversal em uma soldadura de junta de topo simples. Nesta, a distribuição da tensão residual longitudinal é demonstrada esquematicamente na Figura 15 (b). As distorções angulares, ilustradas na Figura 15 (c) e (d),

são provocadas pelas diferenças de temperatura entre a região superior e inferior do cordão de soldadura. As distorções ocorrem, geralmente, em juntas de topo quando a contração transversal na direção da espessura (direção perpendicular a face da chapa) não é uniforme [23].

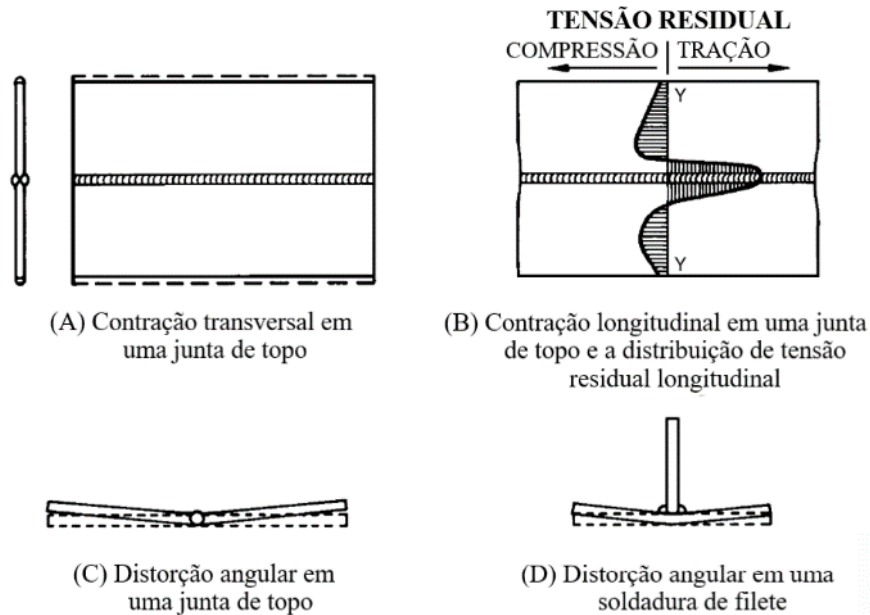


Figura 15: Variações dimensionais fundamentais que ocorrem em soldaduras. Adaptado de [23]

Dado que, em geral, soldaduras por fusão são realizadas à medida que a fonte de calor desloca ao longo de uma extremidade a outra, partes não soldadas da junta se movem à medida que o processo de soldadura avança, causando distorção rotacional. Em soldaduras de junta de topo em que as chapas não estão fixadas, as partes não soldadas da junta se fecham ou abrem, como ilustrado na Figura 16 (a) e (b), respectivamente [23].

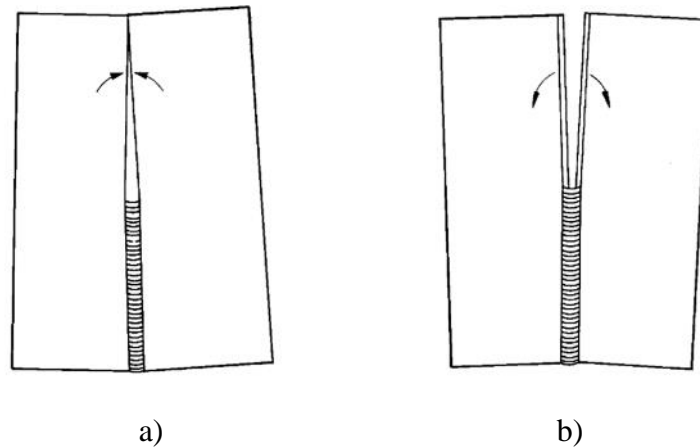


Figura 16: Distorção rotacional em juntas de topo: (a) SMAW e (b) SAW. Adaptado de [23]

Conforme explicado pela *American Welding Society* [23], a deformação final de um componente soldado é sempre oposta à deformação dimensional que o corpo apresenta durante o processo de soldagem. Esse fenômeno é ilustrado na Figura 17, em que a deflexão de uma barra durante a soldadura possui a geometria de deformação oposta após o procedimento de união.

Este fenômeno ocorre, constantemente, durante soldaduras de chapa de aço utilizando processos GMAW e SAW (*Submerged Arc Welding*). Para minimizar estas distorções rotacionais em juntas de topo, utilizam-se, normalmente, técnicas de ponteamento, de modo a fixar as chapas pré-soldadura [23].

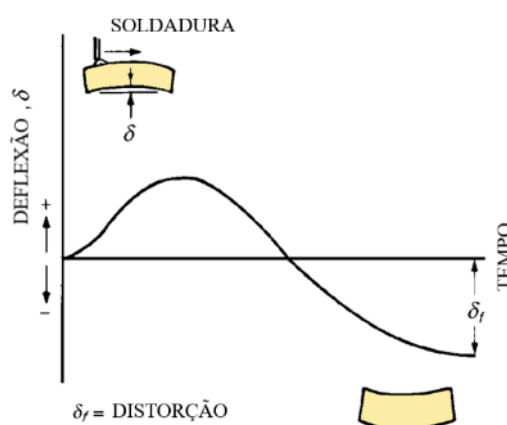


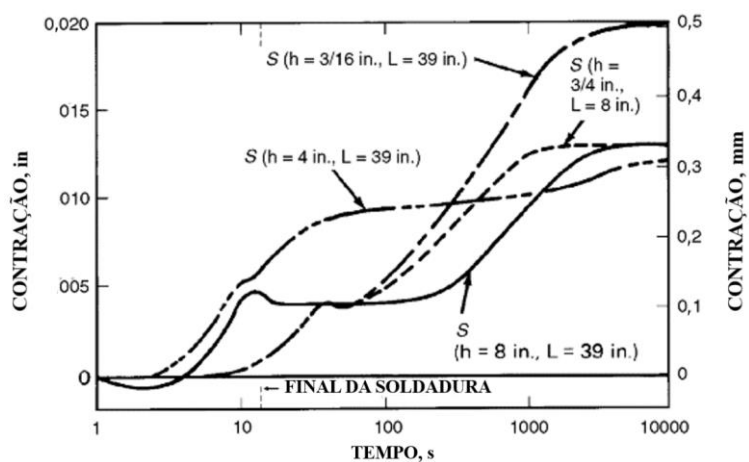
Figura 17: Deflexão de uma barra em um processo de soldadura em movimento longitudinal em função do tempo. Adaptado de [23]

2.4.2.1 Soldadura multipasses

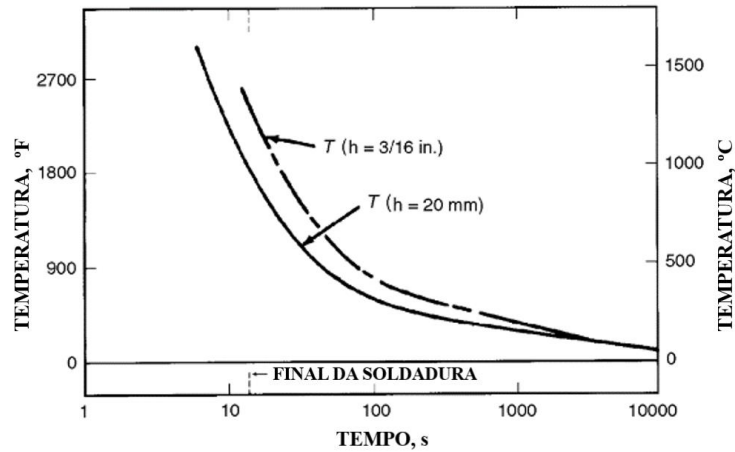
O processo de soldadura é, frequentemente, realizado em passes únicos, principalmente em chapas finas. Entretanto, quando a soldadura é realizada com multipasses, geralmente em chapas grossas, a tensão de contração por passe é acumulativa [23].

A maioria das contrações transversais que ocorrem nas juntas de topo é resultada de contrações do metal de base, que expande durante a soldadura. Entretanto, o metal base expandido diminui após a solidificação, sendo esta diminuição o fator responsável pela contração transversal [23].

Por meio das Figura 18 (a) e (b), a *American Welding Society* demonstra um resultado experimental obtido por meio de uma investigação de juntas de topo em aço baixo carbono. As curvas intituladas como “T” representam mudanças de temperatura, enquanto as intituladas como “S” indicam alterações em contrações transversais. Em juntas de topo de componentes de aço carbono, a contração aumenta a cada passe de soldadura.



(a) Contração x Tempo



(b) Temperatura x Tempo

Sendo:

Espessura (h) = 3/16 in. (5 mm) (h) = 3/4 in. (20 mm) (h) = 4 in. (100 mm) (h) = 8 in. (200 mm)	Largura (L) = 39 in. (990 mm) (L) = 8 in. (200 mm) (L) = 38 in. (990 mm) (L) = 39 in. (990 mm)
--	---

S = Contração transversal, in. (mm)
 T = Temperatura, °F (°C)

Figura 18: Efeito do tempo na contração e temperatura (a) Contração x Tempo e (b) Temperatura x Tempo.

Adaptado de [23]

Durante o processo multipasse, uma região da zona afetada pelo calor do passe de raiz (indicada pela letra A na Figura 19) é exposta a vários ciclos térmicos. No gráfico da Figura 19 é indicada uma redução da temperatura máxima e da velocidade de resfriamento do primeiro até o último passe. Entretanto, a temperatura da chapa aumenta com a sequência da soldadura em questão [36].

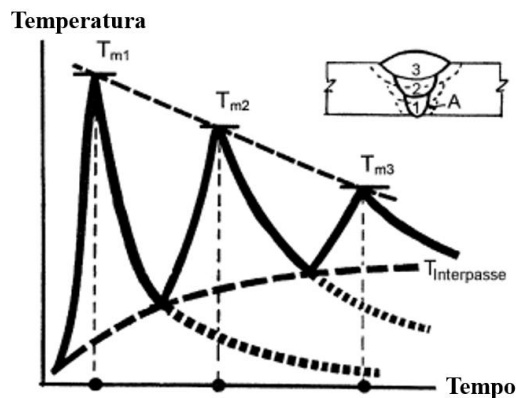


Figura 19: Exemplos de ciclos térmicos experimentados por um ponto da zona afetada pelo cordão perto da raiz de uma solda multipasse topo-a-topo [36]

No decorrer da soldadura multipasse, tanto a zona fundida quanto a zona afetada pelo calor são reaquentadas. Durante os ciclos térmicos subsequentes, o material ZAC pode sofrer transformações multifásicas levando à diversificação da estrutura entre as soldas e a ZAC, nos mesmos parâmetros de superfície. Isso pode ocasionar em mudanças microestruturais nestas regiões, que são dependentes da microestrutura formada em cada região pelos ciclos térmicos anteriores [36], [37].

Isso resulta em estados diversificados de tensões e tensões na zona afetada pelo calor, bem como fora dela [37].

A Figura 20 (a) relaciona a quantidade de material depositado por unidade de comprimento de solda, w , e a contração transversal, S . Sendo, w , proporcional à área da seção transversal do eletrodo. A contração é relativamente acentuada durante os primeiros passes de solda, mas diminui durante os passes posteriores, pois a resistência à contração aumenta à medida que a seção transversal do cordão de soldadura também aumenta. Conforme pode ser observado na Figura 20 (b), existe uma relação linear entre a contração transversal total e o logaritmo da quantidade de material depositado [23].

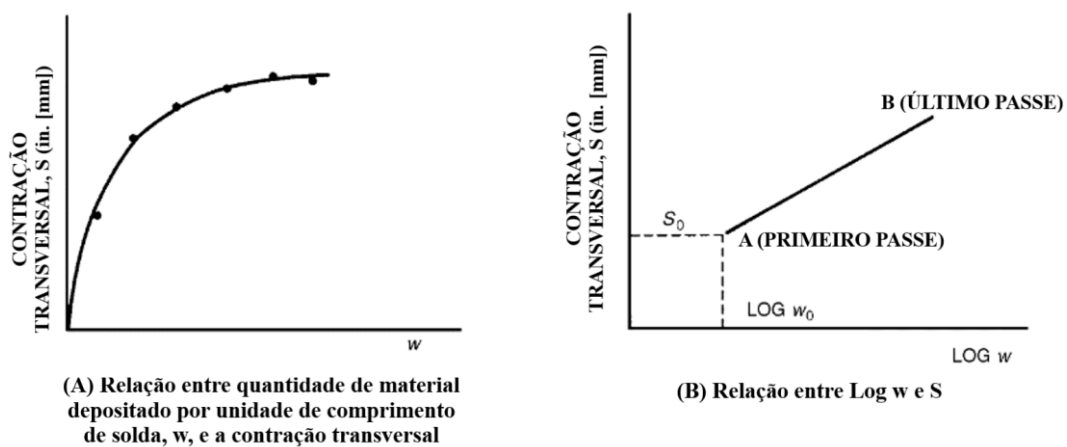


Figura 20: Aumento da contração transversal na soldagem multipasse de uma junta de topo: (a) Relação entre a quantidade de material depositado por unidade de comprimento de solda, w , e contração transversal, S e (b) Relação entre $\text{Log } w$ e S . Adaptado de [23]

A influência das variáveis de procedimento de soldadura na contração transversal e a relação das variáveis estão resumidas na

Tabela 2. Como pode ser observado, a abertura da raiz e a geometria da junta são as variáveis que mais influenciam [23].

Tabela 2: Efeitos das variáveis de procedimento na contração transversal em juntas de topo [23]

Procedimento	Efeitos
Passe raiz:	Contração aumenta à medida que a abertura da raiz aumenta;
Geometria da junta:	Uma junta em V produz mais contração do que uma junta em duplo V;
Diâmetro do eletrodo:	Contração diminui ao utilizar eletrodos com diâmetros maiores;
Grau de restrição:	Contração diminui com o aumento do grau de restrição;
Tipo de eletrodo:	O efeito é mínimo;
Pontemento:	A contração diminui de acordo com o resultado do pontemento.

2.4.3 Sequência de soldadura

A sequência de soldadura da estrutura e a sequência de deposição dos passes e cordões devem ser estabelecidos antes da execução do processo de soldadura. As sequências recomendadas são as que minimizam a ocorrência de tensões residuais e distorções, pois estas podem influenciar diretamente na funcionabilidade e resistência do conjunto soldado [38].

Existem diversos tipos de sequências de soldaduras longas de juntas de topo que podem ser aplicadas na tentativa de reduzir tensões residuais e distorções. A Figura 21 demonstra, esquematicamente, algumas destas sequências, sendo elas: (a) sequência com passes a ré ou em retrocesso, (b) sequência em blocos, (c) sequência por passes corridos, (d) sequência em cascata [23].

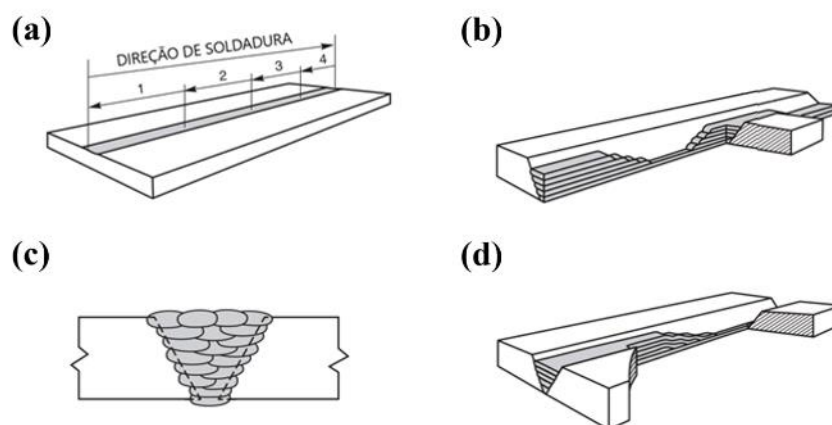


Figura 21: Sequências de soldadura utilizadas para reduzir tensões residuais e distorções. Adaptado de [23]




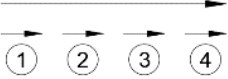
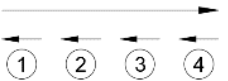
Conforme indicado pela AWS (*American Welding Society*), os efeitos das sequências de soldadura na tensão residual em juntas de topo e circulares podem ser resumidos da seguinte maneira:

1. A sequência de soldadura tem pouco efeito sobre a tensão residual ao longo da soldadura, no entanto, provavelmente a tensão de tração longitudinal será elevada;
2. Diferentes sequências de soldadura podem resultar variações consideráveis na contração transversal e na energia potencial elástica total armazenada nas juntas.
3. A soldadura com sequência em blocos, geralmente, resulta em menos contrações, tensões residuais e energia de deformação do que em sequências multicamadas.

A prática de soldadura de deposição por passes corridos, produz um cordão com múltiplos passes. Cada cordão é depositado de uma extremidade à outra da junta e faz-se um tecimento, preenchendo um cordão sobre o outro (Figura 21, item (c). Este método é produtivo, contudo, aumenta a possibilidade de ocorrência de defeitos do tipo fissuras na raiz, especialmente, em estruturas com maiores restrições [38].

Okumura [38], por meio da Tabela 3, simplifica algumas práticas de sequências de deposição de passes durante o processo de soldadura em juntas de topo.

Tabela 3: Sequências de deposição de passes durante o processo de soldadura em juntas de topo [38]

Denominação	Esquemas explicativos
Sequência corrida	De uma extremidade à outra (passe corrido) 
Sequência simétrica	Do centro para as extremidades 
Passes orientados	Passes intercalados 
Passes progressivos	Mesma direção e progressão de soldagem 
Passes a ré ou em retrocesso	A direção e a progressão da soldagem são opostas 

Conforme Okumura [38], a sequência corrida é aplicada em soldas de pequeno comprimento, para cordões de passe único e em processos automatizados. O procedimento de execução é realizado, continuamente, de uma extremidade da junta à outra. Essa sequência exige a utilização da técnica de ponteamto pré-soldadura, pois provoca uma distribuição assimétrica de tensões residuais, podendo acarretar deformações geométricas significativas.

A sequência simétrica é realizada do centro para às extremidades da junta. Quando comparada as demais sequências, a mesma possui menores possibilidades de distorções geométricas devido a uma distribuição mais simétrica de tensões residuais [38].

A técnica de deposição por passes orientados consiste na realização da junta com passes alternados em uma sequência pré-determinada. Esta prática proporciona uma distribuição mais regular das tensões residuais e das conseqüentes deformações, contudo, possui a desvantagem de menor produtividade devido a um maior deslocamento da tocha [38].

Os passes progressivos são aplicados em sequência no mesmo sentido de desenvolvimento da soldadura. Durante a deposição com passes a ré ou de retrocesso, os passes são realizados em sequência, no sentido contrário ao da progressão da soldadura. Esse processo pode proporcionar uma distribuição mais uniforme de tensões residuais e, conseqüentemente, reduzir as deformações [38].

2.4.4 Efeito dos parâmetros nas distorções

A seleção dos parâmetros de soldadura é dada em função dos resultados a serem obtidos. Além de influenciar nas propriedades mecânicas, os parâmetros também podem interferir nas distorções. De acordo com Vyas et al., ocorrem maiores distorções com o aumento da tensão e da corrente, fenômeno oposto aos parâmetros de velocidade de soldadura e velocidade de alimentação, em que com o aumento destes as deformações diminuem [39].

Conforme Ramani. S e Velmurugan V., a tensão e o ângulo de inclinação da tocha possuem efeito diretamente proporcional nas distorções angulares. Já o aumento da extensão do eletrodo e da taxa de alimentação possuem efeito inverso nas distorções [40].

Lohate M.S e Dr Damale A.V. concluíram que o número de passes influenciam, de modo expressivo, nas distorções, enquanto a taxa de alimentação e o intervalo de tempo entre os passes afetam inversamente as distorções [41].

Narwadkar A e Bhosle S. indicam que maiores valores de corrente e tensão acarretam no aumento das distorções e que maiores taxas de vazão de gás proporcionam menores distorções [42].

A investigação realizada por Sakri A. et al. Constatou, por meio de simulações usando FEA com validação experimental, que as distorções angulares aumentam de acordo com o aumento do ângulo de preparação em V [43].

Kumar P. [44] e Kumar A. [45] realizaram investigações distintas sobre a influência nas distorções da abertura da junta, número de passes e tempo entre os passes. Ambos os experimentos concluíram que a distorção aumenta com o aumento da abertura da junta e do número de passes, porém, diminui com o aumento do intervalo entre os passes.

Soni S. e Aggarwal N. utilizaram do método Taguchi para investigar as distorções angulares. Verificou-se que o aumento da corrente, do comprimento da chapa e do diâmetro do eletrodo acarretam o aumento da distorção. Já para o intervalo entre os passes, concluiu-se que possui efeito inverso para as distorções angulares [34].

CAPÍTULO III

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os experimentos práticos realizados neste trabalho de investigação foram desenvolvidos no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM), Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM), Laboratório de Materiais de Construção Mecânica (LMCM), localizados na Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) e no Brigantia Ecopark, ambos situados em Bragança – Portugal e disponibilizados pelo Instituto Politécnico de Bragança.

Os experimentos para análise das distorções foram divididos em três grupos:

- I. Soldadura sobre chapas;
- II. Soldadura multipasses em juntas de topo;
- III. Soldadura em juntas de topo com chapas finas.

O metal de base, mesmo antes do processo de soldadura, já apresenta descontinuidades geométricas. Para obter-se um melhor controle das distorções realmente ocasionadas pelo processo, foram realizadas aferições antes e após a soldadura. Desta maneira, as distorções já existentes nas amostras, anteriores às soldaduras, foram consideradas e devidamente compensadas nos resultados.

Em todos os experimentos realizou-se a preparação das amostras (corte das chapas, limpeza das superfícies e criação da malha de controlo), a aferição das distorções pré-soldadura, a execução dos cordões e a aferição das distorções pós-soldadura. As aferições das distorções foram realizadas por meio de uma metodologia utilizando equipamentos de identificação das coordenadas no espaço operacional com precisão metrológica (HandyProbe e Scanner). Exclusivamente, nas soldaduras sobre chapas, realizou-se uma segunda metodologia analógica por meio de um relógio comparador, tendo como objetivo comparar as metodologias e verificar a eficiência na identificação dos padrões de distorções. Para facilitar o entendimento de toda a metodologia laboratorial, desenvolveu-se um resumo esquemático indicando cada etapa do procedimento por meio de um fluxograma (Figura 22).

Neste capítulo, primeiramente serão apresentados, de modo geral, os materiais e equipamentos utilizados. Em seguida, a metodologia experimental de cada etapa será detalhada separadamente, de modo a facilitar a compreensão.

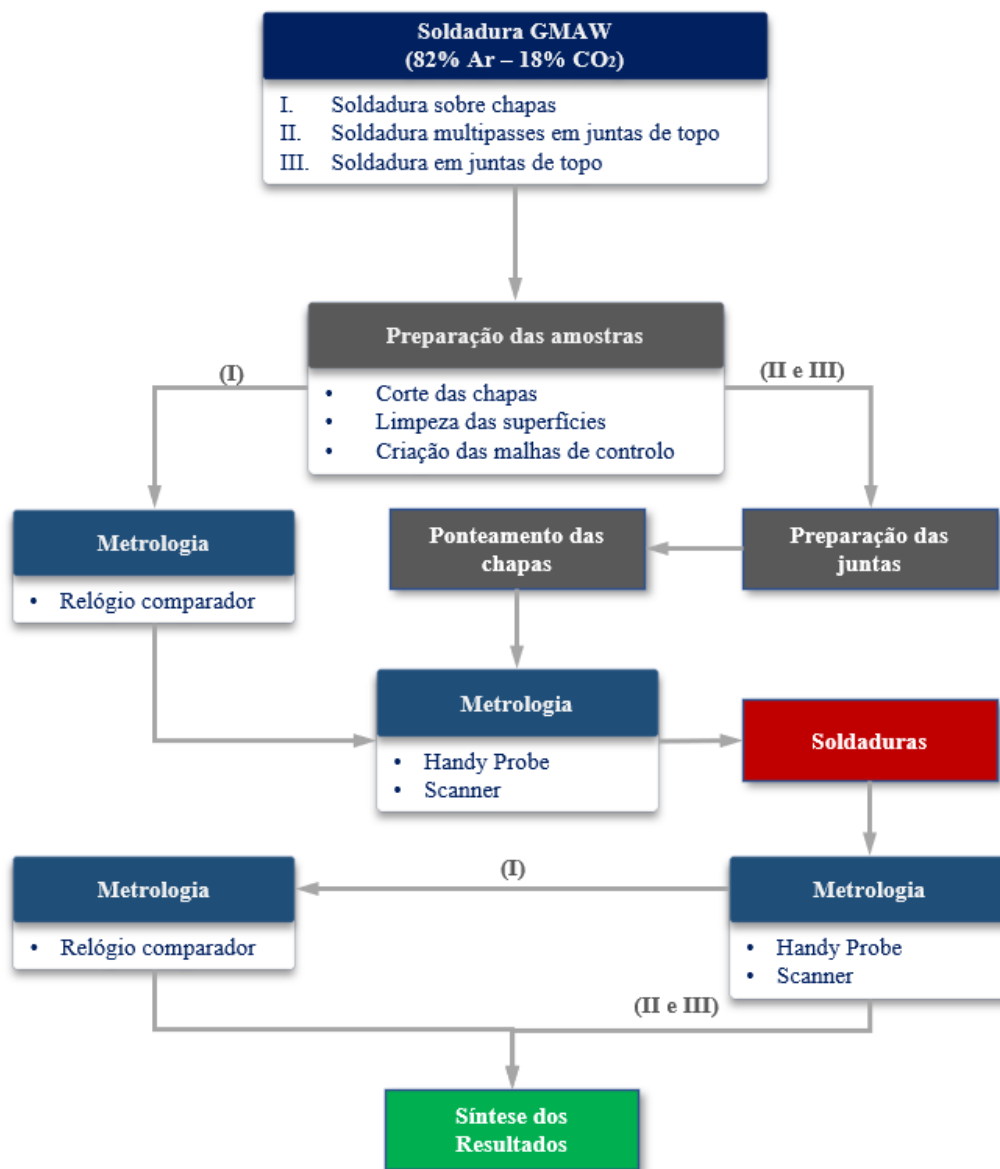


Figura 22: Fluxograma da metodologia laboratorial

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1.1 Equipamento de soldadura

O equipamento de soldadura disponibilizado pelo LTM para o experimento foi uma máquina de modelo MIG 453 Modular (Figura 23). A máquina é composta por uma fonte de energia, um alimentador de elétrodo, uma tocha, um cilindro de gás e cabos.

Para realizar o procedimento de soldadura com precisão, utilizou-se um equipamento de controle numérico (Figura 24) desenvolvido por Veiga [46]. O equipamento é capaz movimentar a tocha com três graus de liberdade e acionar o gatilho de forma automatizada por meio de programação em Código G no software Grbl Controller 3.6.1.



Figura 23: Máquina de soldadura MIG 453 Modular

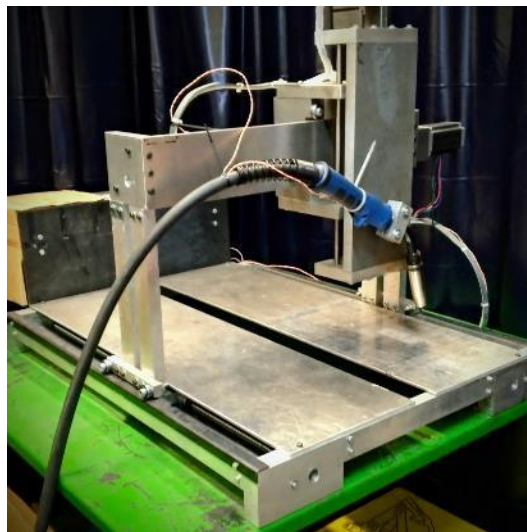


Figura 24: Equipamento CNC com adaptação da tocha de soldadura

3.1.2 *Metal de base e metal de adição*

O metal de base adotado para o experimento foi o aço ao carbono S235JR (EN 10025), que tem a seguinte composição química indicada na Tabela 4.

Tabela 4: Composição química do aço S235JR [47]

C	Mn max	P max	S max
0,17 – 0,22	1,40	0,035	0,035

O metal de adição disponibilizado para o experimento foi um arame eletrodo M/SG 2 da Eurotrode, identificado como 14341-A G3Si1 pela norma ISO e 5.18 ER 70S-6 pela AWS. O eletrodo é constituído de aço e revestido em cobre. A composição química e as propriedades mecânicas estão indicadas na Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente.

Tabela 5: Composição química do eletrodo AWS 5.18 ER 70S-6 [48]

Elemento químico	Min (%)	Max (%)
C	0,06	0,14
Si	0,80	1,00
Mn	1,40	1,60
P		0,025
S		0,025

Tabela 6: Propriedades mecânicas do eletrodo AWS 5.18 ER 70S-6 [49]

EUROTROD AWS/ASME EN ISO	Propriedades mecânicas
M/SG 2 5.18: ER 70 S-6 14341-A: G3 Si 1	Re 420 N/mm ² Rm 520 N/mm ² A5 > 30% KV > 72 J (- 30° (c))

Para os procedimentos de soldadura foram utilizadas as faixas recomendadas para o eletrodo com diâmetro de 0,8 mm indicadas no catálogo da ESAB (Tabela 7) de acordo com a classificação na norma ISO 14341 [50].

Tabela 7: Parâmetros recomendados pela ESAB para o eletrodo AWS 5.18 ER 70S-6 [50]

Ø (mm)	Corrente A	W Nom	η Nom	H	Alimentação	U
0,8	60 – 200	14	95	0,8 – 3,0	3,2 – 13	18 – 24

Sendo:

W = Gas de proteção (l / min)

η = Metal soldado (g) / 100g eletrodo (%)

H = Taxa de deposição (kg metal de solda / tempo de arco aberto)

Alimentação = Taxa de alimentação (m/min)

U = Tensão (V)

3.1.3 Gás de proteção

O gás de proteção utilizado no experimento, responsável por influir beneficentemente nas propriedades mecânicas e evitar a contaminação da poça de fusão pelo meio externo, foi uma mistura de 82% de Argônio e 18% de Dióxido de Carbono (ISO 14175 - M21 - ArC - 18) conforme indicado na Figura 25.



Figura 25: Gás de proteção utilizado: Ar 82% e CO₂ 18%

3.1.4 Equipamento metrológico computadorizado

Para a análise das distorções de modo digital, utilizou-se o equipamento metrológico de aquisição de pontos geométricos da Creaform, compostos pelo C-Track 780, HandyPROBE e MetraSCAN 3D.

3.1.4.1 C-Track

O sistema de digitalização 3D e medição de coordenadas é composto por um elemento principal denominado C-Track (Figura 26). Este equipamento realiza o varrimento do volume de onde se encontra o objeto por meio da câmera dupla de alta qualidade e dos refletores localizados no HandyPROBE e MetraSCAN 3D. Estes recursos permitem a triangulação do posicionamento e identificação das coordenadas no espaço operacional com precisão metrológica.

Os *hardwares* comunicam com um controlador geral, que trabalha, em conjunto, com o software VXelements e Metrolog X4. Com base nestes programas, além da digitalização geométrica e aquisição de coordenadas, é possível configurar os parâmetros dos hardwares e utilizarem-se ferramentas de metrologia e construção geométrica.



Figura 26: Equipamento de aquisição de coordenadas geométricas (C-Track 780)

3.1.4.2 MetraSCAN 3D

O MetraSCAN 3D consiste em um equipamento de digitalização geométrica para medições a nível metrológico. Por meio das câmeras do C-Track e dos refletores localizados no corpo do MetraScan, o equipamento é capaz de identificar o posicionamento do hardware no espaço por meio de triangulação. Também por triangulação, o MetraSCAN digitaliza o objeto direcionado e dispõe a malha adquirida no software VXelements. Na Figura 27 pode-se observar uma ilustração esquemática do sistema de triangulação entre o C-Track e o MetraSCAN 3D.

Devido a uma limitação da licença atualmente disponibilizada, não foi possível realizar a análise de distorção por meio dos objetos digitalizados pelo MetraSCAN 3D, pois a função disponibilizada no próprio software para esta análise encontra-se bloqueada pelo tipo de licença.



Figura 27: Equipamento C-Track e MetraSCAN 3D de digitalização geométrica

3.1.4.3 HandyPROBE

O equipamento HandyPROBE (Figura 28) consiste em um hardware portátil de medição de coordenadas. Seu funcionamento é possibilitado por refletores ópticos (Figura 29), posicionados nas proximidades ou no objeto, em conjunto com o C-Track e o HandyPROBE. O equipamento permite uma sondagem metrológica de alta produtividade e precisão.



Figura 28: Equipamento portátil para medição de coordenadas (HandyPROBE)



Figura 29: Refletores ópticos magnéticos

A empresa fabricante indica a utilização de, no mínimo, 3 refletores ópticos, entretanto recomenda-se um maior número dentro das necessidades dimensionais de cada objeto. Para uma medição mais precisa, o posicionamento dos refletores deve ser distribuído de modo não uniforme e abrangendo toda a peça. Uma ilustração de exemplo da distribuição recomendada pela Criaform encontra-se na Figura 30.

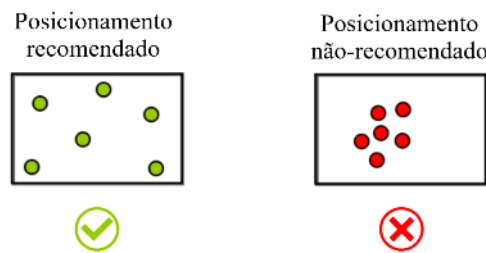


Figura 30: Distribuição recomendada dos refletores ópticos

3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Com a finalidade de obter-se uma maior produtividade na experimentação laboratorial e o cumprimento da uniformidade térmica no início de cada cordão, as soldaduras de todas as amostras foram realizadas de forma intercalada e, após o término de cada cordão, submeteu-se o respectivo provete a um arrefecimento uniforme ao ar, sem restrição ou aceleração. Em outros termos, a sequência de soldadura foi realizada de modo a esperar o arrefecimento completo do corpo de prova para iniciar o novo cordão subsequente. Desta forma, obteve-se maior controle da padronização e da uniformidade entre as diferentes sequências.

Com o objetivo de melhorar a precisão da investigação, cada sequência de soldadura foi realizada em triplicado, de modo a garantir a não interferência de possíveis imperfeições dos materiais e falhas humanas ou dos equipamentos durante a execução de todo experimento.

3.2.1 Soldadura sobre chapas (I)

Para esta etapa da experimentação laboratorial foram obtidas 12 chapas de aço S235JR com dimensões de 220 x 100 x 10 mm. Para a análise das distorções, por meio de aferições com relógio comparador e com o HandyProbe, foi criada uma malha de controle de 30 x 30 mm (Figura 31 (a)) com 32 nós (pontos de aferição). Posteriormente, em cada chapa, foi

realizada a identificação da malha de controle (linhas e colunas) e da amostra, como ilustrado na Figura 31 (b).

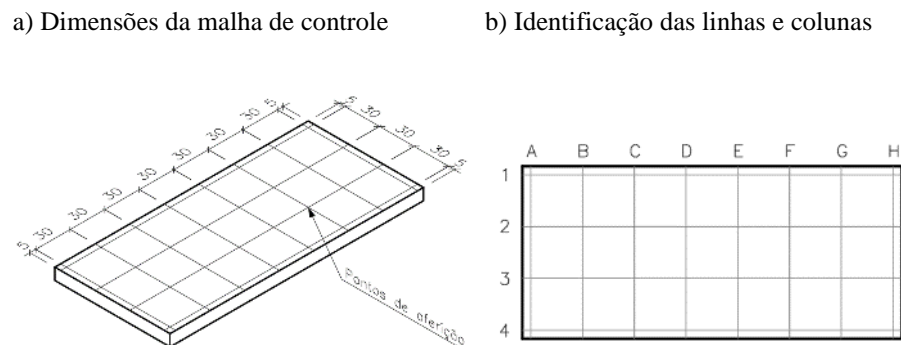


Figura 31: Exemplificação da malha de controle: (a) Dimensões da malha de controle, (b) identificação das linhas e colunas da malha de controle

3.2.1.1 Preparação das superfícies

As 12 amostras foram obtidas a partir de uma barra laminada de aço ao carbono S235JR com dimensões iniciais de 6000 x 100 x 10 mm. Utilizou-se uma serra de fita para cortá-las nas dimensões projetadas e, posteriormente, preparam-se as superfícies utilizando uma rebarbadora com disco abrasivo – para remoção de oxidações e impurezas inorgânicas – e acetona para remoção de impurezas oleosas.

3.2.1.2 Processo de soldadura sobre chapas

Conforme indicado no item 3.1.2, os cordões de soldadura foram realizados seguindo a faixa de parâmetros recomendada pela ESAB, sendo todos na posição plana (1G) com a técnica puxando.

Para a seleção dos parâmetros foram realizados testes de ajustes do equipamento e os parâmetros indicados na Tabela 8 foram mantidos durante toda a etapa experimental de soldadura sobre chapas.

As sequências de soldaduras realizadas foram as seguintes:

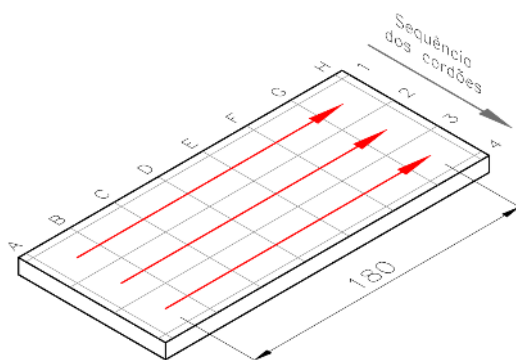
- i. L[u]: Soldadura longitudinal com sentido único;
- ii. L[a]: Soldadura longitudinal com sentido alternado;
- iii. T[u]: Soldadura transversal com sentido único;
- iv. T[a]: Soldadura transversal com sentido alternado.

Tabela 8: Parâmetros utilizados na soldadura sobre chapas

Parâmetros de soldadura	Valores utilizados
Tensão	23,7 V
Inclinação da tocha	15°
Vazão do gás de proteção	14 l/min
Velocidade de soldadura	0,25 m/min
Velocidade de alimentação	3,5 m/min
Extensão do eletrodo (<i>Stick-out</i>)	18 mm

Os desenhos esquemáticos indicados na Figura 32 (direção Longitudinal) e na Figura 33 (direção Transversal) exemplificam as seqüências de soldadura nos sentidos único (a) e alternado (b), a serem realizadas.

a) L[u]: Longitudinal sentido único



b) L[a]: Longitudinal sentido alternado

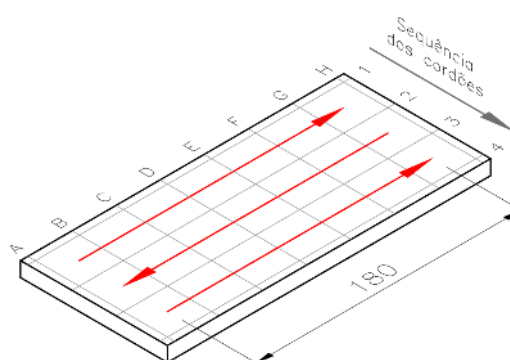
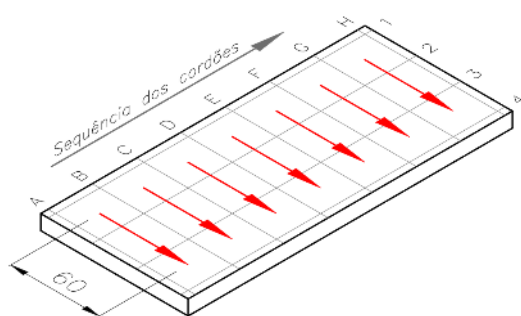


Figura 32: Sentido e seqüência da execução dos cordões da soldadura: (a) L[u], (b) L[a]

a) T[u]: Transversal sentido único



b) T[a]: Transversal sentido alternado

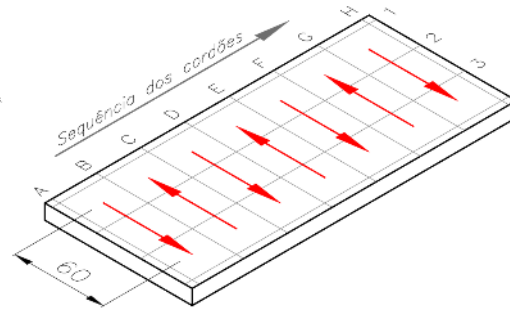


Figura 33: Sentido e seqüência da execução dos cordões da soldadura: (a) T[u], (b) T[a]

Segundo Radaj [32], conforme citado no item 2.4, tensões residuais altas surgem quando as deformações são restringidas. Desta forma, optou-se nos experimentos laboratoriais por não fixar as amostras durante os processos de soldadura e, conseqüentemente, não restringir

as deformações em nenhum momento. Um exemplo do arranjo análogo ao utilizado na soldadura sobre chapas pode ser observado na Figura 45 (Item 3.2.3), onde é possível observar a soldadura em juntas de topo sem restrições de movimento durante o processo de soldadura.

3.2.1.3 Metrologia analógica

A aferição da distorção, exclusivamente nas amostras de soldadura sobre chapas, foi realizada também com equipamento analógico utilizando uma metrologia de baixo custo aplicado por Silva [1] e Marção [2]. Esta aferição com a metodologia analógica cabe-se pelo objetivo de comparação com a metodologia metrológica computadorizada aplicada no presente trabalho.

Devido às distorções nas chapas (mesmo antes da soldadura), provavelmente ocorreriam erros significativos ao simplesmente colocá-las em uma superfície certificadamente plana para aferição. Isto deve-se ao fato de as chapas já distorcidas, possivelmente, oscilarem na superfície plana à medida que se aplica pressão com o equipamento metrológico em diferentes pontos da amostra,

Visando solucionar este problema, utilizou-se um arranjo com três cilindros com 25 mm de altura e 40 mm de diâmetro posicionados para sustentar as chapas sobre a mesa de granito em pontos separados. Deste modo, minimizou-se os possíveis erros, visto que esta triangulação permite uma maior estabilidade das chapas frente a oscilação. Para certificar o posicionamento dos cilindros no torno mecânico durante a maquinação, utilizou-se o relógio comparador e a base magnética, desta forma, garantiu-se a perpendicularidade entre as faces maquinadas e o eixo de cada respectivo cilindro.

Visando garantir um menor erro durante as comparações entre pré e pós-soldadura, identificou-se os cilindros e o posicionamento de modo a repeti-los em cada amostra. Estas identificações podem ser observadas na Figura 34.

Para efetuar as medições das malhas dos corpos de prova, utilizou-se um relógio comparador Dial Gauge modelo 109297, uma base magnética e uma mesa de desempenho Microplan modelo M17457. A Figura 34 contém a indicação de cada item utilizado neste arranjo de metrologia.

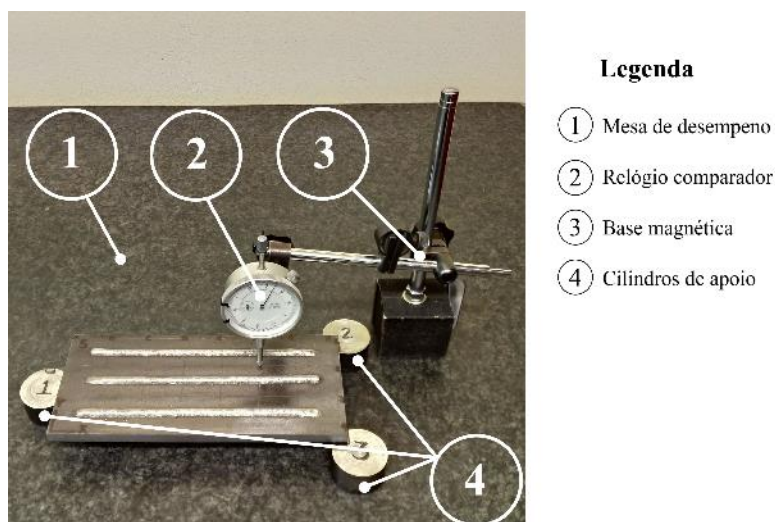


Figura 34: Equipamentos de metrologia utilizados para aferição das distorções dos corpos de prova

Posterior ao posicionamento do provete, aplicou-se uma pré-carga de 6 mm com o relógio comparador utilizando um ponto identificado no cilindro 1 de 25 mm de altura. Após a realização desta pré-carga, as amostras foram medidas nos pontos de aferição das malhas.

As aferições foram realizadas nos nós da malha de cada amostra e os valores registrados em matrizes que podem ser observadas nos Anexo I.

3.2.1.4 Metrologia computadorizada

Para a aquisição de dados, utilizou-se os equipamentos C-Track de medição de coordenadas interligado com o HandyPROBE e MetraSCAN 3D por meio dos softwares Metrolog X4 e VXelements. A calibração do equipamento e a aquisição de dados realizada com o C-Track foi executada seguindo todas as recomendações do manual do fabricante. Os valores de calibração obtidos no *software* VXelements estão indicados na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados de calibração no VXelements do C-Track e HandyProbe

Pré-soldadura		Pós-soldadura	
C-Track	Result: 0,027mm	C-Track	Result: 0,033 mm
MetraScan 3D	Result 1: 0,001 mm	MetraScan 3D	Result 1: 0,001 mm
	Result 2: 0,027 mm		Result 2: 0,034 mm
HandyProbe	Result: 0,027 mm	HandyProbe	Result: 0,030 mm

Para o posicionamento das amostras, utilizou-se os mesmos 3 cilindros de apoio triangular e as respectivas indicações de posicionamento com o relógio comparador, visando, assim, menores erros e uma melhor comparação entre os resultados digital e analógico.

Como apoio para os cilindros e para os refletores, utilizou-se uma mesa de granito polido com ajuste de nível, de modo a garantir que todo o arranjo estivesse em uma superfície com uma elevada planeza. Conforme indicado pelo fabricante, os refletores foram distribuídos de modo desuniforme e abrangendo todo o corpo de prova. Para garantir que o equipamento gerasse o mínimo de erro, diversos testes de distribuição dos refletores foram realizados e o melhor posicionamento foi identificado na mesa de granito e repetido em todas as amostras. A posição dos cilindros também foi identificada na mesa de granito e repetida em todas as outras amostras. Um exemplo do arranjo com as respectivas identificações pode ser observado na Figura 35.

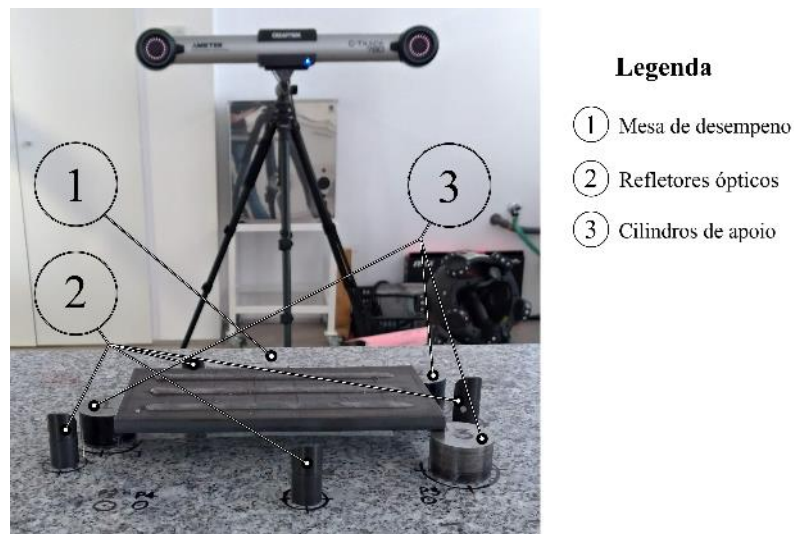


Figura 35: Arranjo experimental para medição das distorções dos corpos de prova

Após o posicionamento das amostras e dos refletores ópticos, iniciou-se a aquisição de dados, primeiramente com o MetraSCAN, utilizando o software VXelements. Posteriormente, para a obtenção geométrica digitalizada das amostras (ver exemplo na Figura 36), utilizou-se o HandyPROBE com o software Metrolog X4 para aferição das distâncias entre os nós da malha da amostra até a superfície da mesa de granito.

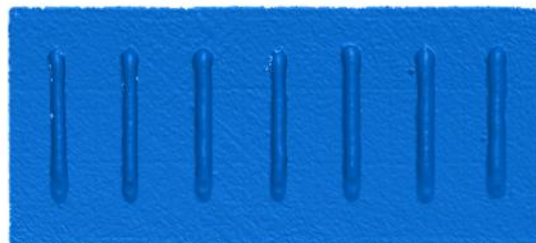


Figura 36: Malha de uma amostra da sequência T[u] digitalizada por meio do MetraSCAN

As aferições realizadas com o HandyPROBE foram registradas em uma matriz e junto com as malhas digitalizadas das amostras podem ser consultadas nos Anexo I e o projeto da mesa de granito encontra-se nos Anexo II.

3.2.2 Soldadura multipasses com chanfro em V nas juntas de topo (II)

Nesta etapa da experimentação laboratorial, foram preparadas 6 pares de chapas de aço S235JR com dimensões de 110 x 100 x 10 mm. Para a análise das distorções por meio do HandyProbe, foi projetada uma malha de controle de 30 x 30 mm com 32 nós (ver Figura 37 (a)) juntamente com a identificação das linhas e colunas (Figura 37 (b)).

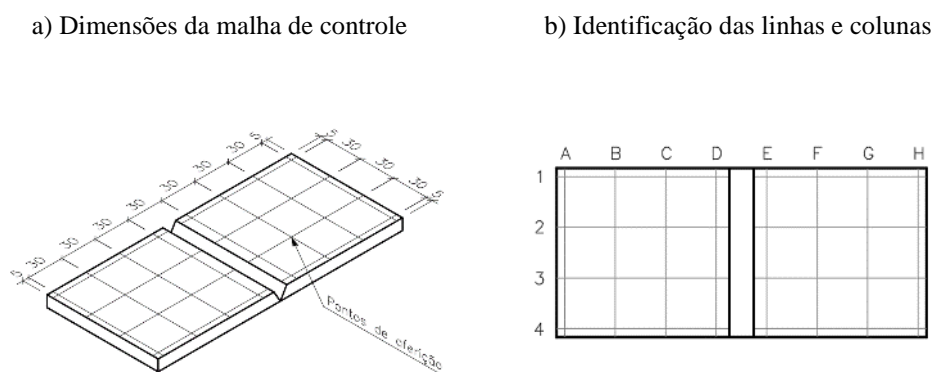


Figura 37: Exemplificação da malha de controle criada nos corpos de prova de soldadura multipasses em juntas de topo

Em razão da espessura da chapa ser de 10 mm, foi projetado um chanfro em V com abertura de raiz de 1 mm, nariz de chanfro de 1 mm e de ângulo de chanfro de 60°, conforme indicado na Figura 38. A maquinação do chanfro foi realizada utilizando uma fresadora, garantindo assim a precisão da preparação do chanfro.

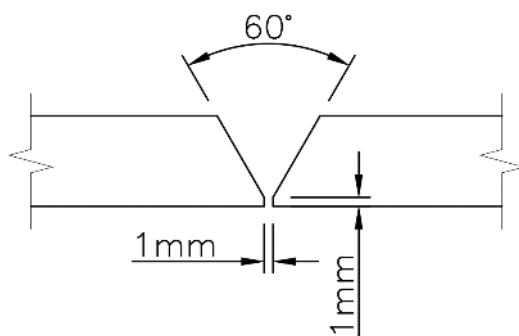


Figura 38: Caracterização geométrica do chanfro realizado

Conforme indicado pela literatura (Item 2.4.2), efetuou-se ponteamento pré-soldadura para evitar que ocorressem distorções rotacionais. A técnica utilizada nos provetes pode ser observada na Figura 39, onde os pontos de soldadura foram realizados nas extremidades e no centro da junta.

3.2.2.1 Preparação das superfícies

Para a preparação das superfícies das amostras deste conjunto, seguiu-se os mesmos procedimentos indicados no item 3.2.1.1. O resultado do procedimento pode ser observado na Figura 39.

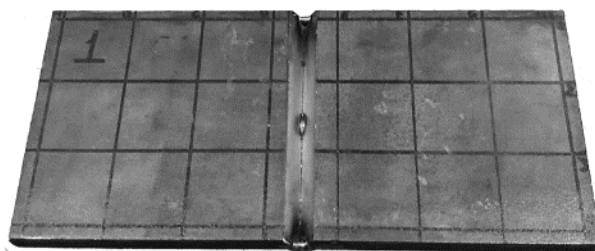


Figura 39: Preparação pré-soldadura dos corpos de prova para soldadura multipasses em juntas de topo

3.2.2.2 Processo de soldadura multipasses em juntas de topo

As soldaduras foram realizadas na posição plana (1G) com a técnica puxando e faixa de parâmetros foi selecionada dentro da faixa recomendada pela ESAB (item 3.1.2).

Para a soldadura multipasses foram considerados três tipos de passes (raiz, enchimento e acabamento). Posterior aos testes de ajustes para cada tipo de passe, foram selecionados os parâmetros indicados na Tabela 10.

As seqüências de soldaduras realizadas foram divididas em dois grupos:

- i. M[u]: Soldadura multipasses com sentido único
- ii. M[a]: Soldadura multipasses com sentido alternado;

Tabela 10: Parâmetros utilizados na soldadura multipasses em juntas de topo

Tipo de passe	Parâmetros de soldadura	Valores utilizados
Passe Raiz	Tensão	22,8 V
	Inclinação da tocha	15°
	Vazão do gás de proteção	16 l/min
	Velocidade de soldadura	0,20 m/min
	Velocidade de alimentação	3,5 m/min
	Extensão do eletrodo (<i>Stick-out</i>)	19 mm
Passe de enchimento	Tensão	23,7 V
	Inclinação da tocha	15°
	Vazão do gás de proteção	14 l/min
	Velocidade de soldadura	0,25 m/min
	Velocidade de alimentação	3,5 m/min
	Extensão do eletrodo (<i>Stick-out</i>)	19 mm
Passe de acabamento	Tensão	23,7 V
	Inclinação da tocha	15°
	Vazão do gás de proteção	14 l/min
	Velocidade de soldadura	0,30 m/min
	Velocidade de alimentação	3,5 m/min
	Extensão do eletrodo (<i>Stick-out</i>)	19 mm

A disposição dos cordões para o preenchimento do chanfro foi definida de forma a obter-se uma distribuição uniforme dos cordões e garantir um melhor aspecto visual da soldadura como um todo. Sendo assim, na Figura 40 tem-se uma ilustração esquemática do resultado da disposição dos cordões depositados no momento da soldadura.

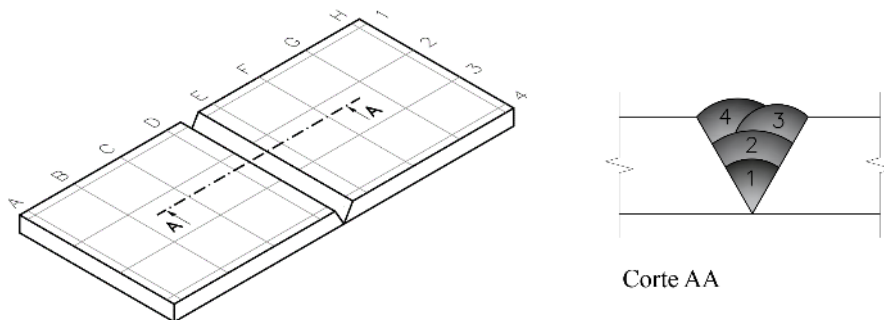


Figura 40: Disposição dos cordões para o preenchimento do chanfro com sentido de corte indicado

A Figura 41 ilustra as sequências, indicando o sentido e ordem de cada passe a ser realizado, sendo a Figura 41 (a) a soldadura multipasses com sentido único e a Figura 41 (b) a soldadura multipasses com sentido alternado.

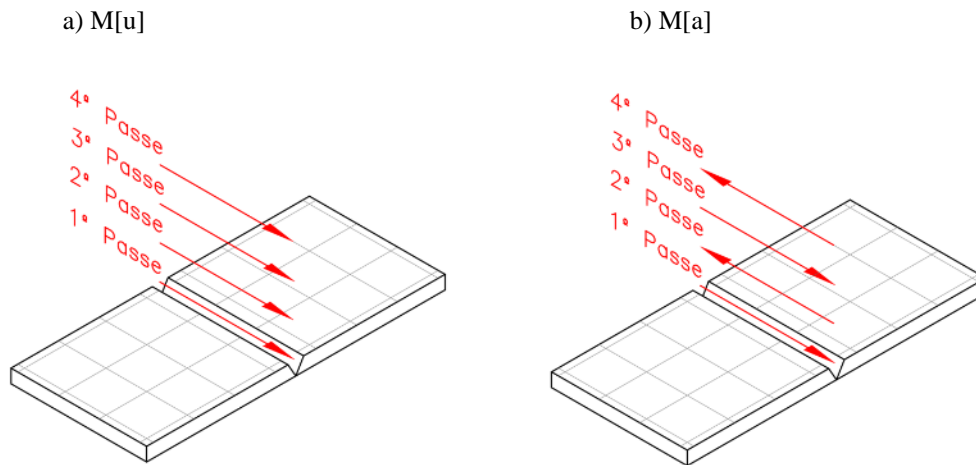


Figura 41: Sequência e sentido de passes a serem executados na soldadura multipasses em juntas de topo

3.2.2.3 Metrologia computadorizada

Neste procedimento de medição, utilizou-se a mesma metodologia experimental do item 3.2.1.4. As aferições realizadas com o HandyPROBE foram registradas em uma matriz e as malhas das amostras digitalizadas com o MetraSCAN. Estas podem ser consultadas no Anexo I.

3.2.3 Soldadura em juntas de topo nas chapas finas (III)

Para esta etapa da experimentação laboratorial, foram obtidos 12 pares de chapas de aço S235JR com dimensões de 220 x 100 x 3 mm. Para a análise das distorções por meio do HandyProbe, foi projetada uma malha de controle de 30 x 30 mm (Figura 42) com 64 nós (Pontos de aferição).

Neste procedimento também se utilizou o ponteamento para evitar possíveis distorções rotacionais. Pode-se observar na Figura 43 os pontos de soldadura realizados nas extremidades das juntas.

Tabela 11: Parâmetros utilizados na soldadura em juntas de topo

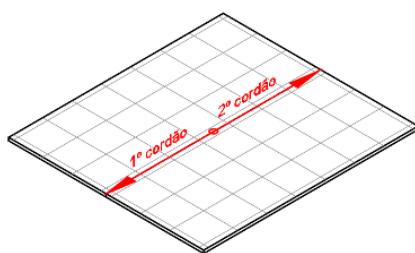
Parâmetros de soldadura	Valores utilizados
Tensão	22,4 V
Inclinação da tocha	15°
Vazão do gás de proteção	14 l/min
Velocidade de soldadura	0,30 m/min
Velocidade de alimentação	4,5 m/min
Extensão do eletrodo (<i>Stick-out</i>)	19 mm

Sequências de soldaduras realizadas nesta etapa:

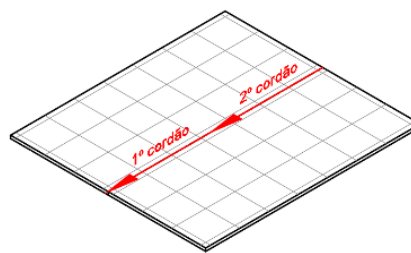
- i. SS: Soldadura de topo com sequência simétrica
- ii. SR: Soldadura de topo com passes a ré ou em retrocesso;
- iii. SC: Soldadura de topo com sequência corrida.

A Figura 44 ilustra esquematicamente as sequências SS (a), SR (b) e SC (c).

a) SS: Sequência simétrica



b) SR: Sequência de passes em retrocesso



c) SC: Sequência corrida

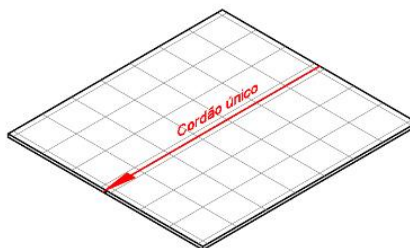


Figura 44: Soldadura em junta de topo: SS (a), SR (b), SC (c)

Análogo ao posicionamento de soldadura sobre chapas e multipasses, não foram utilizados fixadores durante o processo de soldadura com o objetivo de permitir que as deformações ocorrem sem restrições.



Figura 45: Arranjo sem restrições de movimento durante o processo de soldadura em juntas de topo

3.2.3.3 Metrologia computadorizada

Neste procedimento de medição, utilizou-se a mesma metodologia experimental do item 3.2.1.4. As malhas das amostras digitalizadas com o MetraSCAN e as aferições realizadas com o HandyPROBE foram registradas e podem ser consultadas no Anexo I.

3.3 TRATAMENTO DE DADOS

Com o objetivo de reduzir possíveis erros de paralaxe, realizou-se três aferições para cada provete, de modo a criar uma matriz com as médias aritméticas adquiridas para cada amostra pré e pós soldadura. Posteriormente, a aquisição das matrizes de deslocamento pré e pós soldadura, as matrizes de cada amostra foram normalizadas, de modo a transformar o menor valor da amostra aferido no valor zero. Desta forma, foi possível normalizar todas as matrizes e realizar uma comparação precisa, visto que todas as matrizes foram realocadas para o mesmo plano padrão de referência situada no valor zero do eixo Z. Um esquema da alteração do plano original para o plano padrão de referência encontra-se na Figura 46.

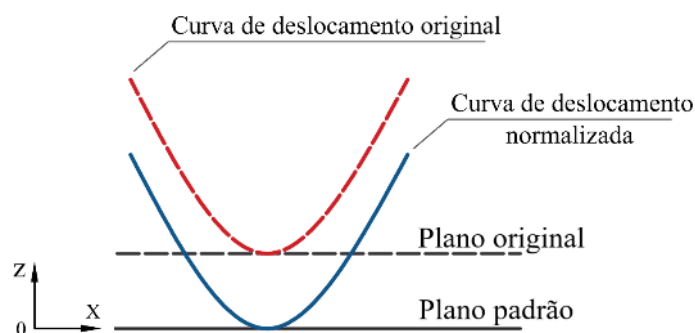


Figura 46: Esquema de normalização do plano de referência

Após a normalização, as matrizes de deslocamento real foram geradas a partir da subtração dos valores pré soldadura nas matrizes de pós soldadura. Estas matrizes finais de deslocamento podem ser consultadas no Anexos I.

3.3.1 Rotação das matrizes na soldadura em juntas de topo (Grupo III)

Posterior à aquisição das matrizes dos deslocamentos dos provetes com os equipamentos metrológicos, realizou-se uma rotação nas matrizes de modo a ajustá-las, removendo qualquer erro rotacional proveniente do posicionamento dos cilindros de apoio. Tal procedimento rotacional foi necessário devido às localizações dos cilindros de apoio terem sido em locais onde houve grande deformação, de modo a influenciar significativamente os valores dos deslocamentos e, conseqüentemente, em uma assimetria expressiva.

A rotação da matriz foi realizada em seu eixo central (eixo onde se encontram os cordões de soldadura), tendo o ângulo definido pela diferença das médias entre os valores de deslocamento das extremidades (seções 1 e 8). Deste modo, calculou-se o ângulo de rotação de cada provete por meio da tangente e aplicou-se a rotação em toda a matriz. Esta ferramenta matemática rotacional utilizada influenciou apenas na visualização dos gráficos, mantendo-se os demais resultados das análises inalterados. As matrizes de deslocamento pré e pós rotação encontram-se no Anexo I

3.3.2 Análise estatística

A análise de variância ou ANOVA é um procedimento estatístico que tem como objetivo comparar a distribuição de grupos em amostras independentes. Para a realização deste

teste são definidas duas hipóteses, H_0 e H_1 . A primeira hipótese (H_0), também chamada de hipótese nula, considera que não existe diferença estatística significativa entre os dados testados. Já a segunda hipótese (H_1), considera que há diferença significativa entre os dados testados [51].

Os resultados da análise de variância foram resumidos e compilados em forma de tabela, conhecida como Tabela ANOVA. Esta tabela apresenta a soma de quadrados, quadrado médio, estatística F e o valor-p. Através do valor-p, determinou-se qual a hipótese, dentre H_0 e H_1 , é a verdadeira. Se o valor-p for menor que o nível de significância determinado, refuta-se a hipótese nula (H_0), e conclui-se que há diferença significativa entre os dados. Caso contrário, se valor-p for maior que o nível de significância, considera-se a hipótese nula como verdadeira, concluindo-se que não há diferença significativa entre os dados [51].

3.3.3 Comparação entre metodologias metrológicas

A comparação entre a metodologia proposta por Silva [1] e Marção [2] com a metodologia desenvolvida no presente trabalho deu-se pela comparação entre as matrizes finais de deslocamentos de cada provete. Deste modo, foi possível confrontar diretamente as metodologias e verificar as diferenças entre os métodos de medição de cada provete.

As matrizes das diferenças foram geradas por meio da subtração entre a matriz de deslocamento da metodologia computadorizada pela matriz de deslocamento da metodologia analógica de cada respectivo provete. Para avaliá-las, gerou-se um gráfico boxplot indicando o limite superior, limite inferior e as medianas de cada provete.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos através das metodologias desenvolvidas no Capítulo III em conjunto com as respectivas discussões. Sempre que possível, as informações serão apresentadas em forma de gráficos e tabelas para melhor visualização e compreensão.

Este capítulo apresenta os resultados e faz a discussão relativa a duas etapas do trabalho e que são a influência da sequência de soldadura na geração de distorções e, posteriormente, a comparação das metodologias metrológicas.

4.1 INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS SEQUÊNCIAS DE SOLDADURA NAS DISTORÇÕES

Neste item, para a apresentação e discussão dos resultados, seguiu-se uma ordem equivalente a disposição já apresentada no Capítulo III:

- I. Soldadura sobre chapas
- II. Soldadura multipasses com chanfro em V nas juntas de topo
- III. Soldadura em juntas de topo nas chapas finas

4.1.1 Soldadura sobre chapas (I)

Posterior à aquisição de dados com os equipamentos metrológicos, foram gerados gráficos de superfície com as médias das amostras em triplicata de cada sequência para análise comparativa (mais detalhes no Anexo I, onde é possível observar a projeção de cada gráfico). O desvio padrão máximo das amostras utilizadas para calcular as médias de cada sequência foi de 0,05 mm.

A representação gráfica das médias de deslocamento vertical dos três provetes de cada sequência podem ser observadas na Figura 47, sendo (a) L[u], (b) L[a], (c) T[u] e (d) T[a]. As matrizes com os dados de deslocamentos dos provetes encontram-se no Anexo I.

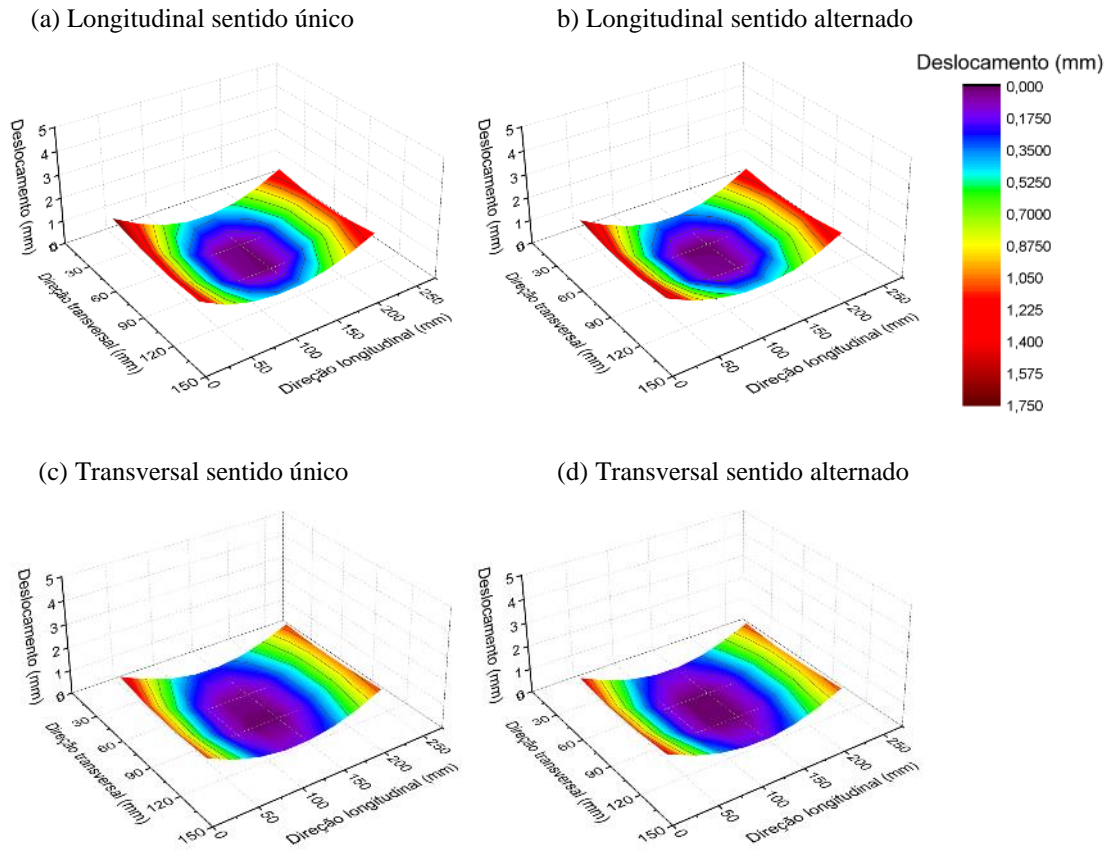


Figura 47: Gráficos de deformações: (a) L[u], (b) L[a], (c) T[u], (d)T[a]

4.1.1.1 Comparação entre sentidos de soldadura (Único x alternado)

Para a comparação entre as seções dos provetes de soldadura foram gerados gráficos de dispersão, contendo os valores de deslocamentos verticais das matrizes de distorções dos provetes. Os gráficos comparativos das sequências L[u] x L[a] (ver Figura 48 e Figura 49) e das sequências T[u] x T[a] (Figura 50 e Figura 51) permitiram uma análise das amplitudes e padrões de deformação de acordo com o sentido da soldadura executado.

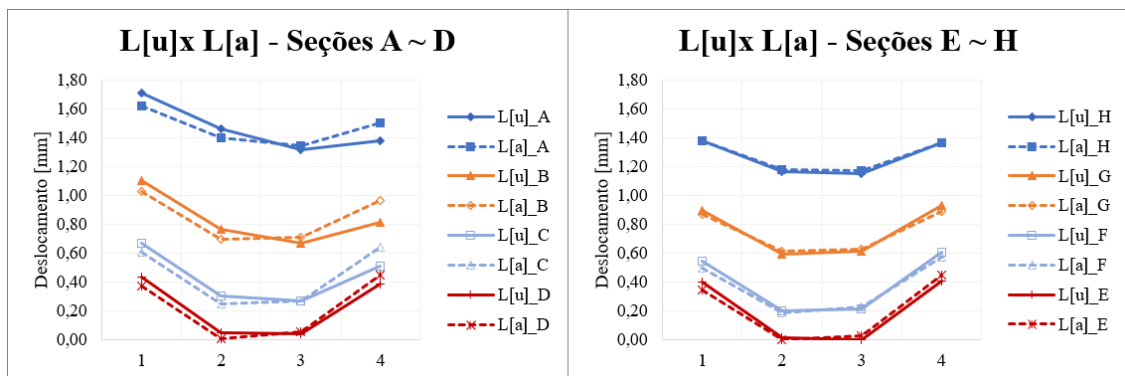


Figura 48: Gráficos de dispersão de L[u] x L[a] – Seções A ~ H

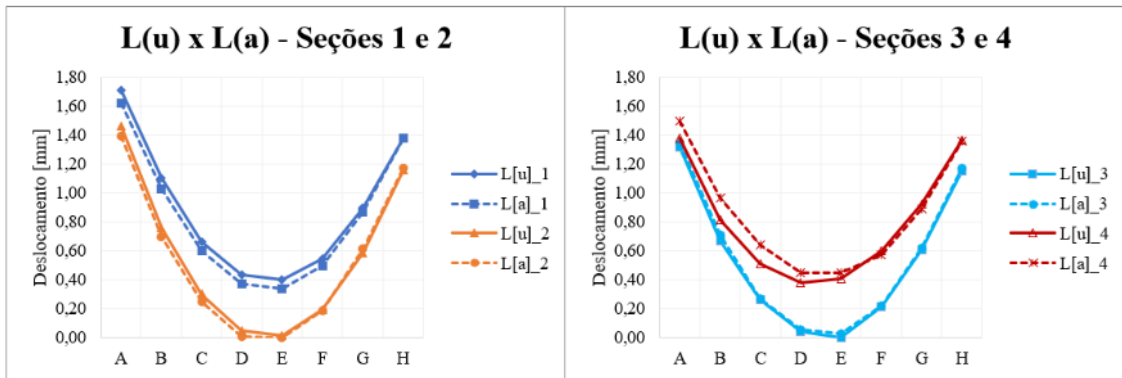


Figura 49: Gráficos de dispersão de L[u] x L[a] – Seções 1 ~ 4

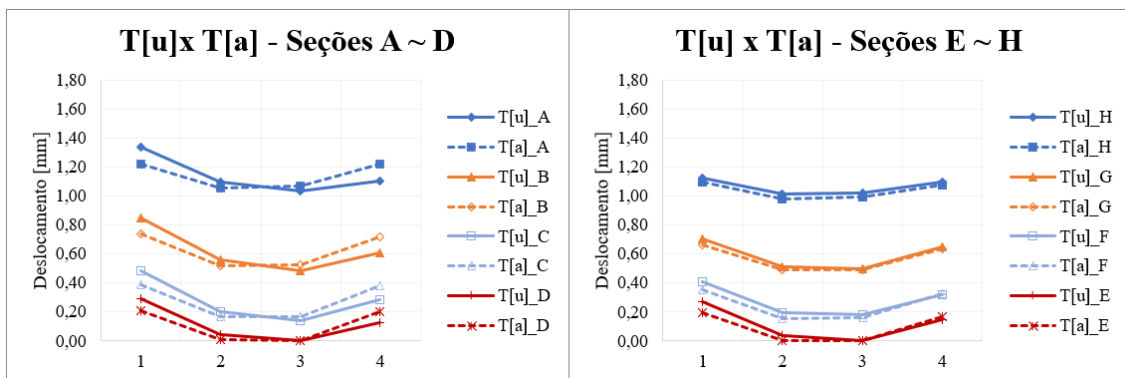


Figura 50: Gráficos de dispersão de T[u] x T[a] – Seções A ~ H

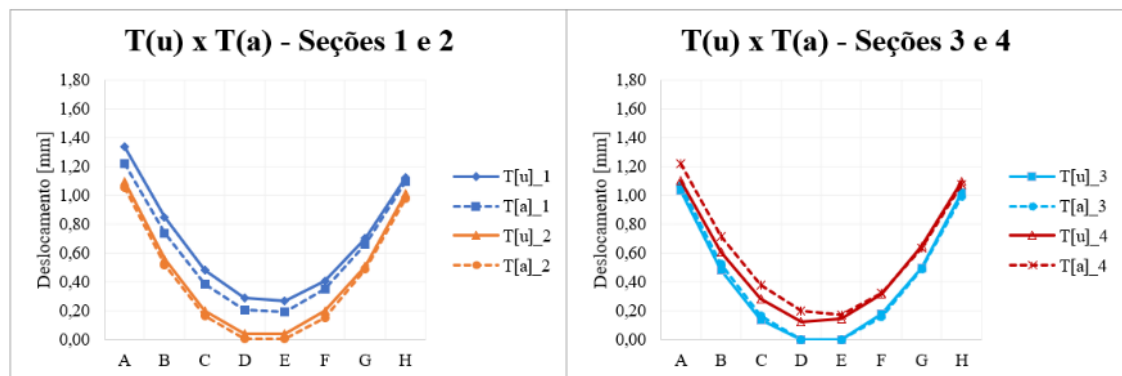


Figura 51: Gráficos de dispersão de T[u] x T[a] – Seções 1 ~ 4

Em todas as sequências de soldadura sobre chapas, a amplitude de deformação máxima de cada provete ocorreu no ponto A1, sendo na direção longitudinal o provete L[u] o de maior deslocamento (1,71 mm), 5,54% maior que o mesmo ponto no provete L[a] (1,62 mm). Na direção transversal, o sentido único, T[u], também obteve a maior amplitude de deslocamento (1,34 mm), 9,43% maior que o mesmo ponto em T[a] (1,22 mm).

Analisando graficamente as distorções de cada sequência de soldadura e comparando-as entre si, percebe-se que as distorções dos provetes onde foram executadas as sequências com sentido alternado foram mais simétricas do que as sequências executadas com o sentido único.

4.1.1.2 Comparação entre direção de soldadura (Longitudinal x Transversal)

Semelhante à comparação entre sentidos de soldadura do item 4.1.1.1, utilizou-se o mesmo procedimento de gráficos de dispersão para realizar uma análise comparativa dos provetes nas direções Longitudinal e Transversal, sendo a Figura 52 e Figura 53 equivalentes aos gráficos de dispersões das sequências L[u] e T[u] e as Figura 54 e Figura 55 respectivas ao comparativo entre as sequências L[a] e T[a].

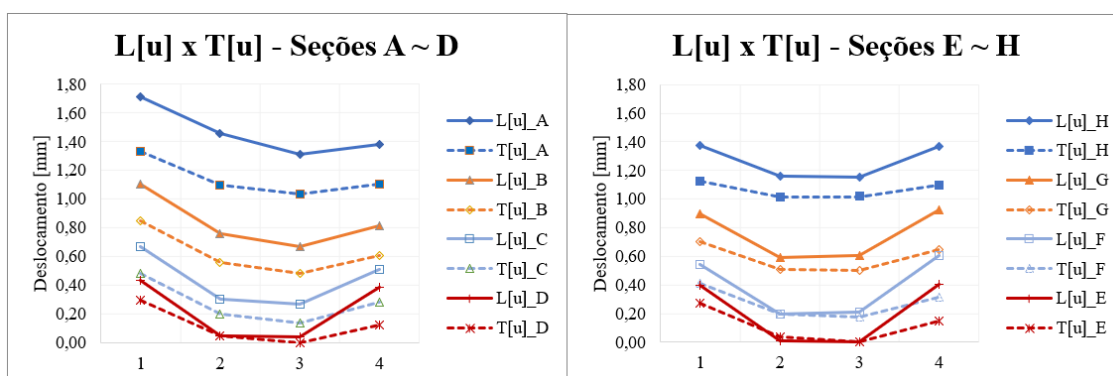


Figura 52: Gráficos de dispersão de L[u] x T[u] – Seções A ~ H

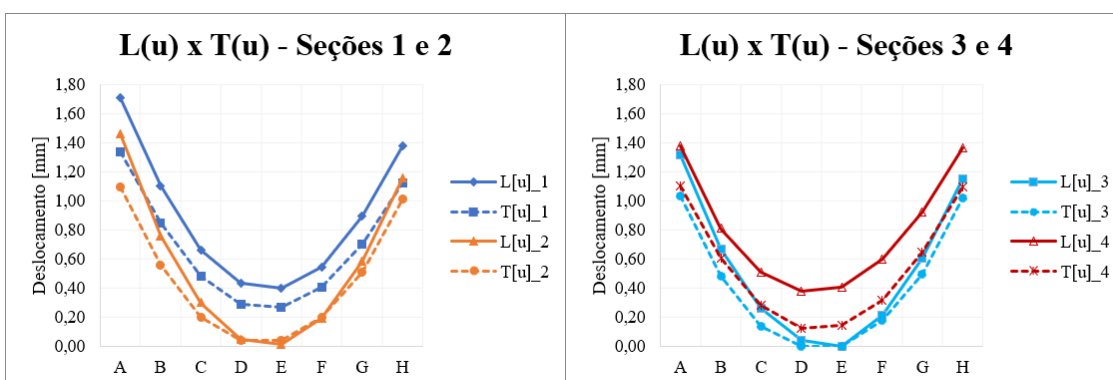


Figura 53: Gráficos de dispersão de L[u] x T[u] – Seções 1 ~ 4

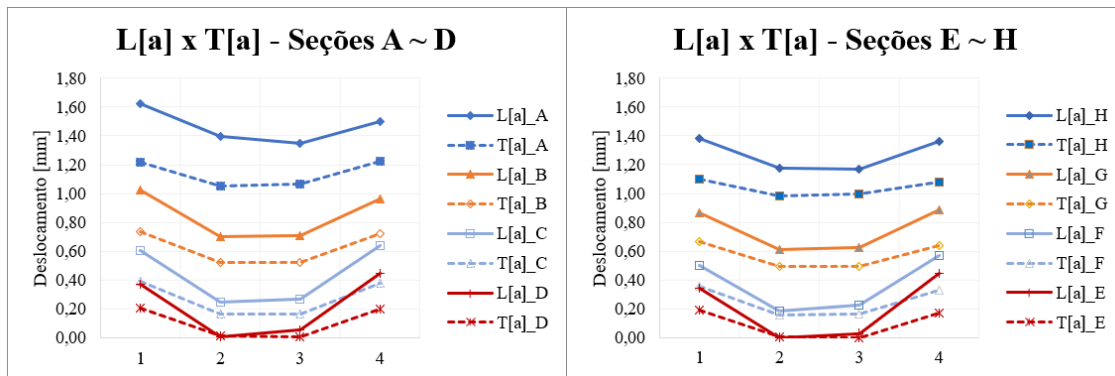


Figura 54: Gráficos de dispersão de L[a] x T[a] – Seções A ~ H

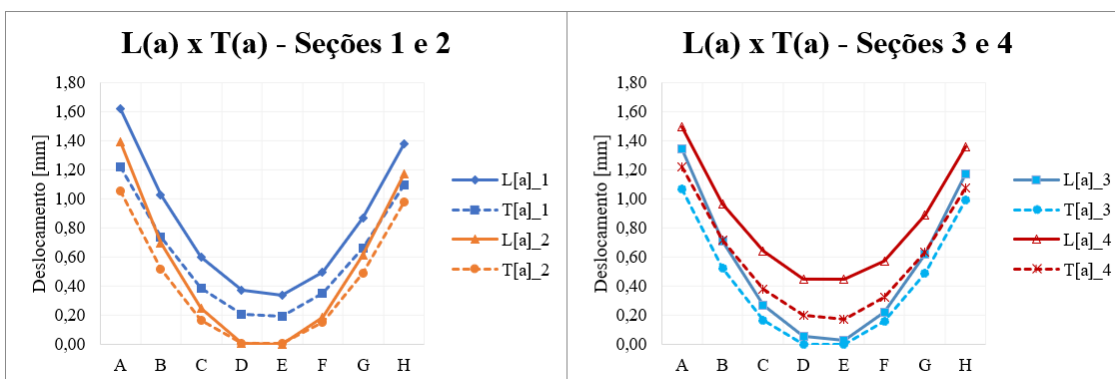


Figura 55: Gráficos de dispersão de L[a] x T[a] – Seções 1 ~ 4

Considerando as médias de deslocamentos dos provetes por sequência de soldadura (Figura 56), percebe-se um valor de deslocamento 33,4% maior nos provetes de direção Longitudinal quando comparado com os provetes de direção Transversais.

Analisando graficamente os deslocamentos, identificou-se que os padrões de curvas de distorções foram semelhantes entre os provetes de sequências das mesmas direções.

Tendo em vista a uniformidade dos materiais utilizados, das dimensões dos provetes, das malhas de controlo e dos parâmetros de soldadura, estas maiores deformações ocorridas nos provetes nas sequências de direção Longitudinal podem ser justificadas pelas diferenças do comprimento total dos cordões e pelo maior tempo de arco aberto ininterrupto.

Os cordões realizados na direção Longitudinal possuem, no total, um comprimento de 120 mm a mais do que os da direção Transversal com o fator adicional mencionado no item 3.2.1.2, em que, com o intuito de uniformizar o procedimento, os cordões subsequentes foram realizados após o respectivo provete atingir, novamente, a temperatura ambiente. Deste modo, a diferença do tempo de arco aberto entre as sequências de, aproximadamente, 28,6% (com menos interrupções) permitiu uma distribuição de calor mais concentrada nas sequências de

direção Longitudinal do que as Transversais, proporcionando maiores gradientes de temperatura e conseqüentemente maiores tensões térmicas e distorções.

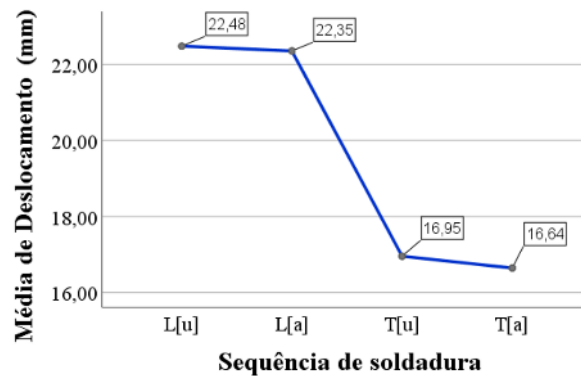


Figura 56: Gráficos das médias de deslocamento das sequências L[u], L[a], T[u] e T[a]

4.1.1.3 Comparação e interação entre direção e sentido de soldadura

De modo a verificar se há diferenças significativas de distorções entre as sequências de soldadura, realizou-se uma análise estatística de comparação entre os fatores direção e sentido e uma avaliação da interação entre os fatores.

Visto que todas os deslocamentos aferidos foram normalizados, tornou-se possível a comparação entre os deslocamentos verticais de cada provete. Portanto, realizou-se o somatório dos deslocamentos de cada provete (Tabela 12) para analisar a influência dos fatores no total de distorções verticais ocasionadas, criando, assim, uma variável única para cada amostra.

Tabela 12: Somatório das distorções dos provetes na soldadura sobre chapas

Sequência	Σ Deslocamento (mm)
L[u]_1	22,30
L[u]_2	22,65
L[u]_3	22,49
L[a]_1	22,91
L[a]_2	22,60
L[a]_3	23,70
T[u]_1	16,41
T[u]_2	17,94
T[u]_3	16,55
T[a]_1	17,21
T[a]_2	16,86
T[a]_3	16,75

O método estatístico utilizado foi a Análise de Variância (ANOVA) univariável a dois fatores e com o nível de significância padrão de 95%. Anteriormente à realização da ANOVA, efetuou-se um Teste de Levene para avaliar a homogeneidade das variâncias. No Teste de Levene obteve-se H_0 (hipótese nula verdadeira) como resultado. Logo, considerou-se que as variâncias são homogêneas e que é possível a utilização do teste paramétrico ANOVA para esta amostragem.

Como resultado da ANOVA (Tabela 13), conclui-se que a hipótese nula é verdadeira ($P < 0,05$) para o fator Direção e que refuta-se a hipótese nula ($P > 0,05$) para o fator Sentido e para a interação entre Direção e Sentido. Em outras palavras, a ANOVA mostrou que existe um efeito significativo da Direção de soldadura sobre os deslocamentos verticais dos provetes, porém, não há diferenças significativas entre as médias dos deslocamentos verticais alternando os sentidos das soldaduras e que não existe uma interação significativa entre os fatores Direção e Sentido.

Tabela 13: Teste de efeitos entre fatores Direção e Sentido (ANOVA)

Origem	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	P
Direção	94,604	94,604	319,386	0,00
Sentido	0,143	0,143	0,481	0,51
Direção * Sentido	0,025	0,025	0,085	0,78

Variável dependente: Deslocamento vertical

O Teste de Levene e o relatório completo da análise encontram-se no Anexo III.

4.1.2 Soldadura multipasses com chanfro em V nas juntas de topo (II)

Posterior à aferição dos deslocamentos nas amostras, gerou-se gráficos de superfície com projeção superior com as médias das amostras de cada sequência para análise comparativa. O desvio padrão máximo das amostras utilizadas para calcular as médias de cada sequência foi de 0,2 mm.

A representação gráfica das médias de deslocamento vertical dos três provetes de cada sequência podem ser observadas na Figura 57, sendo (a) a sequência multipasses com sentido único, M[u], e (b) sequência multipasses com sentido alternado, M[a]. As matrizes com os dados de deslocamentos dos provetes encontram-se no Anexo I.

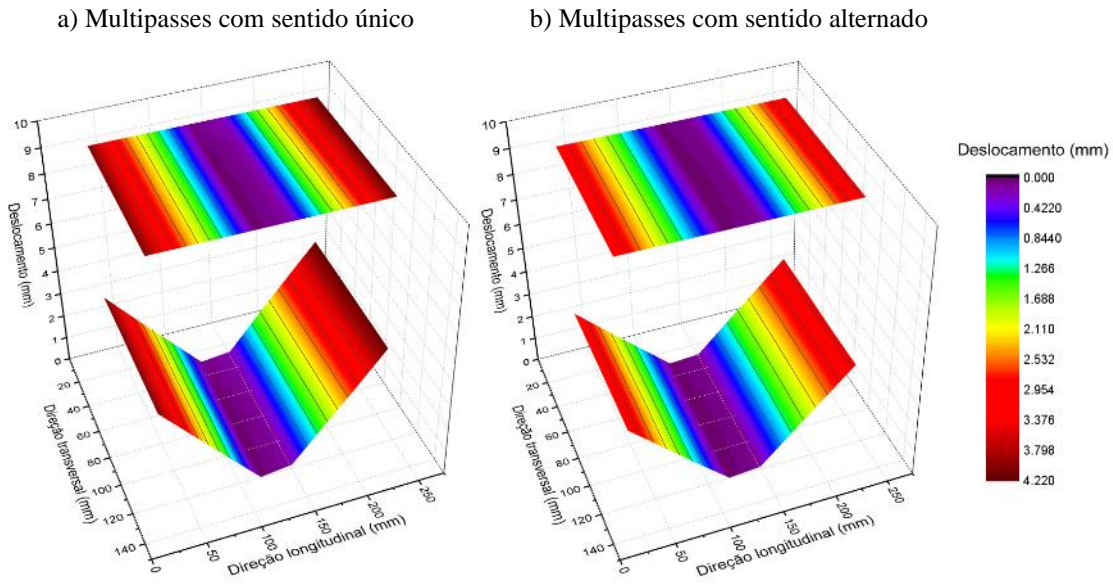


Figura 57: Gráficos de deformações: (a) M[u], (b) M[a]

4.1.2.1 Comparação entre sentidos de soldadura (Único x alternado)

Semelhante ao item 4.1.1.1, gerou-se gráficos de dispersão com os valores médios dos deslocamentos de cada sequência. Os gráficos comparativos de M[u] x M[a] possibilitaram uma análise dos padrões de deformação e das amplitudes dos deslocamentos ocasionados pelo processo de soldadura comparando as seções, sendo as linhas contínuas referentes à sequência de soldadura no sentido único e a linha tracejada referentes ao sentido alternado. Na Figura 58 estão indicadas as seções de A até H e na Figura 59 apenas as médias das seções 1, 2, 3 e 4, pois o desvio padrão entre os valores das seções transversais tem o valor máximo de 0,03 mm.

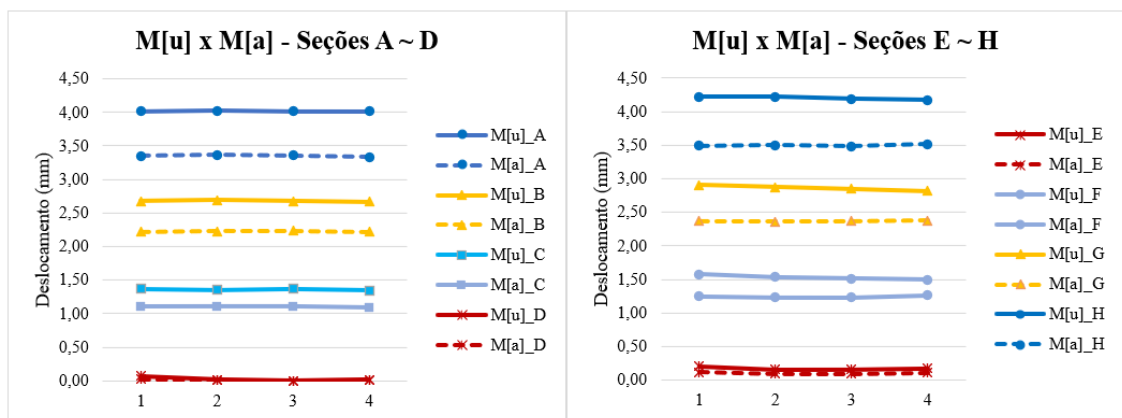


Figura 58: Gráfico de dispersão de M[u] x M[a] – Seções A ~ H

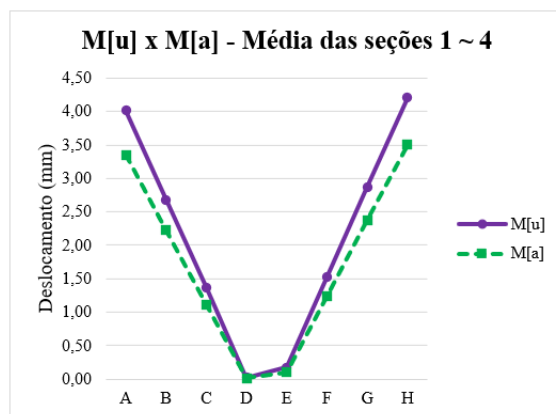


Figura 59: Gráfico de dispersão de M[u] x M[a] – Seções 1 ~ 4

Os gráficos de dispersão (Figura 58) possibilitam constatar que houve pouca distorção transversal pois, conforme citado anteriormente, na direção transversal a deformação ocorreu de forma relativamente uniforme, visto que o desvio padrão entre os valores obtidos das seções transversais são desprezíveis (menores ou iguais a 0,03 mm).

Em ambas as sequências de soldadura, o deslocamento vertical médio máximo ocorreu na Seção H, tendo M[u] um deslocamento médio 20,1% maior do que em M[a] nesta seção.

Com o propósito de verificar se há diferenças estatísticas significativas entre as distorções das soldaduras dos diferentes sentidos, realizou-se uma ANOVA a um fator com o nível de significância padrão de 95%.

De forma análoga ao item 4.1.1.3, todos os deslocamentos verticais aferidos foram somados e transformados em uma variável única para cada amostra (Tabela 14). Antes da realização da ANOVA, realizou-se um Teste de Levene com os dados das amostras para verificar a homogeneidade das variâncias. Obteve-se como resultado H_0 (hipótese nula) como sendo verdadeira de modo a concluir que as variâncias são homogêneas e que é possível a utilização do teste paramétrico ANOVA para esta amostragem de dados.

Tabela 14: Somatório das distorções dos provetes na soldadura multipasses

Sequência	Σ Deslocamento (mm)
M[u]_1	69,84
M[u]_2	66,61
M[u]_3	67,51
M[a]_1	56,24
M[a]_2	51,82
M[a]_3	59,60

A ANOVA obteve a hipótese nula verdadeira como resultado ($P < 0,05$) para o fator sentido de soldadura. Logo, conclui-se que o sentido de soldadura multipasses teve um efeito significativo na distorção final dos provetes e que, de modo geral, as amostras de soldaduras multipasses com sentido alternado tiveram uma média de deslocamento vertical 17,8% menor quando comparada com a sequência de multipasses com sentido único (Figura 60).

O resultado da ANOVA encontra-se na Tabela 15 e o relatório completo pode ser consultado no Anexo III.

Tabela 15: ANOVA entre os sentidos da soldadura multipasses

	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	P
Entre Grupos	219,609	219,609	24,362	0,008
Nos Grupos	36,057	9,014		
Todos	255,666			

Variável dependente: Deslocamento vertical

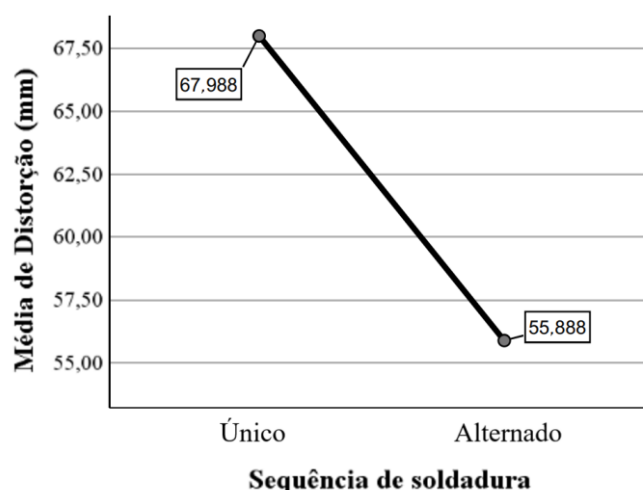
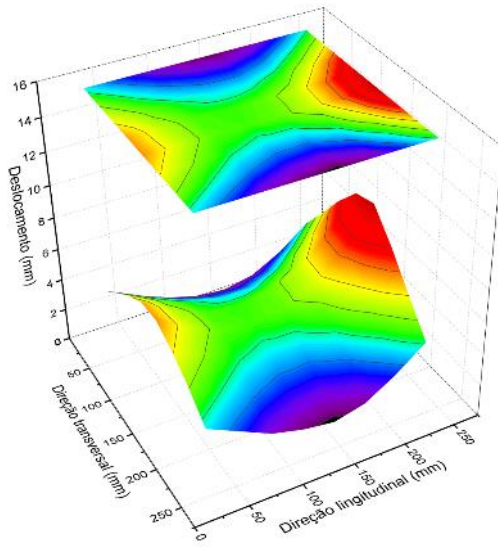


Figura 60: Gráficos das médias de deslocamento das sequências M[u] e M[a]

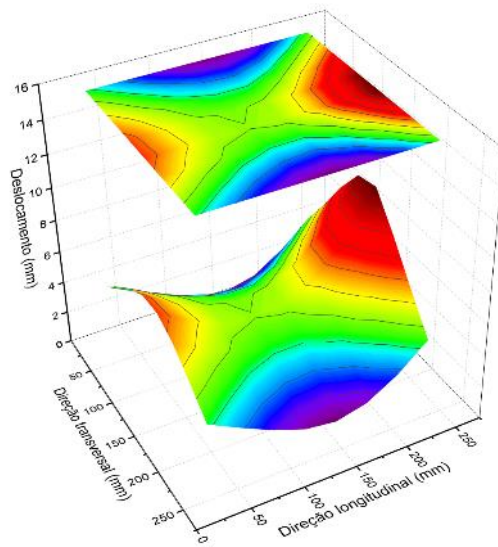
4.1.3 Soldadura juntas de topo nas chapas finas (III)

Posterior à aquisição das matrizes dos deslocamentos dos provetes de soldadura de juntas de topo, calculou-se o desvio padrão entre as amostras de cada sequência e obteve-se o valor máximo de 0,05 mm. Como as diferenças entre os provetes de cada sequência foram irrelevantes, geraram-se gráficos de superfície com projeção em que as médias das matrizes foram rotacionadas para cada sequência de soldadura. Esta representação gráfica das superfícies pode ser visualizada na Figura 61, sendo (a) a sequência simétrica (SS), (b) sequência de passes em retrocesso (SR) e (c) sequência corrida (SC).

a) Sequência Simétrica (SS)



b) Sequência em Retrocesso (SR)



c) Sequência Corrida (SC)

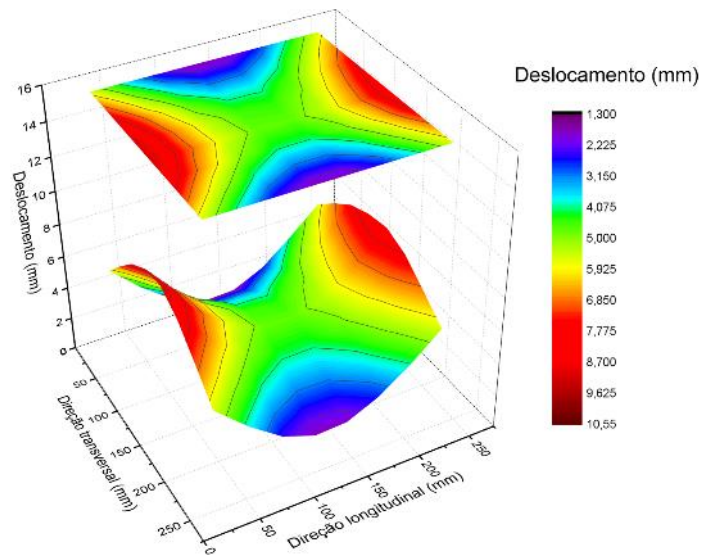


Figura 61: Gráficos de deformações: (a) SS, (b) SR e (c) SC

4.1.3.1 Comparação entre seqüências de soldadura (SS x SR x SC)

Análogo ao item 4.1.1.1, foram gerados gráficos de dispersão com os valores médios das matrizes de deslocamentos verticais de cada seqüência de soldadura. Na Figura 62 estão indicadas as seções de A até H e na Figura 63 as seções de 1 até 8.

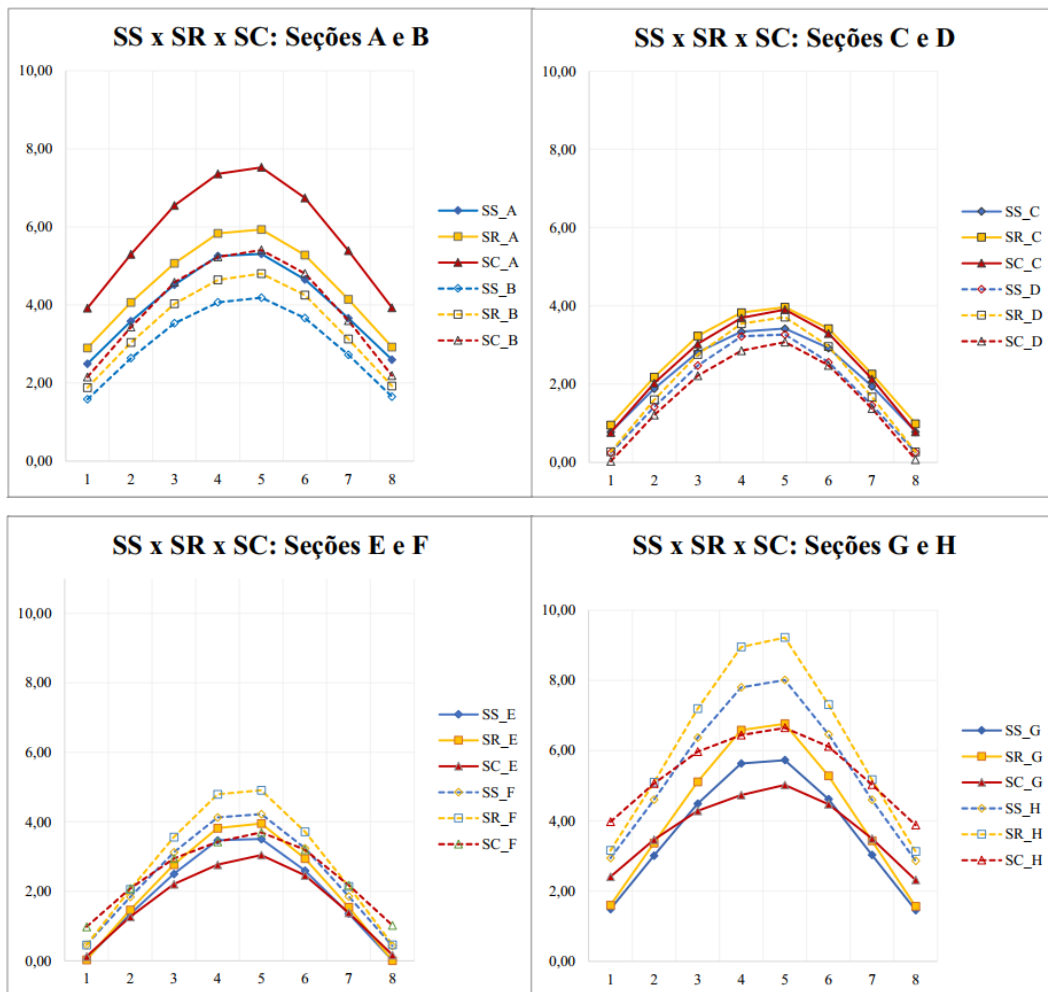


Figura 62: Gráficos de dispersão de SS x SR x SC – Seções A ~H

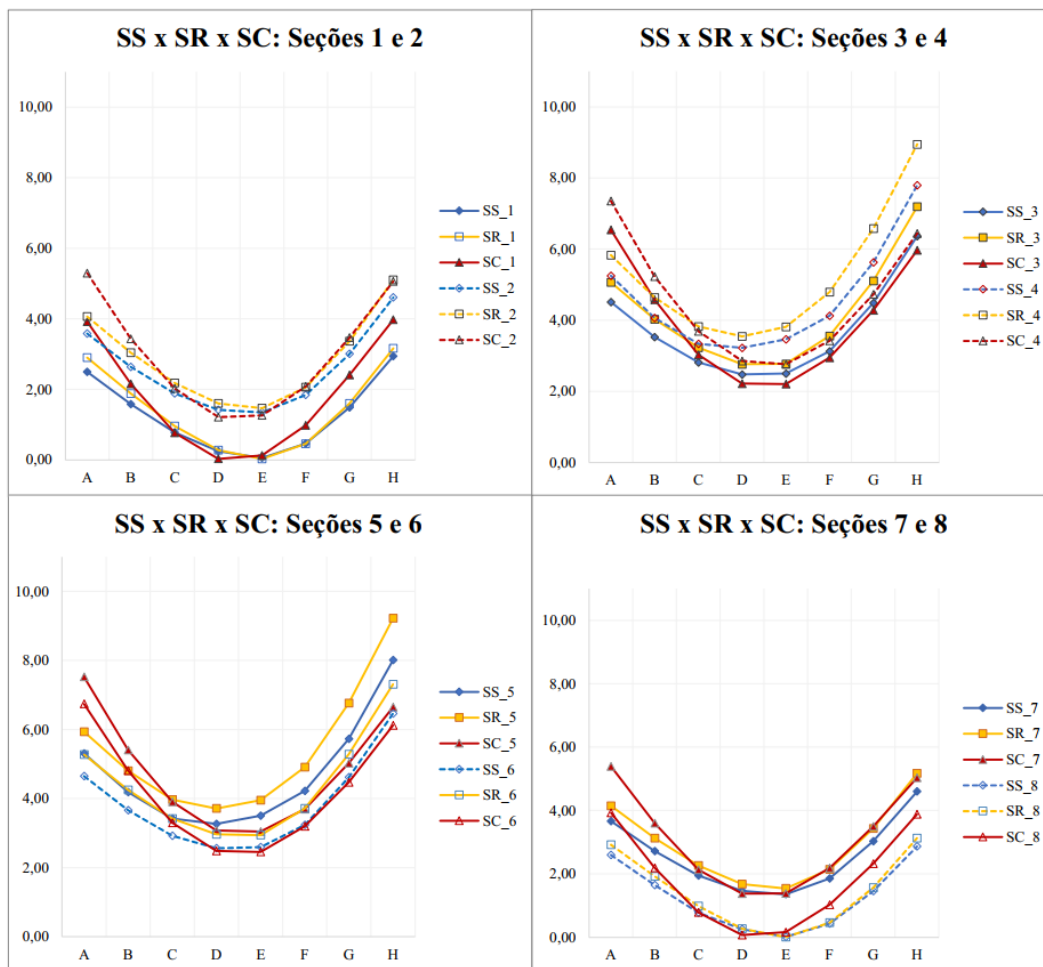


Figura 63: Gráficos de dispersão de SS x SR x SC – Seções 1 ~8

Após a rotação corretiva das matrizes, é possível perceber que as deformações ocorreram de modo simétrico entre o eixo de direção da soldadura e que os maiores picos de deslocamento ocorreram entre os pontos 4 e 5 (região onde estão situados os cordões).

Ao comparar os maiores deslocamentos de cada sequência, obtém-se o ponto H5 como o de maior deslocamento para as sequências SS (8,01 mm) e SR (9,22 mm), e o ponto A5 para a sequência SC (7,52 mm), valor 6,1% e 18,4% menor que o ponto de maior deslocamento de SS e SR, respectivamente

De modo geral, pode-se concluir que a Sequência Simétrica (SS) obteve os menores valores de deslocamento e que, a Sequência Corrida (SC), apesar de não possuir o menor deslocamento total, gerou distorções mais simétricas em ambas as direções (transversal e longitudinal). Como pode-se observar na Figura 64, em valores médios, a Sequência Simétrica (SS) deformou cerca de 9,8% a menos que a Sequência Corrida (SC) e 12,0% menos que a Sequência de Passes em Retrocesso (SR).

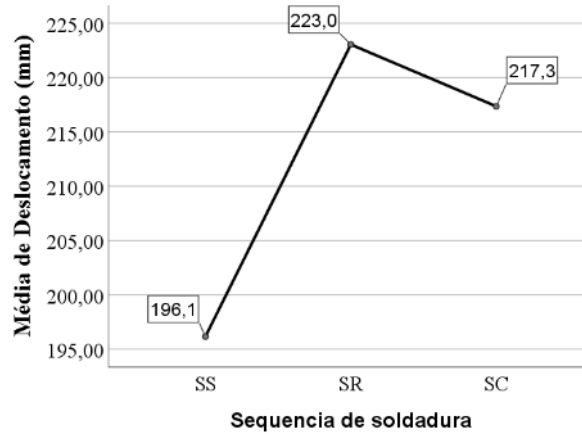


Figura 64: Gráficos das médias de deslocamento das sequências SS, SR e SC

Para verificar se as diferenças dos deslocamentos entre as sequências são estatisticamente significativas, realizou-se uma ANOVA a um fator com o nível de significância padrão de 95%.

Análogo ao item 4.1.1.3, realizou-se o somatório dos deslocamentos verticais transformou-se em uma variável única para cada amostra (Tabela 16). Previamente a realização da ANOVA, aplicou-se o Teste de Levene com os dados das amostras para verificar a homogeneidade das variâncias. O teste resultou a hipótese nula como sendo verdadeira de modo a concluir que as variâncias são homogêneas e que é possível a utilização do teste paramétrico ANOVA para esta amostragem de dados.

Tabela 16: Somatório das distorções dos provetes da soldadura em Juntas de Topo

Sequência	Σ Deslocamento (mm)
SS_1	275,99
SS_2	280,32
SS_3	251,98
SR_1	316,20
SR_2	296,22
SR_3	311,57
SC_1	327,63
SC_2	324,18
SC_3	325,90

Conforme indicado na Tabela 17, o valor-P obtido com a ANOVA foi de 0,011, indicando a hipótese nula verdadeira como resultado ($P < 0,05$). Portanto, conclui-se que há uma diferença significativa na distorção final dos provetes entre as sequências de soldadura.

Tabela 17: ANOVA entre as sequências de soldadura em juntas de topo

	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	P
Entre Grupos	1205,667	602,834	10,337	0,011
Nos Grupos	349,892	58,315		
Total	1555,559			

Variável dependente: Deslocamento vertical

Para realizar comparações múltiplas e constatar entre quais as sequências existem diferenças significativas, utilizou-se o Teste de Tukey.

De acordo com o indicado na Tabela 18, pode-se concluir que existem diferenças significativas entre as distorções ocorridas comparando as sequências SS x SR e as sequências SS x SC, tendo como valor-P 0,012 e 0,033, respectivamente. Já para a interação SR x SC, o Teste de Tukey indicou que não existem diferenças significativas entre as médias de deslocamentos das sequências, sendo o valor-P igual a 0,652 ($P > 0,05$).

Tabela 18: Teste Tukey – Comparações múltiplas entre as sequências

(I) Sequência	(J) Sequência	Diferença Média (I-J)	P	Lim. Inferior	Lim. Superior
SS	SR	-26,901*	0,012	-43,032	-7,770
	SC	-211,202*	0,033	-40,333	-2,071
SR	SS	26,901*	0,012	7,770	46,032
	SC	5,699	0,652	-13,432	24,830
SC	SS	21,202*	0,033	2,071	40,333
	SR	-5,699	0,652	-24,830	13,432

* A diferença média é significativa no nível 0,05

Os relatórios da ANOVA e do Teste Tukey podem ser consultados no Anexo III.

4.2 COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS METROLÓGICAS

Em conformidade com o método de análise de comparação apresentado no item 3.3.3, gerou-se matrizes das diferenças entre a metodologia computadorizada e a analógica de cada provete. Por meio destas matrizes, criou-se um gráfico *boxplot* (Figura 65) indicando o limite inferior, limite superior e mediana das diferenças entre as metodologias de cada sequência de soldadura.

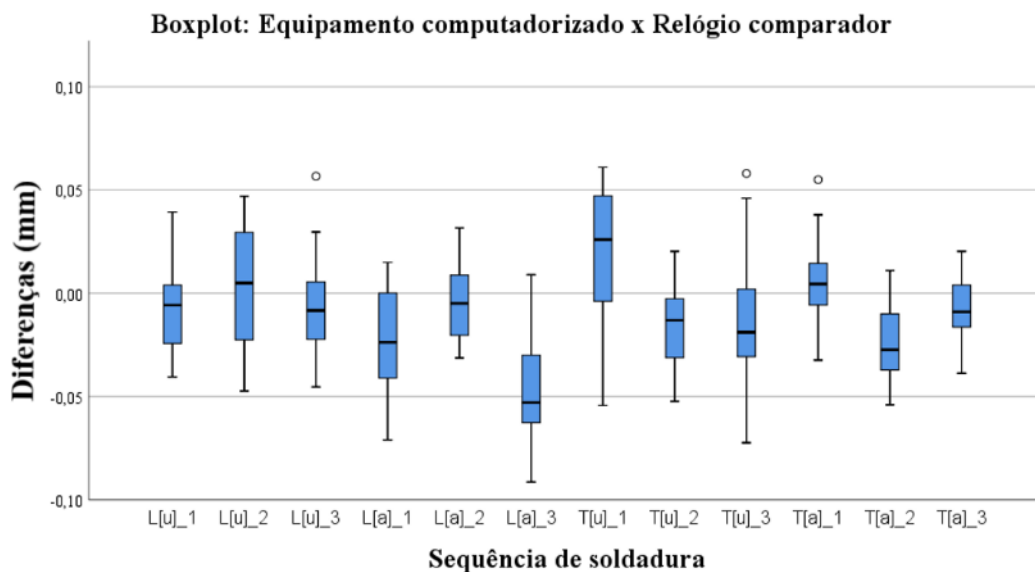


Figura 65: Gráfico *boxplot* das diferenças entre metodologias metrológicas

Verificou-se através do gráfico *boxplot* que, dos 768 pontos analisados, as diferenças dos valores de aferição entre as metodologias variam no máximo entre 0,06 mm (limite superior) e -0,08 mm (limite inferior). Ao analisar todos as diferenças, de modo geral, obteve-se a média igual a -0,01 mm, a mediana igual a -0,01 mm e a moda igual a 0 mm. Constatou-se, também, que mais de 50% dos valores encontram-se entre 0,01 mm e -0,03 mm.

Por meio da Figura 66 (a) e (b) é possível verificar uma comparação entre os gráficos do provete de sequência de soldadura T[u]_1 (proвете em que houve a maior diferença registrada) com as matrizes da metodologia computadorizada e da metodologia analógica, respectivamente.

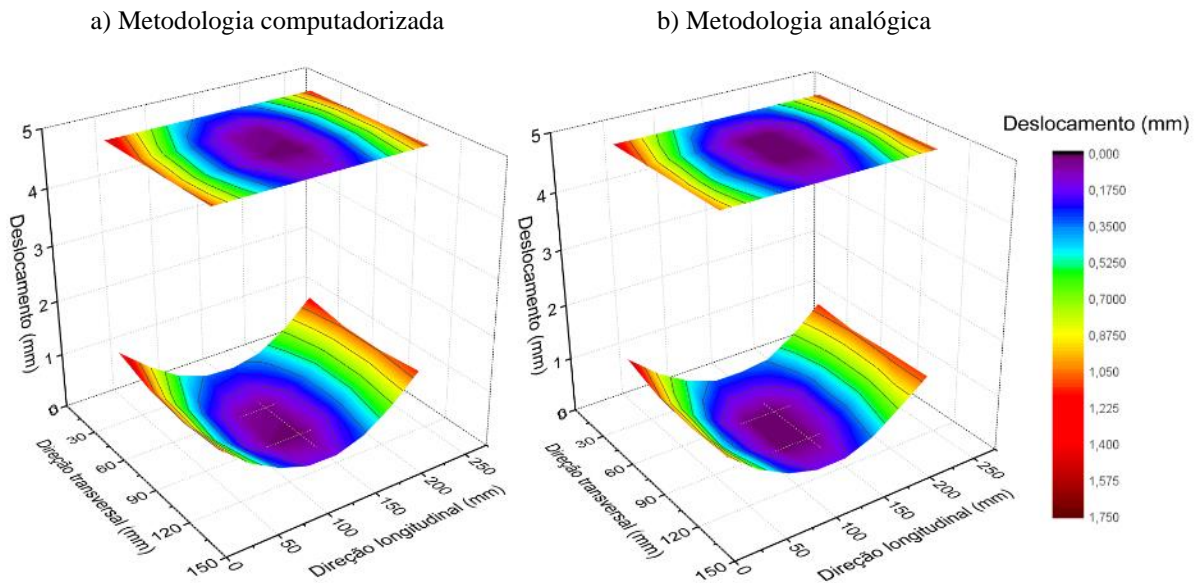


Figura 66: Comparação dos gráficos de superfície do provete T[u]_1: (a) Metodologia computadorizada, (b) Metodologia analógica

Pode-se concluir por toda a análise que, maioritariamente, as aferições utilizando a metodologia analógica obtiveram valores em média 0,01 mm maiores que a metodologia computadorizada e que, devido à escala de precisão dos equipamentos serem altas, as diferenças encontradas não são significativas, pois ambas as metodologias foram capazes de identificarem os padrões de deformação mais relevantes.

As matrizes utilizadas para o cálculo das diferenças entre as metodologias encontram-se disponíveis no Anexo I

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O entendimento dos mecanismos e parâmetros que influenciam as distorções mostrou-se essencial para a prevenção, controle ou correção de deformações ocasionadas durante o processo de soldadura, em qualquer tipo de união de peças. Deste modo, dentro das condições experimentais e teóricas do presente trabalho, foi possível concluir que:

Grupo I: Soldadura sobre chapas

- O pico de deslocamento vertical de todas as sequências ocorreu no ponto A1, região mais próxima do início do primeiro cordão de soldadura e mais afastada do término do último cordão. Sendo que, na direção longitudinal, a sequência L[u] resultou no maior deslocamento médio registrado (1,71 mm), 5,54% maior que no provete L[a] (1,62 mm). Na direção transversal, registrou-se em T[u] o pico de deslocamento médio máximo (1,34 mm), 9,43% maior do que o mesmo ponto na sequência T[a] (1,22 mm).
- A análise estatística ANOVA, por meio do somatório de deslocamento geral médio de cada sequência, indicou que a direção de soldadura tem uma influência significativa nas distorções, enquanto para o sentido de soldadura não há diferenças significativas. Por meio da análise de variância, constatou-se também que não existe uma interação significativa entre os fatores direção e o sentido de soldadura.
- Mediante o somatório do deslocamento geral médio das sequências, obteve-se a direção Longitudinal como a de maior deslocamento, sendo 33,4% maior que a direção Transversal. Esta diferença expressiva entre as direções Longitudinal e Transversal pode ter como justificativa a diferença de tempo de arco aberto e a interrupção por distância entre as soldaduras. Sendo que, na direção Longitudinal, os cordões têm um comprimento 120 mm superior aos da direção Transversal. Deste modo, nas sequências de soldaduras Longitudinais, existe a hipótese de ter ocorrido uma distribuição de calor mais concentrada e com maiores gradientes de

temperatura e, conseqüentemente, maiores tensões térmicas e distorções do que nas seqüências de soldadura Transversais.

Grupo II: Soldadura multipasses com chanfro em V nas juntas de topo

- As distorções transversais em todos os provetes foram desprezíveis, tendo em cada seção transversal um desvio padrão máximo de 0,03 mm. Entretanto, as distorções longitudinais foram significativas e, em todos os provetes, o maior pico ocorreu na seção H, sendo o deslocamento médio em M[u] 20,1% maior do que em M[a] nesta seção.
- A análise estatística ANOVA realizada indicou que há uma diferença estatística significativa de deslocamento entre as seqüências de soldadura multipasses em sentido único e alternada. Por meio da média dos somatórios dos deslocamentos de cada seqüência, constatou-se que M[a] resultou em um deslocamento vertical 17,8% menor do que M[u].

Grupo III: Soldadura em juntas de topo nas chapas de 3 mm

- Nas soldaduras em juntas de topo nas chapas de 3 mm houve um maior deslocamento nas seções 4 e 5 de todos os provetes, sendo estas as regiões mais próximas do eixo onde ocorreram as soldaduras. Para as seqüências SS e SR, o H5 foi o ponto de maior deslocamento (8,01 mm e 9,22 mm, respectivamente). No entanto, para a seqüência SC este ponto de maior pico de deslocamento foi o A5 (7,52 mm), um valor 6,1% e 18,4% menor quando comparado com os pontos de SS e SR, nesta ordem.
- Por meio das ferramentas estatísticas ANOVA e Teste de Tukey, constatou-se que existe uma diferença significativa no deslocamento entre estas seqüências de soldadura e que esta diferença é apenas para a seqüência SS em relação às demais (SR e SC).
- Deste modo, conclui-se que a seqüência SS é indicada quando se tem o objetivo de menores distorções finais, que a seqüência SC é recomendada quando se tem a produtividade como prioridade e que a seqüência SR deve ser utilizada apenas em casos onde as seqüências SS e SC não forem viáveis.

Comparação entre metodologias metrológicas

- Por intermédio dos gráficos *boxplot* das diferenças entre as metodologias constatou-se que as diferenças de deslocamento entre os 768 pontos comparados possuem um limite de erro superior máximo de 0,06 mm e inferior de -0,08 mm.
- De modo geral, apurou-se que as diferenças entre as metodologias obtiveram uma média geral de -0,01 mm, uma moda de 0mm e que mais de 50% dos valores encontram-se entre 0,01 mm e -0,03 mm. Desta forma, conclui-se que as metodologias obtiveram resultados semelhantes e que ambas foram capazes de identificar os padrões relevantes de deformação ocorridos nos provetes.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando a complexidade de previsão das distorções ocasionadas pelo processo de soldadura, diversos projetos complementares podem ser executados com o objetivo de aprofundar a investigação nos tópicos. Sendo as principais sugestões:

- Desenvolver um método de elementos finitos com parâmetros de direção e sequência semelhantes aos desenvolvidos no presente trabalho. Tendo como objetivo comparar os resultados teóricos e práticos e compreender, de forma mais aprofundada, o surgimento e as dimensões das tensões de tração e compressão;
- Realizar um trabalho semelhante de soldadura multipasses com provetes de maiores dimensões transversais a fim de detectar, com maior precisão, as tensões transversais;
- Promover um experimento análogo, modificando o intervalo entre os cordões, de modo que sejam executados sem arrefecimento até à temperatura ambiente e monitorar a temperatura dos provetes durante o processo;
- Executar ensaios de tração com os provetes a fim de investigar se as sequências influenciam significativamente nas propriedades mecânicas;
- Utilizar extensômetros em um experimento semelhante para quantificar as tensões residuais provenientes dos procedimentos de soldagem;
- Verificar as malhas dos provetes escaneadas com a ferramenta de análise de distorções do MetrologX4, o qual permitiria uma análise completa da superfície. A licença do software no momento da realização deste trabalho não permitia a utilização deste recurso pelo MetrologX4 e nem por softwares alternativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. T. Silva, “Estudo da influência da sequência de soldagem na geração de distorções,” Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- [2] V. N. Marção, “Estudo da Distorção Gerada pelo Processo FCAW e uma Comparação com GMAW,” Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- [3] P. V. Marques, P. J. Modenesi, and A. Q. Bracarense, *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*, Editora UF. Belo Horizonte, 2005.
- [4] D. Modenesi, P., Marques, P., Santos, “Introdução À Metalurgia Da Soldagem,” *Belo Horizonte, MG ...*, p. 209, 2012, [Online]. Available: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>.
- [5] Z. I. Ahmed and A. M. Saadon, “Optimization Process Parameters of Submerged Arc Welding Using Taguchi Method,” *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, no. 1, pp. 149–152, 2015.
- [6] J. Wang, X. Shi, H. Zhou, Z. Yang, and J. Liu, “Dimensional precision controlling on out-of-plane welding distortion of major structures in fabrication of ultra large container ship with 20000TEU,” *Ocean Eng.*, vol. 199, no. January, p. 27, 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.106993.
- [7] I. A. Daniyan, K. Mpofu, A. O. Adeodu, and O. L. Rominiyi, “Investigation of Distortion , Stress and Temperature Distribution during Assembly of the Suspension System of a Distribution Rail Car,” *Procedia Manuf.*, vol. 38, no. 2019, pp. 1792–1800, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.088.
- [8] I. Felizardo, “Apostila de Tecnologia da Soldagem.” Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 113, 2016.
- [9] M. Pandit, S. Sood, P. Mishra, and P. Khanna, “Mathematical analysis of the effect of process parameters on angular distortion of MIG welded stainless steel 202 plates by using the technique of response surface Methodology,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.570.

- [10] A. Sehrawat, D. Sharma, and P. Khanna, “Mathematical Modelling for Prediction of Angular Distortion in MIG Welding of Stainless Steel 301,” *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 8, no. July, pp. 884–890, 2020, doi: 10.22214/ijraset.2020.30372.
- [11] C. Fortes and C. T. Vaz, “Apostila de Soldagem MIG / MAG - ESAB.” p. 135, 2005.
- [12] A. Scotti and V. Ponomarev, *Soldagem MIG/MAG*, Artliber E. São Paulo, 2008.
- [13] E. Wainer, S. Brandi, and F. D. H. Mello, *Soldagem: Processos e Metalurgia*. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 2004.
- [14] I. G. Machado, *Soldagem e Técnicas Conexas: Processos*. Porto Alegre: UFRGS, Centro de Tecnologia, LS&TC, 2007.
- [15] ESAB, “Produtos e soluções ESAB,” 2018. www.esab.com.br/br/pt/products/index.cfm?fuseaction=home.productsbycategory&catId=54 (accessed Mar. 11, 2019).
- [16] A. Q. Bracarense, T. F. B. Filho, I. Felizardo, and W. G. Rogana, “Soldagem robotizada,” 2002.
- [17] A. Fischer, “Estudo da Influência dos Parâmetros no Processo de Soldagem GMAW-Arco Pulsado,” Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- [18] L. P. N. Junior, “Otimização De Um Processo De Solda Mig/Mag Para Aplicação Na Indústria Automobilística Através Da Utilização Da Técnica Do Projeto E Análise De Experimentos,” Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003. doi: 10.1051/medsci/200925121155.
- [19] J. Ribeiro, “Caracterização Experimental e Numérica de Campos de Tensões Residuais Provocadas por Processos de Fabrico,” Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006.
- [20] M. Mochizuki and S. Okano, “Effect of Welding Process Conditions on Angular Distortion Induced by Bead-on-plate Welding,” *ISIJ Int.*, vol. 58, no. 1, pp. 153–158, 2018.
- [21] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, “Overview: Residual stress. Part 2 – Nature

- and origins,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 17, no. April, pp. 366–375, 2001.
- [22] D. Deng and H. Murakawa, “Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint,” vol. 43, pp. 353–365, 2008, doi: 10.1016/j.commat.2007.12.006.
- [23] C. L. Jenney and A. O’Brien, *Welding Handbook, Welding Science & Technology*, 9th ed., vol. 1. Miami, 2001.
- [24] M. V Deo, “Minimization of bowing distortion in welded stiffeners using differential heating,” Woodhead Publishing Limited, 2011. doi: 10.1533/9780857092908.2.169.
- [25] R. Blondeau, *Metallurgy and Mechanics of Welding Processes and Industrial Applications*. London, UK: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [26] R. Coraine, “Soldagem GMAW-P Robotizada de Alumínio: Influência Do Tipo De Chanfro, Tecimento E Sentido De Laminação Na Distorção Angular,” Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2011. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [27] Y. Ahmet Irfan, K. Memduh, and D. Ezgi, “Angular Distortion in Butt Arc Welding,” *Int. J. Eng. Sci. Appl.*, vol. 2, no. 4, 2018.
- [28] T. Schenk, “Modelling of Welding Distortion The Influence of Clamping and Sequencing,” Albert Ludwig Universität Freiburg, 2011.
- [29] S. Mounika and D. V. N. J. J. Rao, “Effect of Weld Pass Sequencing On Temperature Distribution and Residual Stresses in Gmaw,” *J. Therm. Energy Syst.*, vol. 4, no. 1, pp. 23–40, 2019.
- [30] D. Podder, O. P. Gupta, S. Das, and N. R. Mandal, “Experimental and numerical investigation of effect of welding sequence on distortion of stiffened panels,” *Weld. World*, vol. 63, no. 5, pp. 1275–1289, 2019, doi: 10.1007/s40194-019-00747-8.
- [31] L. Gannon, Y. Liu, N. Pegg, and M. Smith, “Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates,” *Mar. Struct.*, vol. 23, no. 3, pp. 385–404, 2010, doi: 10.1016/j.marstruc.2010.05.002.
- [32] D. Radaj, *Welding Residual Stresses and Distortion: Calculation and Measurement*,

- DVS-Verlag. Düsseldorf, 2003.
- [33] Bezerra, “Simulação Numérica Da Soldagem Com Aplicação À Caracterização Do Comportamento Dinâmico De Estruturas Soldadas,” Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- [34] S. Soni and N. Aggarwal, “Optimization of Distortion in Welding,” *Int. J. Enhanc. Res. Sci. Technol. Eng.*, vol. 4, no. 7, pp. 128–133, 2015.
- [35] P. J. Modenesi, “Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico,” Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- [36] A. J. R. Londoño, “Precipitação De Fases Intermetálicas E Austenita Secundária Na Zac De Soldagens Multipasse De Aços,” Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- [37] J. Winczek, “Modeling of temperature field during multi-pass gmaw surfacing or rebuilding of steel elements taking into account the heat of the deposit metal,” *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 1, p. 19, 2017, doi: 10.3390/app7010006.
- [38] T. Okumura and C. Taniguchi, “Engenharia de Soldagem e Aplicações.” Rio de Janeiro, p. 493, 1982.
- [39] S. M. Vyas, S. I. Shah, and G. D. Acharya, “Minimization of Distortion During Gas Metal Arc Welding Process : A Review,” *J. Exp. Appl. Mech.*, vol. 8, no. 3, pp. 48–53, 2017.
- [40] S. Ramani and V. Velmurugan, “Effect of Process Parameters on Angular Distortion of Mig Welded Ai6061 Plates,” *AIMTDR 2014*, vol. 2, no. Aimtdr, pp. 1–6, 2014.
- [41] M. S. Lohate and A. V. Damale, “Fuzzy Based Prediction of Angular Distortion of Gas,” *Int. J. Innov. Eng. Res. Technol.*, p. 10, 2015.
- [42] A. Narwadkar and S. Bhosle, “Optimization of MIG Welding Parameters to Control the Angular Distortion in Fe410WA Steel,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, no. 16, pp. 2158–2164, 2016, doi: 10.1080/10426914.2015.1127939.
- [43] A. Sakri, M. Guidara, and F. Elhalouani, “Numerical Simulation of MIG Type Arc Welding Induced Residual Stresses and Distortions in Thin Sheets of S235 Steel,” *IOP*

- Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 1, p. 8, 2010, doi: 10.1088/1757-899X/13/1/012020.
- [44] P. Kumar, “Parametric Optimization Of Angular Distortion On Mild Steel By Using MIG Welding,” *Int. J. Adv. Eng. Technol.*, vol. VI, no. IV, p. 6, 2015.
- [45] A. Kumar, “Effect of Various Parameters on Angular Distortion in Welding,” *Int. J. Curr. Eng. Technol.*, vol. 35, no. 08, pp. 132–136, 2011, doi: 10.1106/PBDK-A5KM-8LH0-K1V4.
- [46] J. C. Veiga, “Desenvolvimento de uma Máquina de Controlo Numérico para Soldadura Automática,” Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2017.
- [47] Corus Strip Products UK, “EN 10025-2:2004, European standard for hot-rolled structural steel.” p. 4, 2006.
- [48] ESAB, “Ok Autrod 12.51, Premium quality copper-coated wire.” p. 2, 2016.
- [49] Eurotrod, “Consumíveis para soldadura,” 2015. http://www.electroportugal.com/downloads/file70_pt.pdf (accessed Jun. 17, 2019).
- [50] ESAB, “Mig/Mag Wires (Gmaw) Mild Steel Wires.” p. 2, 2020, [Online]. Available: https://www.esab.co.uk/shared/customcf/spdfcall.cfm?cnodeID=13282&siteID=en_GB&localeID=1.
- [51] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 6th ed. Hoboken, 2012.
- [52] A. Do Bem, “Efeito da sequência de soldadura na distorção de estruturas soldadas,” Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2017.
- [53] A. J. M. Fernandes and C. M. M. Oliveira, “Interferência dos Parametros de Soldadura na Deformação de Chapas Metalicas,” Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2016.

ANEXOS

ANEXO I: MATRIZES E GRÁFICOS DE SUPERFÍCIE COM PROJEÇÃO

(I) Soldadura sobre chapas

Provetes	Sequência de soldadura
01, 02, 03	L[u]: Longitudinal sentido único
04, 05, 06	L[a]: Longitudinal sentido alternado
07, 08, 09	T[u]: Transversal sentido único
10, 11, 12	T[a]: Transversal sentido alternado

Matrizes dos deslocamentos

Matrizes de medição: Provete 1								
Pré-soldadura: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9850	35,0383	35,0600	35,0267	35,0350	35,0150	35,0083	35,0150
2	34,9017	34,9650	34,9850	34,9783	34,9783	34,9667	34,9567	34,9550
3	34,9150	34,9667	34,9967	35,0000	34,9967	34,9583	34,9583	34,9583
4	35,0133	35,0817	35,1067	35,1150	35,1033	35,0967	35,0950	35,0767
Pós-soldadura: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,3133	34,7683	34,3408	34,0783	34,0300	34,1550	34,4950	34,9900
2	34,9750	34,3600	33,9167	33,6500	33,5850	33,7567	34,1450	34,6917
3	34,8500	34,2750	33,8650	33,6450	33,5950	33,7700	34,1700	34,6800
4	35,0000	34,5133	34,2200	34,0900	34,1083	34,2800	34,5800	35,0533
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,0025	35,0515	35,0705	35,0355	35,0330	34,9975	35,0095	34,9875
2	34,9170	34,9730	34,9835	34,9750	34,9655	34,9450	34,9420	34,9240
3	34,9170	34,9730	34,9815	34,9905	34,9885	34,9615	34,9455	34,9310
4	35,0040	35,0845	35,0910	35,0860	35,0840	35,0615	35,0605	35,0420
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,3420	34,7815	34,3640	34,0965	34,0595	34,1710	34,5330	34,9920
2	35,0040	34,3620	33,9120	33,6515	33,6060	33,7675	34,1595	34,7115
3	34,8590	34,2705	33,8740	33,6590	33,6165	33,8010	34,1820	34,7095
4	35,0125	34,5235	34,2280	34,0960	34,1190	34,2925	34,6145	35,0360

Matrizes de medição: Provete 2								
Pré-soldadura: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,8500	34,8867	34,9100	34,9067	34,9433	34,9833	35,0033	35,0367
2	34,8500	34,8633	34,8767	34,8967	34,9167	34,9533	34,9533	34,9267
3	34,9133	34,9333	34,9533	34,9533	34,9667	34,9400	34,9633	34,9467
4	35,0867	35,1033	35,1200	35,1167	35,1133	35,1367	35,1233	35,0800
Pós-soldadura: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,1700	34,6100	34,1800	33,9500	33,9300	34,1200	34,4800	34,9900
2	34,9200	34,2700	33,8100	33,5600	33,5300	33,7300	34,1300	34,6700
3	34,8700	34,2300	33,8100	33,5800	33,5600	33,7400	34,1800	34,6600
4	35,0800	34,5400	34,2000	34,0600	34,1000	34,3100	34,6300	35,0800
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,8790	34,8970	34,9240	34,8960	34,9260	34,9690	34,9970	34,9910
2	34,8710	34,8800	34,8840	34,8780	34,8980	34,9220	34,9360	34,9080
3	34,9430	34,9440	34,9230	34,9320	34,9640	34,9690	34,9610	34,9020
4	35,0850	35,0990	35,0870	35,0660	35,0980	35,1010	35,0900	35,0510
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,1840	34,6050	34,1820	33,9580	33,9660	34,1330	34,5240	34,9910
2	34,9450	34,2670	33,7990	33,5620	33,5470	33,7580	34,1580	34,6700
3	34,8660	34,2310	33,7970	33,5960	33,5710	33,7940	34,1920	34,6720
4	35,0790	34,5170	34,2080	34,0700	34,1010	34,3080	34,6460	35,0430

Matrizes de medição: Provete 3								
Pré-soldadura: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,1167	35,1900	35,2100	35,1467	35,1267	35,0467	35,0133	34,9933
2	34,9533	35,0667	35,0933	35,0600	35,0400	34,9800	34,9600	34,9833
3	34,9167	35,0000	35,0400	35,0467	35,0267	34,9767	34,9533	34,9700
4	34,9400	35,0600	35,0933	35,1133	35,0933	35,0567	35,0667	35,0733
Pós-soldadura: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,4700	34,9400	34,5150	34,2200	34,1300	34,1900	34,5100	34,9900
2	35,0300	34,4500	34,0100	33,7400	33,6400	33,7700	34,1600	34,7000
3	34,8300	34,3200	33,9200	33,7100	33,6300	33,8000	34,1600	34,7000
4	34,9200	34,5000	34,2400	34,1200	34,1300	34,2500	34,5300	35,0400
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,1260	35,2060	35,2170	35,1750	35,1400	35,0260	35,0220	34,9840
2	34,9630	35,0660	35,0830	35,0720	35,0330	34,9680	34,9480	34,9400
3	34,8910	35,0020	35,0400	35,0490	35,0130	34,9540	34,9300	34,9600
4	34,9230	35,0700	35,0950	35,1060	35,0700	35,0220	35,0310	35,0330
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,5000	34,9580	34,5460	34,2350	34,1530	34,2090	34,5420	34,9930
2	35,0630	34,4570	34,0250	33,7410	33,6650	33,7770	34,1610	34,7530
3	34,8520	34,3100	33,9510	33,7220	33,6620	33,8080	34,1720	34,7470
4	34,9460	34,5300	34,2480	34,1220	34,1370	34,2770	34,5830	35,0290

Matrizes de medição: Provete 4**Pré-soldadura: Relógio comparador**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9500	34,9933	35,0100	35,0333	35,0200	35,0067	35,0100	35,0000
2	34,8833	34,9200	34,9600	34,9867	34,9700	34,9733	34,9667	34,9400
3	34,8900	34,9267	34,9700	35,0000	34,9633	34,9800	34,9700	35,0000
4	35,0067	35,0267	35,0467	35,0400	34,9933	35,0700	35,0500	35,0800

Pós-soldadura: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,2400	34,7050	34,2800	34,0500	33,9800	34,1500	34,5000	35,0000
2	34,9100	34,3000	33,8700	33,6100	33,5900	33,7900	34,1900	34,7500
3	34,8800	34,2900	33,9000	33,6700	33,6500	33,8400	34,2200	34,8000
4	35,1500	34,6700	34,3000	34,1200	34,1000	34,2600	34,5800	35,0400

Pré-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9580	35,0030	35,0230	35,0290	35,0140	35,0140	35,0040	34,9990
2	34,8860	34,9360	34,9750	34,9600	34,9470	34,9530	34,9470	34,9390
3	34,9110	34,9360	34,9840	34,9630	34,9590	34,9650	34,9430	34,9630
4	35,0090	35,0200	35,0420	35,0320	35,0240	35,0490	35,0390	35,0300

Pós-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,2450	34,6910	34,2970	34,0490	33,9940	34,1680	34,5300	35,0250
2	34,9460	34,2780	33,8710	33,6220	33,6000	33,8020	34,2060	34,7570
3	34,8920	34,2840	33,8820	33,6590	33,6420	33,8500	34,2410	34,7980
4	35,1590	34,6370	34,3400	34,1140	34,1210	34,2510	34,5620	35,0350

Matrizes de medição: Provete 5**Pré-soldadura: Relógio comparador**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9533	34,8833	34,8333	34,8167	34,8333	34,8467	34,9233	35,0300
2	34,9200	34,8367	34,7800	34,7600	34,7467	34,7967	34,8433	34,9533
3	34,9200	34,8333	34,7767	34,7567	34,7400	34,7667	34,8333	34,9233
4	34,9800	34,9033	34,8200	34,7933	34,7867	34,8033	34,8633	34,9733

Pós-soldadura: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,1967	34,5400	34,0400	33,8100	33,7700	33,9900	34,4200	35,0700
2	34,9200	34,1700	33,6200	33,3600	33,3500	33,5900	34,0500	34,7900
3	34,8700	34,1600	33,6400	33,3900	33,3800	33,6200	34,0700	34,7300
4	35,0600	34,4600	34,0500	33,8500	33,8500	34,0100	34,3600	34,9800

Pré-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9420	34,8800	34,8300	34,8020	34,8050	34,8460	34,9110	35,0270
2	34,8890	34,8390	34,7750	34,7360	34,7380	34,7800	34,8260	34,9420
3	34,9130	34,8300	34,7640	34,7250	34,7270	34,7590	34,7960	34,9100
4	34,9680	34,8790	34,8060	34,7640	34,7640	34,7840	34,8330	34,9500

Pós-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,2000	34,5410	34,0450	33,7990	33,7900	33,9960	34,4110	35,0760
2	34,9400	34,1700	33,6480	33,3650	33,3750	33,6020	34,0780	34,7950
3	34,8920	34,1610	33,6880	33,4130	33,3900	33,6270	34,0530	34,7350
4	35,0920	34,4710	34,0660	33,8610	33,8420	33,9960	34,3730	34,9820

Matrizes de medição: Provete 6**Pré-soldadura: Relógio comparador**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,0100	34,8700	34,9433	34,9733	35,0333	35,0767	35,0567	35,0600
2	34,9000	34,9100	34,8667	34,8800	34,9300	34,9800	34,9633	34,9367
3	34,8633	34,9700	34,8400	34,8467	34,9067	34,9667	34,9667	34,9267
4	34,9133	34,8900	34,8867	34,9133	34,9600	35,0233	35,0133	35,0133

Pós-soldadura: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,2833	34,5667	34,2200	34,0100	34,0200	34,2100	34,5700	35,0800
2	34,9300	34,2800	33,8200	33,5700	33,5300	33,8100	34,2000	34,7400
3	34,9100	34,3000	33,7800	33,5600	33,5800	33,8300	34,1900	34,7100
4	35,0500	34,5200	34,1700	34,0200	34,0700	34,2300	34,5200	34,9700

Pré-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,0190	34,9950	34,9620	34,9910	35,0280	35,0820	35,0580	35,0600
2	34,9020	34,8970	34,8770	34,8880	34,9280	34,9870	34,9460	34,9420
3	34,8640	34,8600	34,8360	34,8340	34,8870	34,9570	34,9360	34,9110
4	34,8970	34,8720	34,8590	34,9000	34,9570	34,9850	34,9730	34,9880

Pós-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,2830	34,6670	34,2220	34,0290	34,0240	34,2140	34,5810	35,0650
2	34,9220	34,2620	33,7930	33,5660	33,5820	33,8170	34,2170	34,7390
3	34,8860	34,2530	33,7680	33,5530	33,5700	33,8190	34,1920	34,7050
4	35,0610	34,5010	34,1630	34,0080	34,0680	34,2300	34,5180	34,9810

Matrizes de medição: Provete 7**Pré-soldadura: Relógio comparador**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,0700	35,0667	35,0233	34,9900	34,9333	34,9267	34,9633	35,0133
2	34,9667	34,9600	34,9400	34,9000	34,8533	34,8400	34,8633	34,8967
3	34,9500	34,9500	34,9100	34,8600	34,8100	34,7900	34,8133	34,8533
4	35,0300	34,9767	34,9267	34,8967	34,8433	34,8167	34,8367	34,8733

Pós-soldadura: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,3000	34,8400	34,4700	34,2400	34,1800	34,2400	34,5900	35,0900
2	34,9700	34,4600	34,0700	33,8700	33,8100	33,9400	34,3600	34,9000
3	34,9000	34,3600	34,0400	33,8100	33,7700	33,9400	34,3200	34,8900
4	35,0100	34,5200	34,1800	34,0000	33,9500	34,1200	34,5000	34,9200

Pré-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9820	35,0070	35,0010	34,9710	34,9320	34,9460	34,9870	35,0370
2	34,9160	34,9390	34,9390	34,9160	34,8810	34,8650	34,9150	34,9540
3	34,9280	34,9560	34,9440	34,9040	34,8660	34,8500	34,8830	34,9490
4	35,0280	35,0080	34,9830	34,9510	34,9140	34,9010	34,9310	34,9870

Pós-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,2020	34,7790	34,4110	34,1890	34,1200	34,2470	34,5980	35,1040
2	34,9120	34,4310	34,0680	33,8800	33,8110	33,9670	34,3580	34,9000
3	34,8580	34,3580	34,0130	33,8120	33,7600	33,9270	34,3260	34,8840
4	35,0130	34,5340	34,2060	33,9980	33,9500	34,1060	34,4840	35,0040

Matrizes de medição: Provete 8**Pré-soldadura: Relógio comparador**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9267	34,9867	34,9900	35,0400	35,0733	35,0700	35,0500	35,0033
2	34,8833	34,9400	34,9700	35,0100	35,0400	35,0433	34,9933	34,9433
3	34,9300	35,0100	35,0333	35,0667	35,0767	35,0500	35,0367	34,9867
4	35,0300	35,1133	35,1700	35,1800	35,1900	35,1633	35,1533	35,0600

Pós-soldadura: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,2100	34,7300	34,3700	34,2100	34,2300	34,3500	34,6300	35,0200
2	34,9100	34,3900	34,0700	33,9200	33,9600	34,1100	34,4000	34,8400
3	34,8900	34,3900	34,0700	33,9200	33,9500	34,1200	34,4300	34,8600
4	35,0600	34,6400	34,3200	34,1900	34,2000	34,3500	34,6600	35,0600

Pré-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9440	34,9880	34,9920	35,0460	35,0710	35,0620	35,0540	35,0090
2	34,9180	34,9410	34,9820	35,0090	35,0270	35,0350	35,0120	34,9450
3	34,9330	34,9970	35,0280	35,0620	35,0730	35,0780	35,0400	34,9770
4	35,0460	35,1220	35,1560	35,1480	35,1670	35,1600	35,1330	35,0500

Pós-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,2190	34,7440	34,3920	34,2250	34,2320	34,3820	34,6590	35,0110
2	34,9120	34,4110	34,0650	33,9340	33,9580	34,1010	34,4030	34,8460
3	34,8870	34,3880	34,0510	33,9350	33,9640	34,1520	34,4240	34,8600
4	35,0730	34,6220	34,3170	34,1410	34,2000	34,3630	34,6650	35,0270

Matrizes de medição: Provete 9**Pré-soldadura: Relógio comparador**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,2467	35,2400	35,2000	35,1667	35,1033	35,0367	35,0167	35,0467
2	34,9967	35,0100	35,0000	34,9767	34,9267	34,8900	34,8900	34,9433
3	34,8500	34,8700	34,8867	34,9000	34,8500	34,8400	34,8600	34,9500
4	34,8133	34,8367	34,8567	34,8800	34,8400	34,8367	34,8600	34,9867

Pós-soldadura: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,4900	35,0000	34,6100	34,3800	34,3100	34,3600	34,6200	35,0500
2	35,0200	34,4800	34,1700	33,9600	33,9400	33,9900	34,3400	34,8200
3	34,8200	34,3000	34,0000	33,8400	33,8400	33,9700	34,2700	34,8500
4	34,8600	34,3800	34,0700	33,9500	33,9400	34,1000	34,4300	34,9800

Pré-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,2470	35,2500	35,2140	35,1590	35,1000	35,0390	35,0250	35,0610
2	35,0120	35,0270	35,0220	34,9850	34,9330	34,8580	34,8910	34,9380
3	34,8560	34,8770	34,9060	34,8830	34,8560	34,8190	34,8590	34,9090
4	34,7870	34,8300	34,8650	34,8580	34,8270	34,8310	34,8570	34,9520

Pós-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,4980	35,0080	34,6010	34,3820	34,3070	34,3920	34,6620	35,1030
2	35,0470	34,4830	34,1490	33,9670	33,9350	34,0250	34,3350	34,8740
3	34,8180	34,2780	33,9680	33,8440	33,8190	33,9440	34,2730	34,8880
4	34,8300	34,3720	34,0660	33,9330	33,9420	34,1150	34,4520	34,9850

Matrizes de medição: Provete 10								
Pré-soldadura: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9167	34,9167	34,9633	34,9567	34,9833	35,0400	35,0200	35,0033
2	34,8600	34,8733	34,9100	34,9467	34,9667	34,9600	34,9500	34,9333
3	34,9233	34,9100	34,9667	34,9900	34,9900	34,9867	34,9700	34,9433
4	35,0700	35,0400	35,1000	35,1000	35,1000	35,1233	35,0933	35,0467
Pós-soldadura: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,1000	34,5900	34,2800	34,1000	34,0900	34,2600	34,5900	35,0000
2	34,8800	34,3400	34,0500	33,8700	33,8800	34,0000	34,3500	34,8000
3	34,9300	34,3800	34,0600	33,9000	33,8800	34,0200	34,3500	34,8400
4	35,2000	34,7200	34,4000	34,2100	34,1600	34,3200	34,6300	35,0600
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9160	34,9190	34,9560	34,9780	34,9780	35,0310	35,0100	34,9970
2	34,8770	34,8820	34,9110	34,9500	34,9460	34,9480	34,9380	34,9050
3	34,9030	34,9100	34,9670	34,9840	34,9800	34,9660	34,9450	34,9250
4	35,0150	35,0320	35,0630	35,0820	35,0840	35,0930	35,0790	35,0490
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,1060	34,6110	34,2930	34,1160	34,1020	34,3130	34,6000	35,0350
2	34,8860	34,3620	34,0280	33,8860	33,8620	34,0160	34,3410	34,8060
3	34,9200	34,3800	34,0580	33,8980	33,8770	34,0270	34,3460	34,8290
4	35,1900	34,6930	34,3580	34,2140	34,1590	34,3250	34,6210	35,0370

Matrizes de medição: Provete 11								
Pré-soldadura: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9633	35,0233	35,1000	35,1467	35,2033	35,1667	35,1300	35,0733
2	34,9067	34,9667	35,0200	35,0467	35,0767	35,0933	35,0300	34,9567
3	34,9367	34,9767	35,0067	35,0667	35,0533	35,0367	35,0167	34,9133
4	35,0167	35,0400	35,0867	35,0933	35,1233	35,0967	35,0300	34,9533
Pós-soldadura: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,0700	34,6300	34,3800	34,2600	34,2800	34,3900	34,6900	35,0900
2	34,8700	34,3600	34,0700	33,9700	33,9900	34,1400	34,4500	34,8400
3	34,8700	34,3700	34,0800	33,9500	33,9600	34,1000	34,4000	34,8500
4	35,1200	34,6700	34,3600	34,2000	34,2000	34,3200	34,5900	34,9600
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9830	35,0080	35,1000	35,1420	35,1760	35,1480	35,1240	35,0610
2	34,9150	34,9450	34,9970	35,0410	35,0680	35,0740	35,0210	34,9360
3	34,9300	34,9470	34,9850	35,0180	35,0440	35,0160	34,9810	34,9030
4	35,0040	35,0330	35,0660	35,0760	35,0930	35,0520	35,0200	34,9320
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,0950	34,6640	34,3890	34,2680	34,2820	34,4150	34,7080	35,0710
2	34,8710	34,3800	34,0680	33,9880	33,9980	34,1360	34,4510	34,8560
3	34,8880	34,3900	34,0680	33,9590	33,9920	34,0960	34,4010	34,8410
4	35,1250	34,6630	34,3640	34,1920	34,1970	34,3150	34,5810	34,9520

Matrizes de medição: Provete 12**Pré-soldadura: Relógio comparador**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9567	34,9467	34,9267	34,9433	35,0067	35,0400	35,0733	35,0767
2	34,9333	34,8833	34,8467	34,8633	34,9033	34,9333	34,9700	34,9800
3	34,9400	34,9167	34,8700	34,8733	34,9100	34,9300	34,9567	34,9467
4	35,0133	34,9967	34,9467	34,9500	34,9667	34,9900	34,9967	35,0000

Pós-soldadura: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,0700	34,5900	34,2200	34,0600	34,1000	34,2900	34,6800	35,0700
2	34,8600	34,3200	33,9300	33,7700	33,8200	34,0400	34,3800	34,8600
3	34,9100	34,3300	33,9500	33,7900	33,8100	34,0200	34,3700	34,8500
4	35,1500	34,6300	34,2300	34,0700	34,0700	34,2400	34,5700	34,9900

Pré-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9780	34,9670	34,9220	34,9510	34,9830	35,0320	35,0520	35,0760
2	34,9070	34,8920	34,8570	34,8660	34,9010	34,9290	34,9590	34,9720
3	34,9260	34,9070	34,8550	34,8640	34,8930	34,9180	34,9480	34,9330
4	35,0130	34,9920	34,9410	34,9390	34,9550	34,9740	34,9880	34,9840

Pós-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,1000	34,5980	34,2310	34,0670	34,0970	34,3070	34,6360	35,0880
2	34,8670	34,3030	33,9290	33,7790	33,8360	34,0260	34,3640	34,8540
3	34,9170	34,3270	33,9410	33,7840	33,8130	34,0210	34,3680	34,8410
4	35,1480	34,6240	34,2510	34,0590	34,0520	34,2240	34,5560	34,9760

Matrizes dos deslocamentos normalizadas

Matrizes de deslocamento real: Provete 1								
Distorções: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,2933	0,7833	0,4267	0,2533	0,2167	0,3300	0,6800	1,1067
2	1,1300	0,5767	0,2500	0,0333	0,0233	0,1500	0,5100	0,9767
3	1,1167	0,5800	0,2033	0,0200	0,0000	0,1433	0,4900	1,0067
4	1,2400	0,7900	0,4100	0,2200	0,1700	0,3067	0,6467	1,1233

Distorções: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,2930	0,7950	0,4400	0,2410	0,2270	0,3850	0,6930	1,1410
2	1,1120	0,5830	0,2200	0,0390	0,0190	0,1710	0,5060	1,0040
3	1,1200	0,5730	0,1940	0,0170	0,0000	0,1640	0,5040	1,0070
4	1,2780	0,7640	0,3980	0,2350	0,1780	0,3350	0,6450	1,0910

Matrizes de deslocamento real: Provete 2								
Distorções: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,7267	1,1300	0,6767	0,4500	0,3933	0,5433	0,8833	1,3600
2	1,4767	0,8133	0,3400	0,0700	0,0200	0,1833	0,5833	1,1500
3	1,3633	0,7033	0,2633	0,0333	0,0000	0,2067	0,6233	1,1200
4	1,4000	0,8433	0,4867	0,3500	0,3933	0,5800	0,9133	1,4067

Distorções: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,6980	1,1010	0,6510	0,4550	0,4330	0,5570	0,9200	1,3930
2	1,4670	0,7800	0,3080	0,0770	0,0420	0,2290	0,6150	1,1550
3	1,3160	0,6800	0,2670	0,0570	0,0000	0,2180	0,6240	1,1630
4	1,3870	0,8110	0,5140	0,3970	0,3960	0,6000	0,9490	1,3850

Matrizes de deslocamento real: Provete 3								
Distorções: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,7533	1,1500	0,7050	0,4733	0,4033	0,5433	0,8967	1,3967
2	1,4767	0,7833	0,3167	0,0800	0,0000	0,1900	0,6000	1,1167
3	1,3133	0,7200	0,2800	0,0633	0,0033	0,2233	0,6067	1,1300
4	1,3800	0,8400	0,5467	0,4067	0,4367	0,5933	0,8633	1,3667

Distorções: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,7420	1,1200	0,6970	0,4280	0,3810	0,5510	0,8880	1,3770
2	1,4680	0,7590	0,3100	0,0370	0,0000	0,1770	0,5810	1,1810
3	1,3290	0,6760	0,2790	0,0410	0,0170	0,2220	0,6100	1,1550
4	1,3910	0,8280	0,5210	0,3840	0,4350	0,6230	0,9200	1,3640

Matrizes de deslocamento real: Provete 4								
Distorções: Relógio comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,6700	1,0917	0,6500	0,3967	0,3400	0,5233	0,8700	1,3800
2	1,4067	0,7600	0,2900	0,0033	0,0000	0,1967	0,6033	1,1900
3	1,3700	0,7433	0,3100	0,0500	0,0667	0,2400	0,6300	1,1800
4	1,5233	1,0233	0,6333	0,4600	0,4867	0,5700	0,9100	1,3400

Distorções: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,6340	1,0350	0,6210	0,3670	0,3270	0,5010	0,8730	1,3730
2	1,4070	0,6890	0,2430	0,0090	0,0000	0,1960	0,6060	1,1650
3	1,3280	0,6950	0,2450	0,0430	0,0300	0,2320	0,6450	1,1820
4	1,4970	0,9640	0,6450	0,4290	0,4440	0,5490	0,8700	1,3520

Matrizes de deslocamento real: Provet 5

Distorções: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,6433	1,0567	0,6067	0,3933	0,3367	0,5433	0,8967	1,4400
2	1,4000	0,7333	0,2400	0,0000	0,0033	0,1933	0,6067	1,2367
3	1,3500	0,7267	0,2633	0,0333	0,0400	0,2533	0,6367	1,2067
4	1,4800	0,9567	0,6300	0,4567	0,4633	0,6067	0,8967	1,4067

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,6290	1,0320	0,5860	0,3680	0,3560	0,5210	0,8710	1,4200
2	1,4220	0,7020	0,2440	0,0000	0,0080	0,1930	0,6230	1,2240
3	1,3500	0,7020	0,2950	0,0590	0,0340	0,2390	0,6280	1,1960
4	1,4950	0,9630	0,6310	0,4680	0,4490	0,5830	0,9110	1,4030

Matrizes de deslocamento real: Provet 6

Distorções: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,6733	1,0967	0,6767	0,4367	0,3867	0,5333	0,9133	1,4200
2	1,4300	0,7700	0,3533	0,0900	0,0000	0,2300	0,6367	1,2033
3	1,4467	0,7300	0,3400	0,1133	0,0733	0,2633	0,6233	1,1833
4	1,5367	1,0300	0,6833	0,5067	0,5100	0,6067	0,9067	1,3567

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,6100	1,0180	0,6060	0,3840	0,3420	0,4780	0,8690	1,3510
2	1,3660	0,7110	0,2620	0,0240	0,0000	0,1760	0,6170	1,1430
3	1,3680	0,7390	0,2780	0,0650	0,0290	0,2080	0,6020	1,1400
4	1,5100	0,9750	0,6500	0,4540	0,4570	0,5910	0,8910	1,3390

Matrizes de deslocamento real: Provet 7

Distorções: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,2800	0,8233	0,4967	0,3000	0,2967	0,3633	0,6767	1,1267
2	1,0533	0,5500	0,1800	0,0200	0,0067	0,1500	0,5467	1,0533
3	1,0000	0,4600	0,1800	0,0000	0,0100	0,2000	0,5567	1,0867
4	1,0300	0,5933	0,3033	0,1533	0,1567	0,3533	0,7133	1,0967

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,3260	0,8780	0,5160	0,3240	0,2940	0,4070	0,7170	1,1730
2	1,1020	0,5980	0,2350	0,0700	0,0360	0,2080	0,5490	1,0520
3	1,0360	0,5080	0,1750	0,0140	0,0000	0,1830	0,5490	1,0410
4	1,0910	0,6320	0,3290	0,1530	0,1420	0,3110	0,6590	1,1230

Matrizes de deslocamento real: Provet 8

Distorções: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,4300	0,8900	0,5267	0,3167	0,3033	0,4267	0,7267	1,1633
2	1,1733	0,5967	0,2467	0,0567	0,0667	0,2133	0,5533	1,0433
3	1,1067	0,5267	0,1833	0,0000	0,0200	0,2167	0,5400	1,0200
4	1,1767	0,6733	0,2967	0,1567	0,1567	0,3333	0,6533	1,1467

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,4020	0,8830	0,5270	0,3060	0,2880	0,4470	0,7320	1,1290
2	1,1210	0,5970	0,2100	0,0520	0,0580	0,1930	0,5180	1,0280
3	1,0810	0,5180	0,1500	0,0000	0,0180	0,2010	0,5110	1,0100
4	1,1540	0,6270	0,2880	0,1200	0,1600	0,3300	0,6590	1,1040

Matrizes de deslocamento real: Provete 9

Distorções: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,3033	0,8200	0,4700	0,2733	0,2667	0,3833	0,6633	1,0633
2	1,0833	0,5300	0,2300	0,0433	0,0733	0,1600	0,5100	0,9367
3	1,0300	0,4900	0,1733	0,0000	0,0500	0,1900	0,4700	0,9600
4	1,1067	0,6033	0,2733	0,1300	0,1600	0,3233	0,6300	1,0533

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,2900	0,7970	0,4260	0,2620	0,2460	0,3920	0,6760	1,0810
2	1,0740	0,4950	0,1660	0,0210	0,0410	0,2060	0,4830	0,9750
3	1,0010	0,4400	0,1010	0,0000	0,0020	0,1640	0,4530	1,0180
4	1,0820	0,5810	0,2400	0,1140	0,1540	0,3230	0,6340	1,0720

Matrizes de deslocamento real: Provete 10

Distorções: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,2933	0,7833	0,4267	0,2533	0,2167	0,3300	0,6800	1,1067
2	1,1300	0,5767	0,2500	0,0333	0,0233	0,1500	0,5100	0,9767
3	1,1167	0,5800	0,2033	0,0200	0,0000	0,1433	0,4900	1,0067
4	1,2400	0,7900	0,4100	0,2200	0,1700	0,3067	0,6467	1,1233

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,2930	0,7950	0,4400	0,2410	0,2270	0,3850	0,6930	1,1410
2	1,1120	0,5830	0,2200	0,0390	0,0190	0,1710	0,5060	1,0040
3	1,1200	0,5730	0,1940	0,0170	0,0000	0,1640	0,5040	1,0070
4	1,2780	0,7640	0,3980	0,2350	0,1780	0,3350	0,6450	1,0910

Matrizes de deslocamento real: Provete 11

Distorções: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,2233	0,7233	0,3967	0,2300	0,1933	0,3400	0,6767	1,1333
2	1,0800	0,5100	0,1667	0,0400	0,0300	0,1633	0,5367	1,0000
3	1,0500	0,5100	0,1900	0,0000	0,0233	0,1800	0,5000	1,0533
4	1,2200	0,7467	0,3900	0,2233	0,1933	0,3400	0,6767	1,1233

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,1820	0,7260	0,3590	0,1960	0,1760	0,3370	0,6540	1,0800
2	1,0260	0,5050	0,1410	0,0170	0,0000	0,1320	0,5000	0,9900
3	1,0280	0,5130	0,1530	0,0110	0,0180	0,1500	0,4900	1,0080
4	1,1910	0,7000	0,3680	0,1860	0,1740	0,3330	0,6310	1,0900

Matrizes de deslocamento real: Provete 12

Distorções: Relógio comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,2133	0,7433	0,3933	0,2167	0,1933	0,3500	0,7067	1,0933
2	1,0267	0,5367	0,1833	0,0067	0,0167	0,2067	0,5100	0,9800
3	1,0700	0,5133	0,1800	0,0167	0,0000	0,1900	0,5133	1,0033
4	1,2367	0,7333	0,3833	0,2200	0,2033	0,3500	0,6733	1,0900

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1,2090	0,7180	0,3960	0,2030	0,2010	0,3620	0,6710	1,0990
2	1,0470	0,4980	0,1590	0,0000	0,0220	0,1840	0,4920	0,9690
3	1,0780	0,5070	0,1730	0,0070	0,0070	0,1900	0,5070	0,9950
4	1,2220	0,7190	0,3970	0,2070	0,1840	0,3370	0,6550	1,0790

Matrizes de comparação entre metodologias

Comparação entre as metodologias: Provete 1								
Diferença: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-0,0185	-0,0297	-0,0170	-0,0203	0,0018	0,0038	0,0072	-0,0002
2	-0,0160	-0,0357	-0,0328	-0,0248	0,0042	0,0028	-0,0005	0,0212
3	-0,0227	-0,0405	-0,0055	-0,0062	0,0000	-0,0018	-0,0048	0,0272
4	-0,0078	-0,0223	-0,0060	0,0053	0,0003	0,0180	0,0393	-0,0123

Erro absoluto: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,0185	0,0297	0,0170	0,0203	0,0018	0,0038	0,0072	0,0002
2	0,0160	0,0357	0,0328	0,0248	0,0042	0,0028	0,0005	0,0212
3	0,0227	0,0405	0,0055	0,0062	0,0000	0,0018	0,0048	0,0272
4	0,0078	0,0223	0,0060	0,0053	0,0003	0,0180	0,0393	0,0123

Comparação entre as metodologias: Provete 2								
Diferença: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-0,0287	-0,0290	-0,0257	0,0050	0,0397	0,0137	0,0367	0,0330
2	-0,0097	-0,0333	-0,0320	0,0070	0,0220	0,0457	0,0317	0,0050
3	-0,0473	-0,0233	0,0037	0,0237	0,0000	0,0113	0,0007	0,0430
4	-0,0130	-0,0323	0,0273	0,0470	0,0027	0,0200	0,0357	-0,0217

Erro absoluto: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,0287	0,0290	0,0257	0,0050	0,0397	0,0137	0,0367	0,0330
2	0,0097	0,0333	0,0320	0,0070	0,0220	0,0457	0,0317	0,0050
3	0,0473	0,0233	0,0037	0,0237	0,0000	0,0113	0,0007	0,0430
4	0,0130	0,0323	0,0273	0,0470	0,0027	0,0200	0,0357	0,0217

Comparação entre as metodologias: Provete 3								
Diferença: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-0,0113	-0,0300	-0,0080	-0,0453	-0,0223	0,0077	-0,0087	-0,0197
2	-0,0087	-0,0243	-0,0067	-0,0430	0,0000	-0,0130	-0,0190	0,0643
3	0,0157	-0,0440	-0,0010	-0,0223	0,0137	-0,0013	0,0033	0,0250
4	0,0110	-0,0120	-0,0257	-0,0227	-0,0017	0,0297	0,0567	-0,0027

Erro absoluto: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,0113	0,0300	0,0080	0,0453	0,0223	0,0077	0,0087	0,0197
2	0,0087	0,0243	0,0067	0,0430	0,0000	0,0130	0,0190	0,0643
3	0,0157	0,0440	0,0010	0,0223	0,0137	0,0013	0,0033	0,0250
4	0,0110	0,0120	0,0257	0,0227	0,0017	0,0297	0,0567	0,0027

Comparação entre as metodologias: Provete 4								
Diferença: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-0,0360	-0,0567	-0,0290	-0,0297	-0,0130	-0,0223	0,0030	-0,0070
2	0,0003	-0,0710	-0,0470	0,0057	0,0000	-0,0007	0,0027	-0,0250
3	-0,0420	-0,0483	-0,0650	-0,0070	-0,0367	-0,0080	0,0150	0,0020
4	-0,0263	-0,0593	0,0117	-0,0310	-0,0427	-0,0210	-0,0400	0,0120

Erro absoluto: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,0360	0,0567	0,0290	0,0297	0,0130	0,0223	0,0030	0,0070
2	0,0003	0,0710	0,0470	0,0057	0,0000	0,0007	0,0027	0,0250
3	0,0420	0,0483	0,0650	0,0070	0,0367	0,0080	0,0150	0,0020
4	0,0263	0,0593	0,0117	0,0310	0,0427	0,0210	0,0400	0,0120

Comparação entre as metodologias: Provete 5

Diferença: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-0,0143	-0,0247	-0,0207	-0,0253	0,0193	-0,0223	-0,0257	-0,0200
2	0,0220	-0,0313	0,0040	0,0000	0,0047	-0,0003	0,0163	-0,0127
3	0,0000	-0,0247	0,0317	0,0257	-0,0060	-0,0143	-0,0087	-0,0107
4	0,0150	0,0063	0,0010	0,0113	-0,0143	-0,0237	0,0143	-0,0037

Erro absoluto: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,0143	0,0247	0,0207	0,0253	0,0193	0,0223	0,0257	0,0200
2	0,0220	0,0313	0,0040	0,0000	0,0047	0,0003	0,0163	0,0127
3	0,0000	0,0247	0,0317	0,0257	0,0060	0,0143	0,0087	0,0107
4	0,0150	0,0063	0,0010	0,0113	0,0143	0,0237	0,0143	0,0037

Comparação entre as metodologias: Provete 6

Diferença: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-0,0633	-0,0787	-0,0707	-0,0527	-0,0447	-0,0553	-0,0443	-0,0690
2	-0,0640	-0,0590	-0,0913	-0,0660	0,0000	-0,0540	-0,0197	-0,0603
3	-0,0787	0,0090	-0,0620	-0,0483	-0,0443	-0,0553	-0,0213	-0,0433
4	-0,0267	-0,0550	-0,0333	-0,0527	-0,0530	-0,0157	-0,0157	-0,0177

Erro absoluto: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,0633	0,0787	0,0707	0,0527	0,0447	0,0553	0,0443	0,0690
2	0,0640	0,0590	0,0913	0,0660	0,0000	0,0540	0,0197	0,0603
3	0,0787	0,0090	0,0620	0,0483	0,0443	0,0553	0,0213	0,0433
4	0,0267	0,0550	0,0333	0,0527	0,0530	0,0157	0,0157	0,0177

Comparação entre as metodologias: Provete 7

Diferença: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,0460	0,0547	0,0193	0,0240	-0,0027	0,0437	0,0403	0,0463
2	0,0487	0,0480	0,0550	0,0500	0,0293	0,0580	0,0023	-0,0013
3	0,0360	0,0480	-0,0050	0,0140	-0,0100	-0,0170	-0,0077	-0,0457
4	0,0610	0,0387	0,0257	-0,0003	-0,0147	-0,0423	-0,0543	0,0263

Erro absoluto: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,0460	0,0547	0,0193	0,0240	0,0027	0,0437	0,0403	0,0463
2	0,0487	0,0480	0,0550	0,0500	0,0293	0,0580	0,0023	0,0013
3	0,0360	0,0480	0,0050	0,0140	0,0100	0,0170	0,0077	0,0457
4	0,0610	0,0387	0,0257	0,0003	0,0147	0,0423	0,0543	0,0263

Comparação entre as metodologias: Provete 8

Diferença: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-0,0280	-0,0070	0,0003	-0,0107	-0,0153	0,0203	0,0053	-0,0343
2	-0,0523	0,0003	-0,0367	-0,0047	-0,0087	-0,0203	-0,0353	-0,0153
3	-0,0257	-0,0087	-0,0333	0,0000	-0,0020	-0,0157	-0,0290	-0,0100
4	-0,0227	-0,0463	-0,0087	-0,0367	0,0033	-0,0033	0,0057	-0,0427

Erro absoluto: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,0280	0,0070	0,0003	0,0107	0,0153	0,0203	0,0053	0,0343
2	0,0523	0,0003	0,0367	0,0047	0,0087	0,0203	0,0353	0,0153
3	0,0257	0,0087	0,0333	0,0000	0,0020	0,0157	0,0290	0,0100
4	0,0227	0,0463	0,0087	0,0367	0,0033	0,0033	0,0057	0,0427

Comparação entre as metodologias: Provete 9

Diferença: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-0,0133	-0,0230	-0,0440	-0,0113	-0,0207	0,0087	0,0127	0,0177
2	-0,0093	-0,0350	-0,0640	-0,0223	-0,0323	0,0460	-0,0270	0,0383
3	-0,0290	-0,0500	-0,0723	0,0000	-0,0480	-0,0260	-0,0170	0,0580
4	-0,0247	-0,0223	-0,0333	-0,0160	-0,0060	-0,0003	0,0040	0,0187

Erro absoluto: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,0133	0,0230	0,0440	0,0113	0,0207	0,0087	0,0127	0,0177
2	0,0093	0,0350	0,0640	0,0223	0,0323	0,0460	0,0270	0,0383
3	0,0290	0,0500	0,0723	0,0000	0,0480	0,0260	0,0170	0,0580
4	0,0247	0,0223	0,0333	0,0160	0,0060	0,0003	0,0040	0,0187

Comparação entre as metodologias: Provete 10

Diferença: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-0,0003	0,0117	0,0133	-0,0123	0,0103	0,0550	0,0130	0,0343
2	-0,0180	0,0063	-0,0300	0,0057	-0,0043	0,0210	-0,0040	0,0273
3	0,0033	-0,0070	-0,0093	-0,0030	0,0000	0,0207	0,0140	0,0003
4	0,0380	-0,0260	-0,0120	0,0150	0,0080	0,0283	-0,0017	-0,0323

Erro absoluto: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,0003	0,0117	0,0133	0,0123	0,0103	0,0550	0,0130	0,0343
2	0,0180	0,0063	0,0300	0,0057	0,0043	0,0210	0,0040	0,0273
3	0,0033	0,0070	0,0093	0,0030	0,0000	0,0207	0,0140	0,0003
4	0,0380	0,0260	0,0120	0,0150	0,0080	0,0283	0,0017	0,0323

Comparação entre as metodologias: Provete 11

Diferença: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-0,0413	0,0027	-0,0377	-0,0340	-0,0173	-0,0030	-0,0227	-0,0533
2	-0,0540	-0,0050	-0,0257	-0,0230	-0,0300	-0,0313	-0,0367	-0,0100
3	-0,0220	0,0030	-0,0370	0,0110	-0,0053	-0,0300	-0,0100	-0,0453
4	-0,0290	-0,0467	-0,0220	-0,0373	-0,0193	-0,0070	-0,0457	-0,0333

Erro absoluto: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,0413	0,0027	0,0377	0,0340	0,0173	0,0030	0,0227	0,0533
2	0,0540	0,0050	0,0257	0,0230	0,0300	0,0313	0,0367	0,0100
3	0,0220	0,0030	0,0370	0,0110	0,0053	0,0300	0,0100	0,0453
4	0,0290	0,0467	0,0220	0,0373	0,0193	0,0070	0,0457	0,0333

Comparação entre as metodologias: Provete 12

Diferença: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-0,0043	-0,0253	0,0027	-0,0137	0,0077	0,0120	-0,0357	0,0057
2	0,0203	-0,0387	-0,0243	-0,0067	0,0053	-0,0227	-0,0180	-0,0110
3	0,0080	-0,0063	-0,0070	-0,0097	0,0070	0,0000	-0,0063	-0,0083
4	-0,0147	-0,0143	0,0137	-0,0130	-0,0193	-0,0130	-0,0183	-0,0110

Erro absoluto: Equipamento computadorizado - Relógio Comparador								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,0043	0,0253	0,0027	0,0137	0,0077	0,0120	0,0357	0,0057
2	0,0203	0,0387	0,0243	0,0067	0,0053	0,0227	0,0180	0,0110
3	0,0080	0,0063	0,0070	0,0097	0,0070	0,0000	0,0063	0,0083
4	0,0147	0,0143	0,0137	0,0130	0,0193	0,0130	0,0183	0,0110

Malha do provete L[u]_1 adquirida pelo MetraSCAN 3D



Malha do provete L[u]_2 adquirida pelo MetraSCAN 3D



Malha do provete L[u]_3 adquirida pelo MetraSCAN 3D



Malha do provete L[a]_1 adquirida pelo MetraSCAN 3D



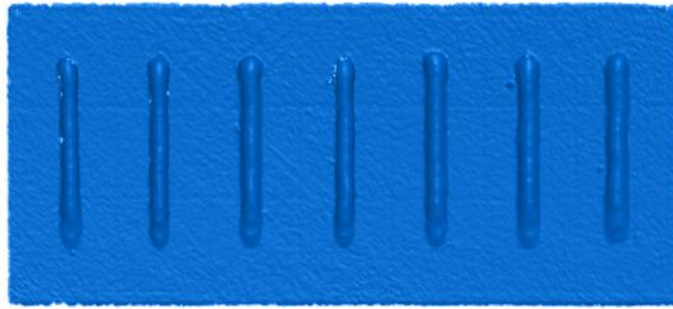
Malha do provete L[a]_2 adquirida pelo MetraSCAN 3D



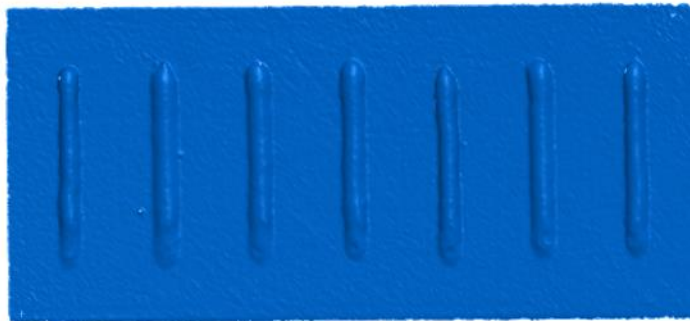
Malha do provete L[a]_3 adquirida pelo MetraSCAN 3D



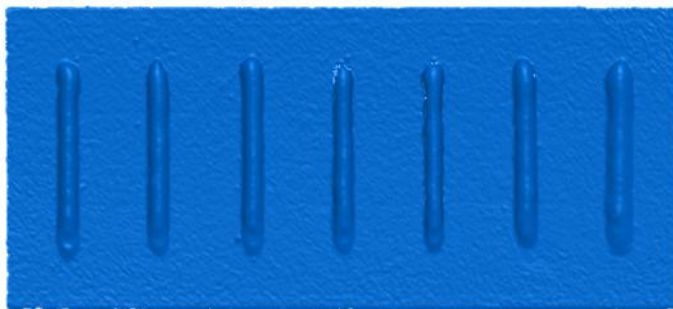
Malha do provete T[u]_1 adquirida pelo MetraSCAN 3D



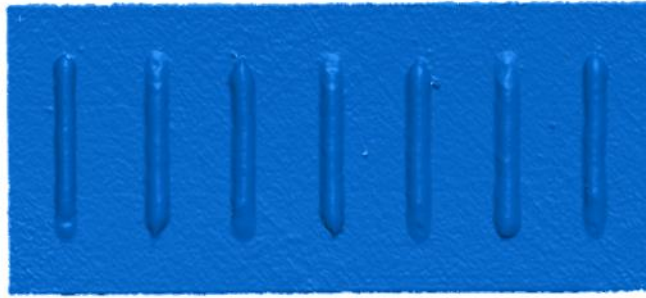
Malha do provete T[u]_2 adquirida pelo MetraSCAN 3D



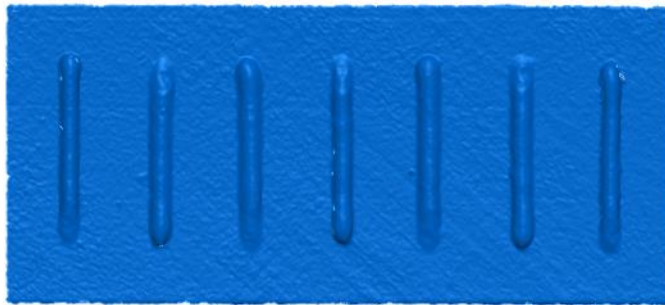
Malha do provete T[u]_3 adquirida pelo MetraSCAN 3D



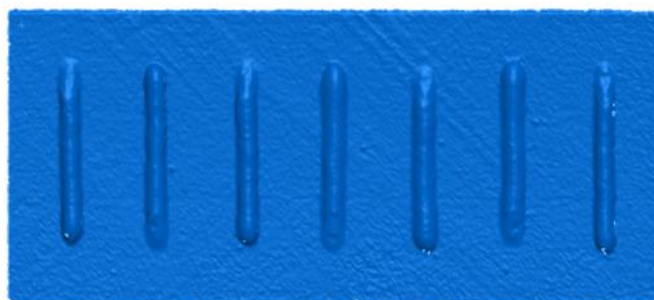
Malha do provete T[a]_1 adquirida pelo MetraSCAN 3D



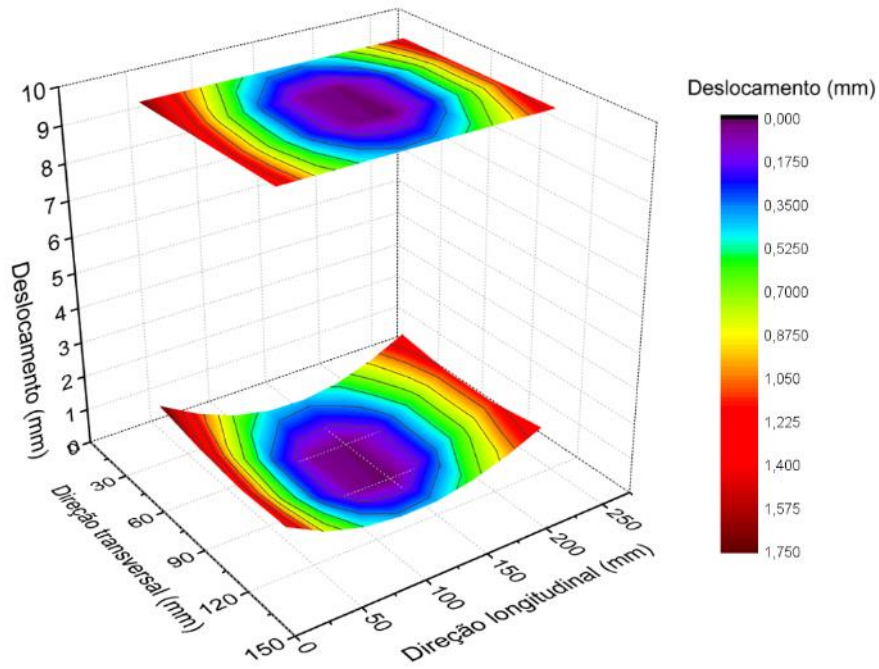
Malha do provete T[a]_2 adquirida pelo MetraSCAN 3D



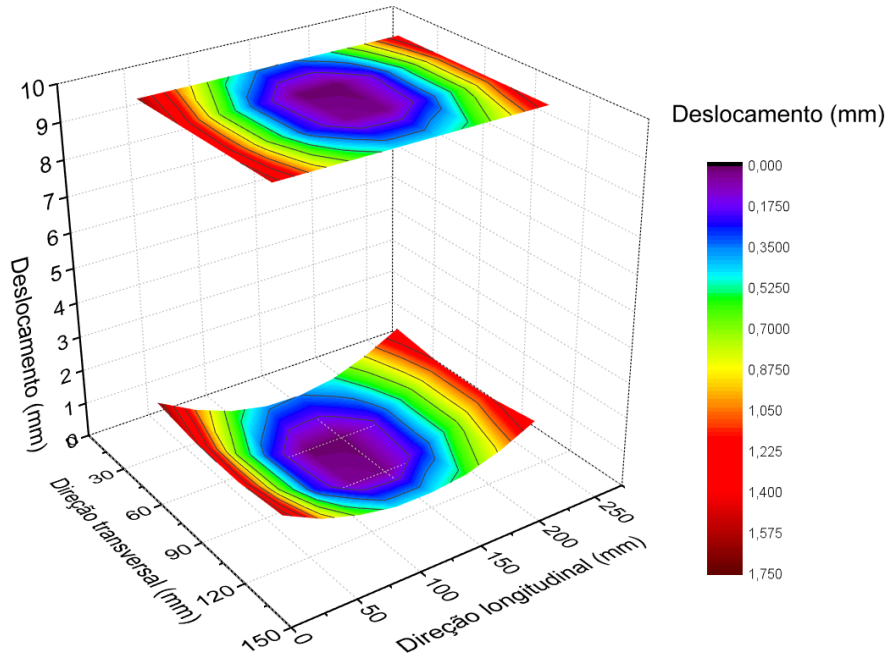
Malha do provete T[a]_3 adquirida pelo MetraSCAN 3D



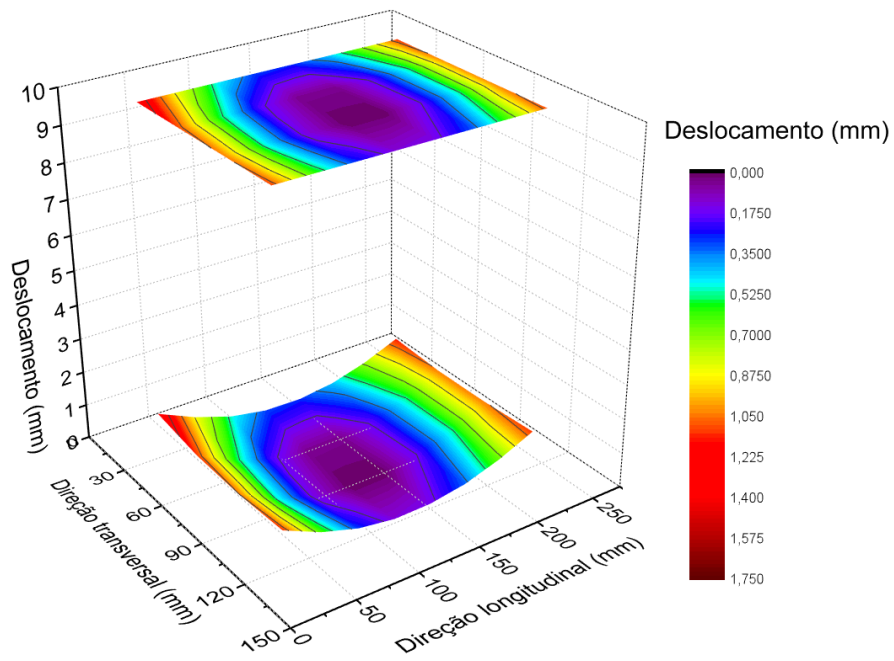
Gráficos de superfície com projeção das médias de L[u]



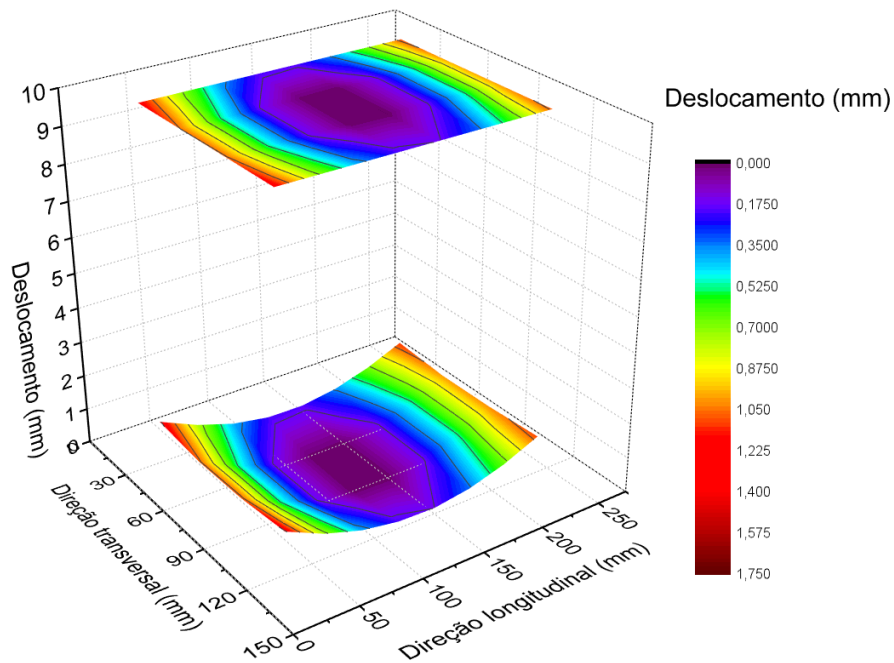
Gráficos de superfície com projeção das médias de L[a]



Gráficos de superfície com projeção das médias de T[u]



Gráficos de superfície com projeção das médias de T[a]



(II) Soldadura multipasses

Provetes	Sequência de soldadura
01, 02, 03	M[u]: Multipasses sentido único
04, 05, 06	M[a]: Multipasses sentido alternado

Matrizes dos deslocamentos

Matrizes de medição: Provetes 1								
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9640	34,9980	35,0370	35,0800	35,1300	35,1040	35,0830	35,0790
2	34,9390	34,9770	35,0240	35,0790	35,0960	35,0460	35,0200	35,0220
3	34,9440	34,9890	35,0370	35,0900	35,0950	35,0420	35,0010	34,9950
4	34,9890	35,0420	35,0790	35,1310	35,1090	35,0640	35,0100	35,0100
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,8900	33,6190	32,3470	31,0810	31,3540	32,6490	33,9570	35,2290
2	34,8420	33,5770	32,3070	30,9770	31,2550	32,5440	33,8740	35,1480
3	34,8240	33,5600	32,3370	30,9700	31,2330	32,4890	33,8100	35,1210
4	34,8900	33,6010	32,3460	30,9830	31,2340	32,5000	33,7880	35,0770

Matrizes de medição: Provetes 2								
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9960	35,0900	35,1610	35,1910	35,2900	35,1960	35,1560	35,1230
2	34,9290	35,0230	35,1060	35,1350	35,2060	35,1260	35,0850	35,0490
3	34,9280	35,0180	35,0950	35,1250	35,1620	35,0780	35,0480	35,0230
4	34,9900	35,0770	35,1620	35,1570	35,1340	35,0660	35,0340	35,0150
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9230	33,6610	32,4310	31,1670	31,3600	32,6520	33,9490	35,2470
2	34,8890	33,6300	32,3710	31,0740	31,2310	32,5550	33,8450	35,1850
3	34,8800	33,6150	32,3650	31,0550	31,2010	32,4910	33,7900	35,1200
4	34,9280	33,6760	32,4110	31,1200	31,2000	32,4670	33,7420	35,1170

Matrizes de medição: Provete 3								
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9960	35,0900	35,1610	35,1910	35,2900	35,1960	35,1560	35,1230
2	34,9290	35,0230	35,1060	35,1350	35,2060	35,1260	35,0850	35,0490
3	34,9280	35,0180	35,0950	35,1250	35,1620	35,0780	35,0480	35,0230
4	34,9900	35,0770	35,1620	35,1570	35,1340	35,0660	35,0340	35,0150
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9065	33,6400	32,3890	31,1240	31,3570	32,6505	33,9530	35,2380
2	34,8655	33,6035	32,3390	31,0255	31,2430	32,5495	33,8595	35,1665
3	34,8520	33,5875	32,3510	31,0125	31,2170	32,4900	33,8000	35,1205
4	34,9090	33,6385	32,3785	31,0515	31,2170	32,4835	33,7650	35,0970

Matrizes de medição: Provete 4								
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9540	34,8250	34,7660	34,7340	34,7000	34,7990	34,9180	35,0230
2	34,8990	34,7680	34,7050	34,6660	34,6860	34,7750	34,8820	34,9860
3	34,8830	34,7530	34,6860	34,6460	34,7160	34,7950	34,8990	35,0120
4	34,8990	34,7960	34,7070	34,6710	34,7790	34,8660	34,9650	35,0640
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,0920	33,7900	32,6040	31,5160	31,6050	32,7950	34,0380	35,2670
2	35,0690	33,7620	32,5400	31,4390	31,5600	32,7490	34,0070	35,2520
3	35,0470	33,7480	32,5290	31,3940	31,5890	32,7790	34,0390	35,2750
4	35,0620	33,7690	32,5490	31,4620	31,7220	32,8660	34,1240	35,3640

Matrizes de medição: Provete 5								
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,0200	34,9930	34,9420	34,8900	34,9070	34,9460	35,0210	35,0960
2	34,9270	34,9170	34,8590	34,8040	34,8440	34,8870	34,9420	35,0050
3	34,9430	34,9200	34,8700	34,8070	34,8310	34,8670	34,9080	34,9770
4	34,9740	34,9690	34,9470	34,8550	34,8530	34,8690	34,9040	34,9710
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,0290	33,9370	32,8690	31,7770	31,8440	32,9770	34,1100	35,2530
2	34,9520	33,8790	32,7980	31,6750	31,7770	32,9080	34,0180	35,1540
3	34,9440	33,8860	32,7850	31,6870	31,7470	32,8540	34,0010	35,0940
4	34,9530	33,9170	32,8410	31,7310	31,7570	32,9060	33,9900	35,1050

Matrizes de medição: Provete 6								
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	35,0250	35,0830	35,1820	35,2430	35,1760	35,1380	35,0850	35,0280
2	34,9520	35,0070	35,0950	35,1680	35,1400	35,1120	35,0590	34,9840
3	34,9770	35,0260	35,1060	35,1820	35,1550	35,1170	35,0700	35,0130
4	35,0750	35,1180	35,1870	35,2450	35,2100	35,1830	35,1340	35,0750
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	34,9340	33,8430	32,7700	31,6510	31,6860	32,8620	33,9810	35,1210
2	34,8500	33,7450	32,6680	31,5440	31,6250	32,8250	33,9420	35,0860
3	34,8920	33,7830	32,6640	31,5590	31,6510	32,8400	33,9500	35,0950
4	34,9500	33,8620	32,7280	31,6080	31,7020	32,9300	34,0330	35,1890

Matrizes dos deslocamentos normalizadas

Matrizes de deslocamento real: Provet 1

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	4,0740	2,7690	1,4580	0,1490	0,3720	1,6930	3,0220	4,2980
2	4,0510	2,7480	1,4310	0,0460	0,3070	1,6460	3,0020	4,2740
3	4,0280	2,7190	1,4480	0,0280	0,2860	1,5950	2,9570	4,2740
4	4,0490	2,7070	1,4150	0,0000	0,2730	1,5840	2,9260	4,2150

Matrizes de deslocamento real: Provet 2

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	3,9970	2,6410	1,3400	0,0460	0,1400	1,5260	2,8630	4,1940
2	4,0300	2,6770	1,3350	0,0090	0,0950	1,4990	2,8300	4,2060
3	4,0220	2,6670	1,3400	0,0000	0,1090	1,4830	2,8120	4,1670
4	4,0080	2,6690	1,3190	0,0330	0,1360	1,4710	2,7780	4,1720

Matrizes de deslocamento real: Provet 3

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	4,0230	2,6625	1,3405	0,0455	0,1795	1,5670	2,9095	4,2275
2	4,0490	2,6930	1,3455	0,0030	0,1495	1,5360	2,8870	4,2300
3	4,0365	2,6820	1,3685	0,0000	0,1675	1,5245	2,8645	4,2100
4	4,0315	2,6740	1,3290	0,0070	0,1955	1,5300	2,8435	4,1945

Matrizes de deslocamento real: Provet 4

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	3,3900	2,2170	1,0900	0,0340	0,1570	1,2480	2,3720	3,4960
2	3,4220	2,2460	1,0870	0,0250	0,1260	1,2260	2,3770	3,5180
3	3,4160	2,2470	1,0950	0,0000	0,1250	1,2360	2,3920	3,5150
4	3,4150	2,2250	1,0940	0,0430	0,1950	1,2520	2,4110	3,5520

Matrizes de deslocamento real: Provet 5

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	3,1380	2,0730	1,0560	0,0160	0,0660	1,1600	2,2180	3,2860
2	3,1540	2,0910	1,0680	0,0000	0,0620	1,1500	2,2050	3,2780
3	3,1300	2,0950	1,0440	0,0090	0,0450	1,1160	2,2220	3,2460
4	3,1080	2,0770	1,0230	0,0050	0,0330	1,1660	2,2150	3,2630

Matrizes de deslocamento real: Provet 6

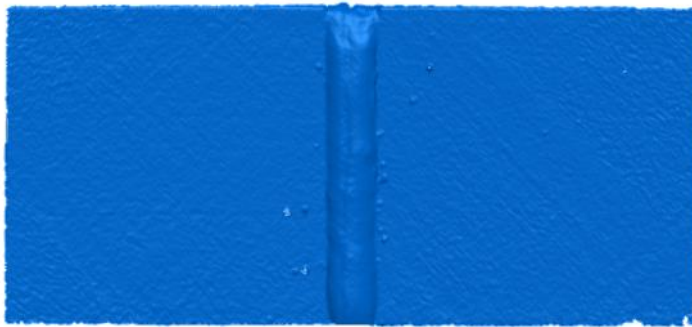
Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	3,5460	2,3970	1,2250	0,0450	0,1470	1,3610	2,5330	3,7300
2	3,5350	2,3750	1,2100	0,0130	0,1220	1,3500	2,5200	3,7390
3	3,5520	2,3940	1,1950	0,0140	0,1330	1,3600	2,5170	3,7190
4	3,5120	2,3810	1,1780	0,0000	0,1290	1,3840	2,5360	3,7510

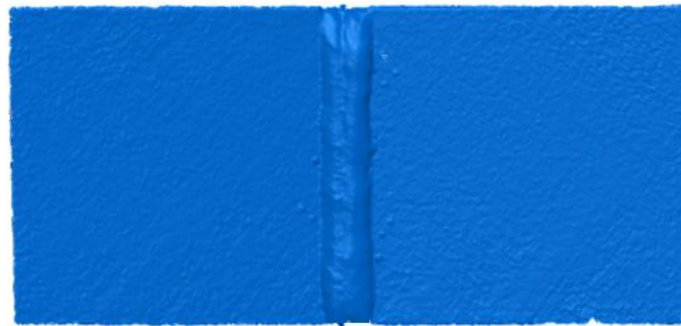
Malha do provete M[u]_1 adquirida pelo MetraSCAN 3D



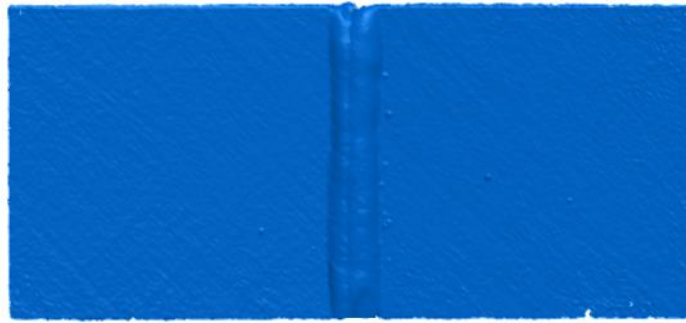
Malha do provete M[u]_2 adquirida pelo MetraSCAN 3D



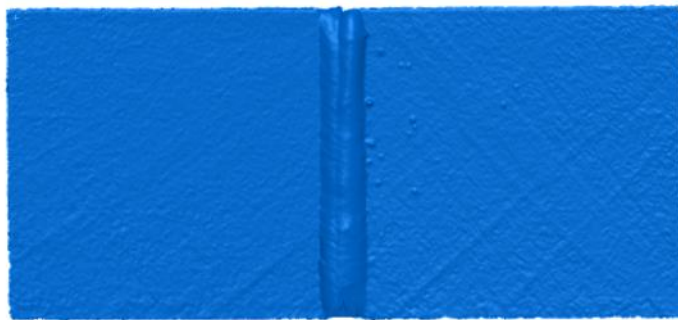
Malha do provete M[u]_3 adquirida pelo MetraSCAN 3D



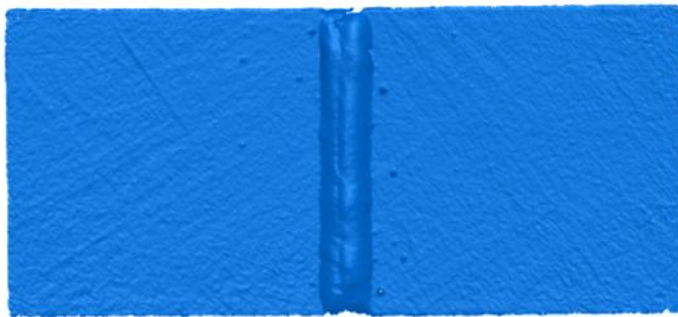
Malha do provete M[a]_1 adquirida pelo MetraSCAN 3D



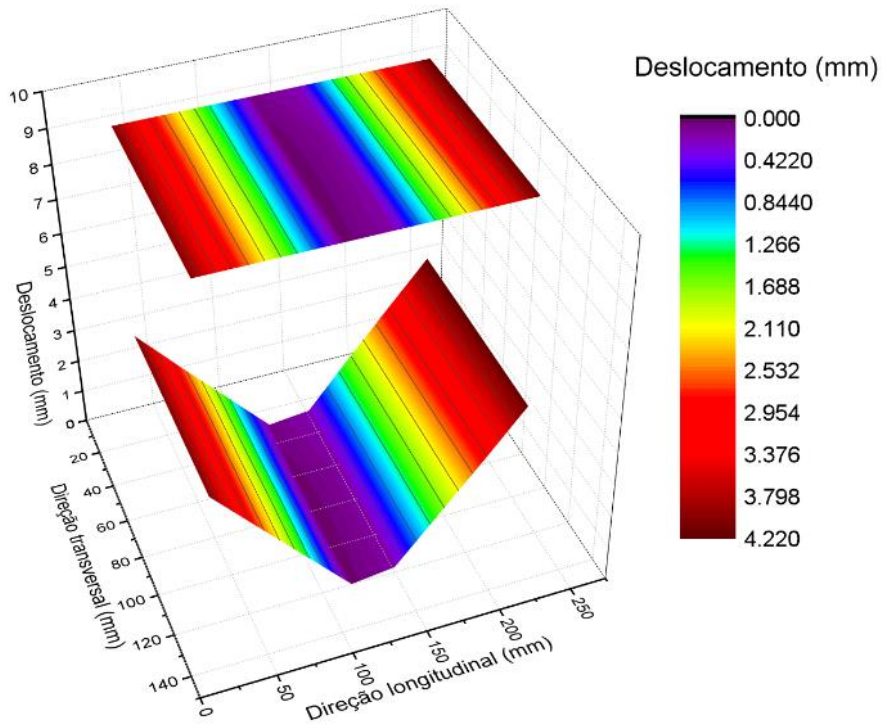
Malha do provete M[a]_2 adquirida pelo MetraSCAN 3D



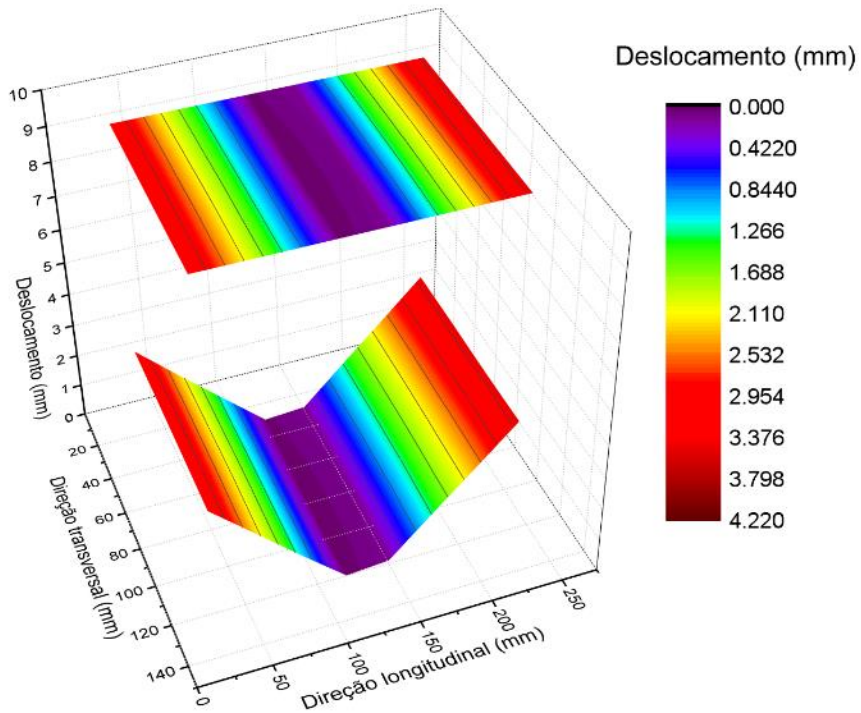
Malha do provete M[a]_3 adquirida pelo MetraSCAN 3D



Gráficos de superfície com projeção das médias de $M[u]$



Gráficos de superfície com projeção das médias de $M[a]$



(III) Soldadura em juntas de topo em chapas finas

Provetes	Sequência de soldadura
01, 02, 03	SS: Sequência simétrica
04, 05, 06	SR: Sequência de passes em retrocesso
07, 08, 09	SC: Sequência de passes corridos

Matrizes dos deslocamentos

Matrizes de medição: Provete 1								
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	27,8430	27,9720	28,0620	28,1600	28,2040	28,2570	28,2820	28,2760
2	27,9570	28,0730	28,1500	28,2230	28,2620	28,3090	28,3230	28,2980
3	28,0140	28,1420	28,2360	28,2810	28,3160	28,3600	28,3550	28,3660
4	28,1070	28,1930	28,2650	28,3260	28,3540	28,3820	28,3650	28,3630
5	28,1440	28,1180	28,0980	28,1210	28,1380	28,2260	28,2850	28,3660
6	28,1530	28,1370	28,0750	28,0840	28,1000	28,1780	28,2510	28,3230
7	28,1460	28,1370	28,0600	28,0700	28,0730	28,1460	28,2100	28,2880
8	28,1410	28,0960	28,0190	28,0030	28,0030	28,0490	28,1080	28,1890
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	30,4220	29,6290	28,8990	28,4610	28,3090	28,7280	29,7120	31,0830
2	31,2980	30,4560	29,7640	29,3810	29,3230	29,8580	30,9680	32,5060
3	31,9730	31,1220	30,5160	30,1730	30,2310	30,8910	32,2390	34,0530
4	32,5080	31,3960	30,6990	30,6100	30,9300	31,6370	33,1520	35,2280
5	32,3310	31,1540	30,2880	30,1760	30,4010	31,2530	32,8450	35,2950
6	31,3370	30,2970	29,4280	29,0560	29,0940	29,8400	31,3670	33,3560
7	30,0460	29,0370	28,1520	27,6450	27,5160	28,1260	29,4200	31,1240
8	28,4920	27,5100	26,4870	25,9640	25,6860	26,1840	27,3760	28,8760

Matrizes de medição: Provete 2								
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	28,3020	28,3280	28,3490	28,3430	28,3050	28,2560	28,1890	28,1160
2	28,4320	28,4430	28,4510	28,4280	28,3770	28,3340	28,2520	28,1550
3	28,5340	28,5580	28,5460	28,5180	28,4580	28,4100	28,3360	28,2330
4	28,6570	28,6880	28,6440	28,5640	28,5260	28,4590	28,3630	28,2690
5	28,3240	28,2840	28,2780	28,2880	28,3170	28,3680	28,4300	28,5050
6	28,3450	28,3250	28,3010	28,3030	28,3170	28,3560	28,4030	28,4400
7	28,3170	28,2940	28,2640	28,2530	28,2590	28,2920	28,3180	28,3690
8	28,2840	28,2370	28,1900	28,1710	28,1660	28,1950	28,2140	28,2600
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	31,2490	30,2520	29,4030	28,7610	28,4390	28,6790	29,5340	30,7370
2	32,0980	31,1060	30,3010	29,7080	29,4890	29,8310	30,8140	32,1750
3	32,8210	31,7880	31,0220	30,5850	30,4610	30,9480	32,1080	33,8060
4	33,3550	32,1610	31,3430	31,1300	31,2280	31,7560	33,0840	35,0990
5	32,6410	31,4730	30,6850	30,4640	30,7310	31,4480	32,9390	35,2040
6	31,5770	30,5760	29,7750	29,4240	29,4350	30,1100	31,4530	33,3040
7	30,0560	29,1000	28,2730	27,7530	27,6890	28,2270	29,3880	31,0140
8	28,5630	27,5460	26,6440	26,0440	25,8250	26,2910	27,2840	28,7840

Matrizes de medição: Provete 3								
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	27,9770	28,0040	28,1010	28,1780	28,2850	28,4010	28,5510	28,7000
2	28,0680	28,1500	28,2310	28,2900	28,3930	28,4930	28,6330	28,7920
3	28,2340	28,2610	28,3560	28,3760	28,4610	28,5650	28,6930	28,8830
4	28,3950	28,3850	28,4170	28,4570	28,5420	28,6170	28,7020	28,8740
5	28,4300	28,3990	28,3530	28,3360	28,3660	28,4200	28,5120	28,6130
6	28,3320	28,3100	28,2610	28,2450	28,2690	28,3100	28,4040	28,4640
7	28,2160	28,1940	28,1690	28,1350	28,1700	28,2120	28,2950	28,3510
8	28,1290	28,0970	28,0540	27,9980	28,0450	28,0820	28,1440	28,1960
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	30,1200	29,3580	28,7320	28,3830	28,4060	29,0780	30,4310	32,2900
2	31,0070	30,2080	29,6200	29,3020	29,4560	30,1710	31,6490	33,5730
3	31,7340	30,8420	30,2390	30,0460	30,2440	31,0750	32,7030	34,9330
4	32,2680	31,1220	30,5070	30,4910	30,8780	31,6630	33,3060	35,7880
5	32,0600	30,9500	30,2370	30,1260	30,4200	31,1950	32,8540	35,2360
6	31,0950	30,1110	29,4180	29,0620	29,1670	29,8310	31,3250	33,1880
7	29,7860	28,8780	28,1310	27,6750	27,6020	28,0890	29,3370	30,8920
8	28,5170	27,5470	26,7080	26,1590	25,9800	26,3750	27,4130	28,8140

Matrizes de medição: Provete 4								
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	27,9890	28,0420	28,1380	28,2020	28,2610	28,3110	28,3570	28,4090
2	28,0140	28,1380	28,2000	28,2520	28,2970	28,3340	28,3790	28,4190
3	28,1450	28,2110	28,2530	28,3030	28,3400	28,3640	28,3990	28,4240
4	28,2170	28,2590	28,2940	28,3300	28,3530	28,3600	28,3590	28,3840
5	28,0370	28,1270	28,1780	28,2370	28,2460	28,2700	28,2330	28,2180
6	28,0640	28,1530	28,1850	28,2300	28,2410	28,2490	28,2220	28,1850
7	28,0830	28,1630	28,1760	28,2240	28,2050	28,2300	28,1950	28,1840
8	28,1120	28,1750	28,1780	28,1980	28,1820	28,1800	28,1430	28,1410
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	31,0750	30,0240	29,1860	28,5310	28,3060	28,8640	30,1660	31,8860
2	31,9510	30,8920	30,0420	29,5030	29,4140	30,1070	31,5770	33,4610
3	32,5870	31,5290	30,7440	30,3110	30,3800	31,2620	32,9850	35,2030
4	33,0060	31,7250	30,9430	30,6770	31,0280	32,1150	34,0200	36,4750
5	32,5190	31,3720	30,5120	30,3460	30,6030	31,6680	33,6860	36,2150
6	31,5410	30,5410	29,6740	29,2640	29,2760	30,1240	31,7540	33,9040
7	30,0310	29,0030	28,0840	27,5780	27,4360	28,0960	29,4380	31,3290
8	28,4520	27,4270	26,4720	25,7550	25,4730	25,9740	27,1240	28,7620

Matrizes de medição: Provete 5								
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	28,1160	28,1340	28,1250	28,1650	28,2110	28,3520	28,4930	28,6800
2	28,1730	28,1990	28,1850	28,2150	28,2560	28,3960	28,5240	28,7110
3	28,1990	28,2360	28,2170	28,2440	28,2800	28,4180	28,5510	28,7360
4	28,2410	28,2470	28,2110	28,2180	28,2800	28,3970	28,5300	28,7060
5	28,1990	28,2510	28,2880	28,3430	28,3980	28,4330	28,4690	28,4650
6	28,1920	28,2370	28,2540	28,3030	28,3360	28,3670	28,3900	28,3560
7	28,1530	28,1740	28,1790	28,2180	28,2530	28,2700	28,2800	28,2780
8	28,1290	28,1130	28,1190	28,1360	28,1660	28,1880	28,1820	28,1910
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	30,9960	30,0940	29,1910	28,5960	28,4370	28,9610	30,1180	31,8770
2	31,7840	30,9030	30,0930	29,5890	29,4990	30,1940	31,4950	33,3150
3	32,4650	31,5690	30,7750	30,3640	30,3880	31,2480	32,8180	35,0590
4	32,9350	31,8620	30,9950	30,7360	31,0390	32,0810	33,9320	36,4940
5	32,6200	31,6340	30,9170	30,6820	30,9650	31,9170	33,6770	36,0620
6	31,6100	30,6920	29,9440	29,5340	29,5460	30,2520	31,7390	33,6740
7	30,1460	29,1990	28,4000	27,8410	27,7150	28,2850	29,5410	31,2290
8	28,5920	27,6010	26,6910	26,0670	25,7830	26,1880	27,2320	28,7890

Matrizes de medição: Provete 6								
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	28,0460	28,0550	28,1070	28,1100	28,1640	28,2080	28,2900	28,3890
2	28,0660	28,0540	28,0840	28,1040	28,1430	28,1830	28,2540	28,3130
3	28,0100	28,0380	28,0800	28,0900	28,1240	28,1510	28,2160	28,2570
4	28,0450	28,0460	28,0640	28,0570	28,0940	28,1140	28,1360	28,2080
5	28,0390	28,0430	28,0150	28,0180	28,0440	28,1100	28,1460	28,1840
6	28,0900	28,0590	28,0220	28,0400	28,0390	28,0990	28,1360	28,1530
7	28,1030	28,1000	28,0570	28,0700	28,0660	28,1200	28,1500	28,1820
8	28,1180	28,0990	28,0490	28,0570	28,0550	28,1050	28,1250	28,1510
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	31,1570	30,1410	29,2480	28,5540	28,3630	28,8030	30,0400	31,5870
2	31,9530	30,9540	30,1180	29,5260	29,4250	30,0320	31,4210	33,2140
3	32,6020	31,5800	30,8180	30,3510	30,3850	31,2020	32,7850	34,8450
4	33,0140	31,8440	31,0640	30,7870	31,0580	32,0080	33,7750	36,1310
5	32,7490	31,6390	30,7620	30,5210	30,7870	31,7630	33,5890	36,0630
6	31,6880	30,6320	29,7700	29,3330	29,2880	30,1560	31,7720	33,7180
7	30,1190	29,1400	28,2320	27,6350	27,5230	28,1900	29,4640	31,1210
8	28,4570	27,5030	26,5200	25,7530	25,5460	26,0660	27,1690	28,6940

Matrizes de medição: Provete 7								
Pré-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	28,1270	28,1340	28,1410	28,1930	28,1860	28,2400	28,2340	28,2780
2	28,1430	28,1660	28,1520	28,2050	28,1930	28,2660	28,2250	28,2570
3	28,1750	28,1990	28,2060	28,2280	28,2000	28,2590	28,2420	28,2640
4	28,2050	28,1970	28,1700	28,2290	28,1830	28,2160	28,1790	28,2330
5	27,9530	27,9410	27,9290	27,9880	27,9920	28,0940	28,1480	28,2510
6	28,0310	28,0290	28,0110	28,0480	28,0500	28,1360	28,1620	28,2320
7	28,0890	28,0730	28,0480	28,0640	28,0610	28,1290	28,1730	28,2580
8	28,1080	28,0800	28,0340	28,0050	28,0050	28,0590	28,0980	28,1720
Pós-soldadura: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	32,8810	30,8920	29,3450	28,4510	28,3530	29,0890	30,3200	31,8010
2	33,6920	31,6560	30,0650	29,1480	29,0280	29,7630	30,9650	32,4750
3	34,4080	32,2760	30,6020	29,6940	29,5280	30,2170	31,3990	33,0220
4	34,5230	32,3200	30,6880	29,8320	29,6100	30,2110	31,3640	33,1620
5	33,8510	31,7220	30,1580	29,2940	29,1820	29,8820	31,1330	32,9580
6	32,6100	30,5900	29,0370	28,2060	28,1030	28,9150	30,2040	31,9570
7	30,7110	28,8260	27,3290	26,5700	26,5520	27,4340	28,7670	30,3850
8	28,7390	26,9400	25,4280	24,7010	24,7700	25,7010	27,0220	28,6960

Matrizes de medição: Provete 8**Pré-soldadura: Equipamento computadorizado**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	27,8110	27,8920	28,0320	28,1150	28,2520	28,3920	28,5750	28,7690
2	27,9010	27,9900	28,1020	28,1960	28,3210	28,4550	28,6270	28,7780
3	27,9490	28,0260	28,1310	28,2150	28,3330	28,4620	28,6120	28,8180
4	28,0160	28,0820	28,1700	28,2370	28,3490	28,4550	28,5960	28,7800
5	28,0710	28,0470	28,0550	28,0950	28,1410	28,1890	28,2970	28,3930
6	28,1120	28,1160	28,1390	28,1370	28,1700	28,1990	28,2860	28,3420
7	28,0950	28,0990	28,1150	28,1050	28,1390	28,1670	28,2400	28,2980
8	28,0830	28,0580	28,0520	28,0340	28,0630	28,0850	28,1470	28,1940

Pós-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	31,2360	29,7860	28,7080	28,2610	28,6770	29,8460	31,6450	33,5410
2	32,2790	30,6970	29,5740	29,0130	29,3440	30,4590	32,1540	34,0160
3	33,1340	31,4340	30,1170	29,5090	29,7400	30,7180	32,3460	34,3310
4	33,7270	31,7370	30,3520	29,6580	29,7620	30,6220	32,1940	34,0540
5	33,5290	31,3860	29,9450	29,2430	29,3430	30,0980	31,6640	33,2910
6	32,3120	30,4650	29,0040	28,2380	28,3230	29,1090	30,4830	32,1490
7	30,5380	28,8240	27,3820	26,6400	26,6990	27,5080	28,9230	30,5140
8	28,5800	26,8510	25,4960	24,7540	24,8980	25,7620	27,1350	28,7070

Matrizes de medição: Provete 9**Pré-soldadura: Equipamento computadorizado**

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	27,9690	28,0130	28,0865	28,1540	28,2190	28,3160	28,4045	28,5235
2	28,0220	28,0780	28,1270	28,2005	28,2570	28,3605	28,4260	28,5175
3	28,0620	28,1125	28,1685	28,2215	28,2665	28,3605	28,4270	28,5410
4	28,1105	28,1395	28,1700	28,2330	28,2660	28,3355	28,3875	28,5065
5	28,0120	27,9940	27,9920	28,0415	28,0665	28,1415	28,2225	28,3220
6	28,0715	28,0725	28,0750	28,0925	28,1100	28,1675	28,2240	28,2870
7	28,0920	28,0860	28,0815	28,0845	28,1000	28,1480	28,2065	28,2780
8	28,0955	28,0690	28,0430	28,0195	28,0340	28,0720	28,1225	28,1830

Pós-soldadura: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	32,0585	30,3390	29,0265	28,3560	28,5150	29,4675	30,9825	32,6710
2	32,9855	31,1765	29,8195	29,0805	29,1860	30,1110	31,5595	33,2455
3	33,7710	31,8550	30,3595	29,6015	29,6340	30,4675	31,8725	33,6765
4	34,1250	32,0285	30,5200	29,7450	29,6860	30,4165	31,7790	33,6080
5	33,6900	31,5540	30,0515	29,2685	29,2625	29,9900	31,3985	33,1245
6	32,4610	30,5275	29,0205	28,2220	28,2130	29,0120	30,3435	32,0530
7	30,6245	28,8250	27,3555	26,6050	26,6255	27,4710	28,8450	30,4495
8	28,6595	26,8955	25,4620	24,7275	24,8340	25,7315	27,0785	28,7015

Matrizes dos deslocamentos normalizadas e rotacionadas

Matrizes de deslocamento real rotacionadas: Prorete 1								
Distorções: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	2,6185	1,6965	0,8765	0,3405	0,1445	0,5105	1,4695	2,8465
2	3,7059	2,7479	1,9789	1,5229	1,4259	1,9139	3,0099	4,5729
3	4,6492	3,6702	2,9702	2,5822	2,6052	3,2212	4,5742	6,3772
4	5,4166	4,2186	3,4496	3,2996	3,5916	4,2706	5,8026	7,8806
5	5,5279	4,3769	3,5309	3,3959	3,6039	4,3679	5,9009	8,2699
6	4,8503	3,8263	3,0193	2,6383	2,6603	3,3283	4,7823	6,6993
7	3,8916	2,8916	2,0836	1,5666	1,4346	1,9716	3,2016	4,8276
8	2,6680	1,7310	0,7850	0,2780	0,0000	0,4520	1,5850	3,0040

Matrizes de deslocamento real rotacionadas: Prorete 2								
Distorções: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	2,8378	1,8148	0,9448	0,3088	0,0248	0,3138	1,2358	2,5118
2	3,9068	2,9038	2,0908	1,5208	1,3528	1,7378	2,8028	4,2608
3	4,8778	3,8208	3,0668	2,6578	2,5938	3,1288	4,3628	6,1638
4	5,6389	4,4139	3,6399	3,5069	3,6429	4,2379	5,6619	7,7709
5	5,6079	4,4799	3,6979	3,4669	3,7049	4,3709	5,7999	7,9899
6	4,8729	3,8919	3,1149	2,7619	2,7589	3,3949	4,6909	6,5049
7	3,7300	2,7970	2,0000	1,4910	1,4210	1,9260	3,0610	4,6360
8	2,6200	1,6500	0,7950	0,2140	0,0000	0,4370	1,4110	2,8650

Matrizes de deslocamento real rotacionadas: Prorete 3								
Distorções: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	2,0220	1,2330	0,5100	0,0840	0,0000	0,5560	1,7590	3,4690
2	3,1364	2,2554	1,5864	1,2094	1,2604	1,8754	3,2134	4,9784
3	4,0159	3,0969	2,3989	2,1859	2,2989	3,0259	4,5259	6,5659
4	4,7073	3,5713	2,9243	2,8683	3,1703	3,8803	5,4383	7,7483
5	4,7828	3,7038	3,0368	2,9428	3,2068	3,9278	5,4948	7,7758
6	4,2342	3,2722	2,6282	2,2882	2,3692	2,9922	4,3922	6,1952
7	3,3597	2,4737	1,7517	1,3297	1,2217	1,6667	2,8317	4,3307
8	2,4961	1,5581	0,7621	0,2691	0,0431	0,4011	1,3771	2,7261

Matrizes de deslocamento real rotacionadas: Prorete 4								
Distorções: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	3,0410	1,9370	1,0030	0,2840	0,0000	0,5080	1,7640	3,4320
2	4,2884	3,1054	2,1934	1,6024	1,4684	2,1244	3,5494	5,3934
3	5,1898	4,0658	3,2388	2,7558	2,7878	3,6458	5,3338	7,5268
4	5,9332	4,6102	3,7932	3,4912	3,8192	4,8992	6,8052	9,2352
5	6,0226	4,7856	3,8746	3,6496	3,8976	4,9386	6,9936	9,5376
6	5,4141	4,3251	3,4261	2,9711	2,9721	3,8121	5,4691	7,6561
7	4,2815	3,1735	2,2415	1,6875	1,5645	2,1995	3,5765	5,4785
8	3,0699	1,9819	1,0239	0,2869	0,0209	0,5239	1,7109	3,3509

Matrizes de deslocamento real rotacionadas: Provet 5

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	2,7286	1,8086	0,9146	0,2796	0,0746	0,4576	1,4736	3,0456
2	3,8217	2,9147	2,1187	1,5847	1,4537	2,0087	3,1817	4,8147
3	4,8387	3,9057	3,1307	2,6927	2,6807	3,4027	4,8397	6,8957
4	5,6288	4,5498	3,7188	3,4528	3,6938	4,6188	6,3368	8,7228
5	5,7178	4,6798	3,9258	3,6358	3,8638	4,7808	6,5048	8,8938
6	5,0769	4,1139	3,3489	2,8899	2,8689	3,5439	5,0079	6,9769
7	4,0139	3,0459	2,2419	1,6439	1,4829	2,0359	3,2819	4,9719
8	2,8460	1,8710	0,9550	0,3140	0,0000	0,3830	1,4330	2,9810

Matrizes de deslocamento real rotacionadas: Provet 6

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	2,9231	1,8981	0,9531	0,2561	0,0111	0,4071	1,5621	3,0101
2	4,0844	3,0974	2,2314	1,6194	1,4794	2,0464	3,3644	5,0984
3	5,1747	4,1247	3,3207	2,8437	2,8437	3,6337	5,1517	7,1707
4	5,9369	4,7659	3,9679	3,6979	3,9319	4,8619	6,6069	8,8909
5	6,0632	4,9492	4,1002	3,8562	4,0962	5,0062	6,7962	9,2322
6	5,3365	4,3115	3,4865	3,0315	2,9875	3,7955	5,3745	7,3035
7	4,1397	3,1637	2,2987	1,6887	1,5807	2,1937	3,4377	5,0627
8	2,8480	1,9130	0,9800	0,2050	0,0000	0,4700	1,5530	3,0520

Matrizes de deslocamento real rotacionadas: Provet 7

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	4,5870	2,5910	1,0370	0,0910	0,0000	0,6820	1,9190	3,3560
2	5,8849	3,8259	2,2489	1,2789	1,1709	1,8329	3,0759	4,5539
3	7,0718	4,9158	3,2348	2,3048	2,1668	2,7968	3,9958	5,5968
4	7,6597	5,4647	3,8597	2,9447	2,7687	3,3367	4,5267	6,2707
5	7,7426	5,6256	4,0736	3,1506	3,0346	3,6326	4,8296	6,5516
6	6,9266	4,9086	3,3736	2,5056	2,4006	3,1266	4,3896	6,0726
7	5,4725	3,6035	2,1315	1,3565	1,3415	2,1555	3,4445	4,9775
8	3,9844	2,2134	0,7474	0,0494	0,1184	0,9954	2,2774	3,8774

Matrizes de deslocamento real rotacionadas: Provet 8

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	3,2790	1,7480	0,5300	0,0000	0,2790	1,3080	2,9240	4,6260
2	4,7391	3,0681	1,8331	1,1781	1,3841	2,3651	3,8881	5,5991
3	6,0531	4,2761	2,8541	2,1621	2,2751	3,1241	4,6021	6,3811
4	7,0862	5,0302	3,5572	2,7962	2,7882	3,5422	4,9732	6,6492
5	7,3402	5,2212	3,7722	3,0302	3,0842	3,7912	5,2492	6,7802
6	6,5893	4,7383	3,2543	2,4903	2,5423	3,2993	4,5863	6,1963
7	5,3393	3,6213	2,1633	1,4313	1,4563	2,2373	3,5793	5,1123
8	3,9004	2,1964	0,8474	0,1234	0,2384	1,0804	2,3914	3,9164

Matrizes de deslocamento real rotacionadas: Provet 9

Distorções: Equipamento computadorizado

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	3,8875	2,1240	0,7380	0,0000	0,0940	0,9495	2,3760	3,9455
2	5,2665	3,4015	1,9955	1,1830	1,2320	2,0535	3,4365	5,0310
3	6,5170	4,5505	2,9990	2,1880	2,1755	2,9150	4,2535	5,9435
4	7,3274	5,2019	3,6629	2,8249	2,7329	3,3939	4,7044	6,4144
5	7,4959	5,3779	3,8774	3,0449	3,0139	3,6664	4,9939	6,6204
6	6,7124	4,7779	3,2684	2,4524	2,4259	3,1674	4,4424	6,0889
7	5,3604	3,5669	2,1019	1,3484	1,3534	2,1509	3,4664	4,9994
8	3,8969	2,1594	0,7519	0,0409	0,1329	0,9924	2,2889	3,8514

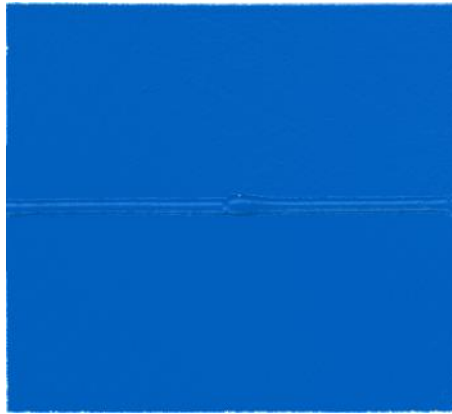
Matrizes dos deslocamentos médios normalizadas e rotacionadas

Matrizes de deslocamento real rotacionadas: SS								
Distorções: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	2,4928	1,5814	0,7771	0,2444	0,0564	0,4601	1,4881	2,9424
2	3,5830	2,6357	1,8854	1,4177	1,3464	1,8424	3,0087	4,6040
3	4,5143	3,5293	2,8120	2,4753	2,4993	3,1253	4,4876	6,3690
4	5,2543	4,0679	3,3379	3,2249	3,4683	4,1296	5,6343	7,7999
5	5,3062	4,1869	3,4219	3,2685	3,5052	4,2222	5,7319	8,0119
6	4,6525	3,6635	2,9208	2,5628	2,5961	3,2385	4,6218	6,4665
7	3,6604	2,7208	1,9451	1,4624	1,3591	1,8548	3,0314	4,5981
8	2,5947	1,6464	0,7807	0,2537	0,0144	0,4300	1,4577	2,8650

Matrizes de deslocamento real rotacionadas: SR								
Distorções: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	2,8976	1,8813	0,9569	0,2732	0,0286	0,4576	1,5999	3,1626
2	4,0648	3,0392	2,1812	1,6022	1,4672	2,0598	3,3652	5,1022
3	5,0677	4,0321	3,2301	2,7641	2,7707	3,5607	5,1084	7,1977
4	5,8330	4,6420	3,8266	3,5473	3,8150	4,7933	6,5830	8,9496
5	5,9346	4,8049	3,9669	3,7139	3,9526	4,9086	6,7649	9,2212
6	5,2758	4,2501	3,4205	2,9641	2,9428	3,7171	5,2838	7,3121
7	4,1450	3,1277	2,2607	1,6734	1,5427	2,1430	3,4320	5,1710
8	2,9213	1,9220	0,9863	0,2686	0,0070	0,4590	1,5656	3,1280

Matrizes de deslocamento real rotacionadas: SC								
Distorções: Equipamento computadorizado								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	3,9178	2,1543	0,7683	0,0303	0,1243	0,9798	2,4063	3,9758
2	5,2968	3,4318	2,0258	1,2133	1,2623	2,0838	3,4668	5,0613
3	6,5473	4,5808	3,0293	2,2183	2,2058	2,9453	4,2838	5,9738
4	7,3578	5,2323	3,6933	2,8553	2,7633	3,4243	4,7348	6,4448
5	7,5263	5,4083	3,9078	3,0753	3,0443	3,6968	5,0243	6,6508
6	6,7427	4,8082	3,2987	2,4827	2,4562	3,1977	4,4727	6,1192
7	5,3907	3,5972	2,1322	1,3787	1,3837	2,1812	3,4967	5,0297
8	3,9272	2,1897	0,7822	0,0712	0,1632	1,0227	2,3192	3,8817

Malha do provete SS_1 adquirida pelo MetraSCAN 3D



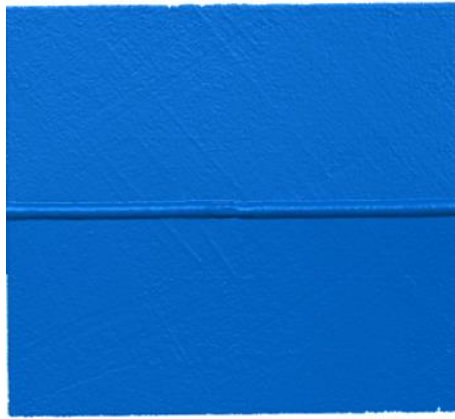
Malha do provete SS_2 adquirida pelo MetraSCAN 3D



Malha do provete SS_3 adquirida pelo MetraSCAN 3D



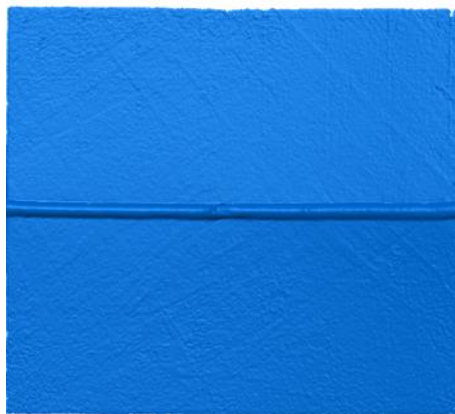
Malha do provete SR_1 adquirida pelo MetraSCAN 3D



Malha do provete SR_2 adquirida pelo MetraSCAN 3D



Malha do provete SR_3 adquirida pelo MetraSCAN 3D



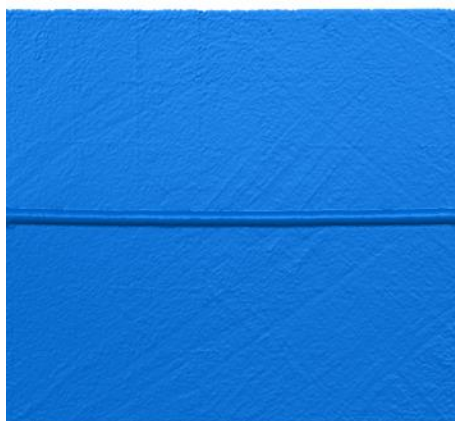
Malha do provete SC_1 adquirida pelo MetraSCAN 3D



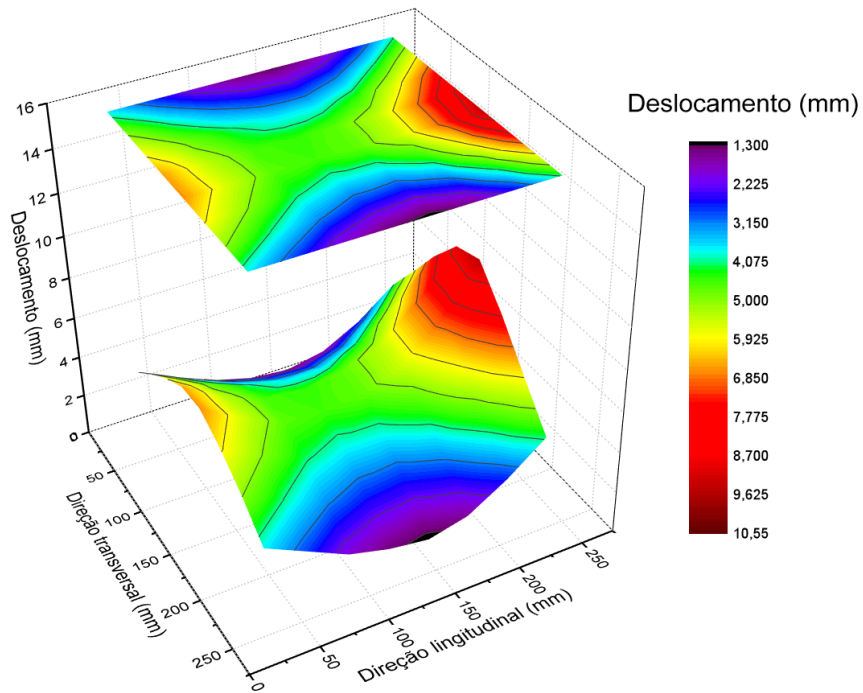
Malha do provete SC_2 adquirida pelo MetraSCAN 3D



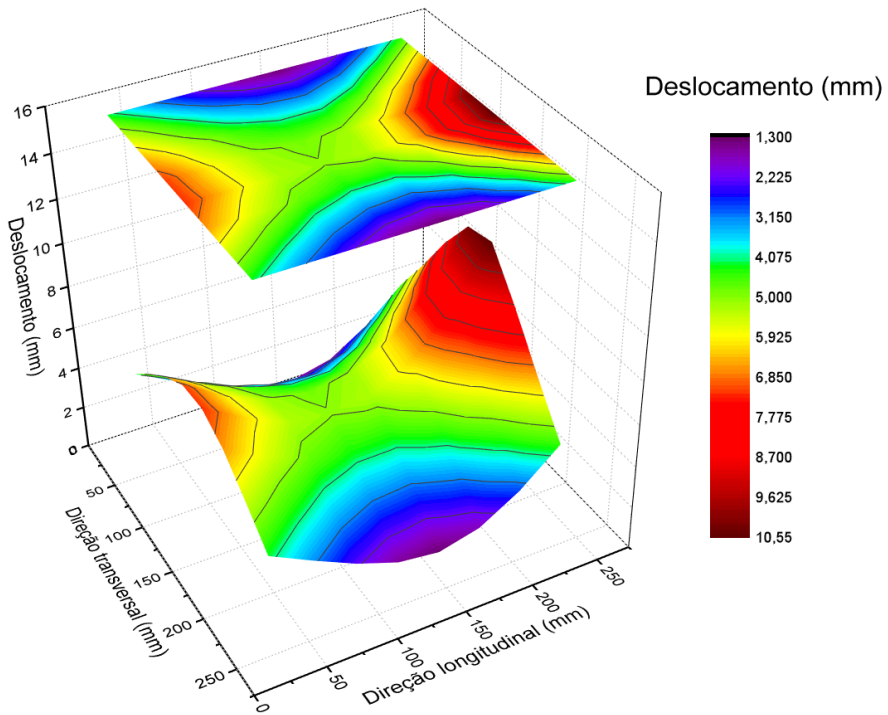
Malha do provete SC_3 adquirida pelo MetraSCAN 3D



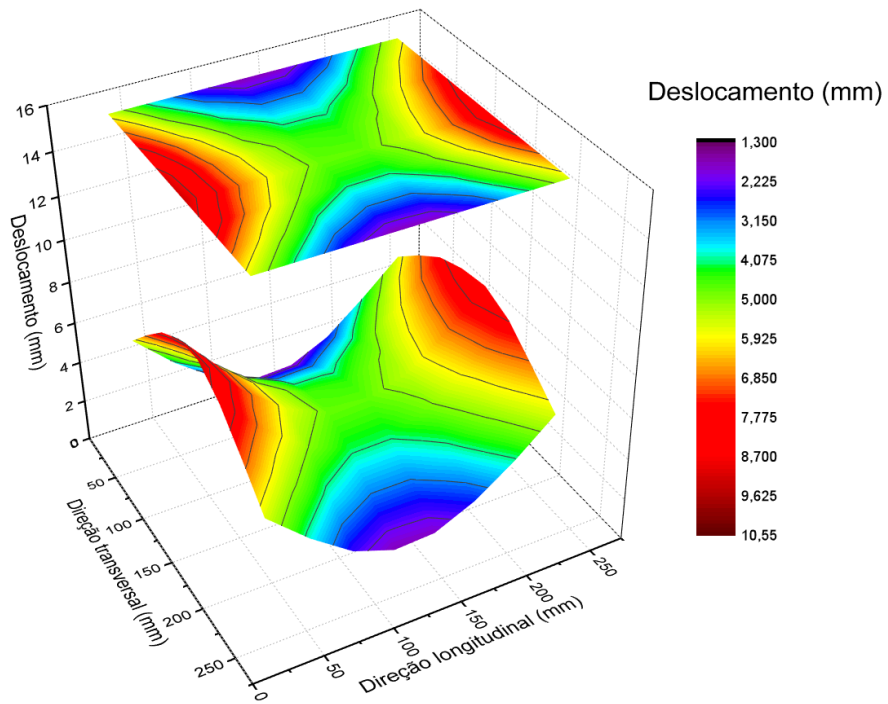
Gráficos de superfície com projeção das médias de SS



Gráficos de superfície com projeção das médias de SR



Gráficos de superfície com projeção das médias de SC



ANEXO III: RELATÓRIOS ESTATÍSTICOS

Análise Univariada de Variância: Soldadura Sobre chapas (I)

Fatores entre sujeitos

		Rótulo de valor	N
Direcao	0	Longitudinal	6
	1	Transversal	6
Sentido	0	Unico	6
	1	Alternado	6

Estatística Descritiva

Variável dependente: Distorcao

Direcao	Sentido	Média	Erro Desvio	N
Longitudinal	Unico	22,47783333	0,174681377	3
	Alternado	22,35133333	0,221522760	3
	Total	22,41458333	0,191402826	6
Transversal	Unico	16,95433333	0,817829037	3
	Alternado	16,64366667	0,666229940	3
	Total	16,79900000	0,688503304	6
Total	Unico	19,71608333	3,071230835	6
	Alternado	19,49750000	3,157595842	6
	Total	19,60679167	2,971955092	12

Teste de igualdade de variâncias do erro de Levene^{a,b}

		Estadística de Levene	gl1	gl2	Sig.
Distorcao	Com base em média	4,054	3	8	0,050
	Com base em mediana	0,484	3	8	0,703
	Com base em mediana e com df ajustado	0,484	3	3,409	0,714
	Com base em média aparada	3,509	3	8	0,069

Testa a hipótese nula de que a variância do erro da variável dependente é igual entre grupos.

a. Variável dependente: Distorcao

b. Design: Intercepto + Direcao + Sentido + Direcao * Sentido

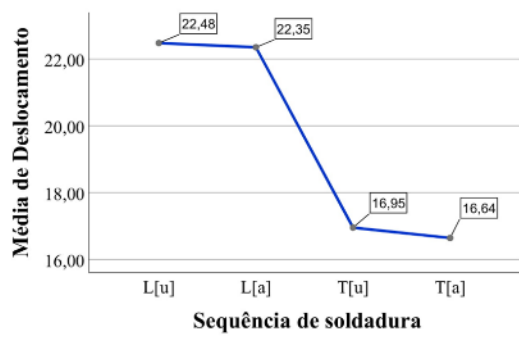
Testes de efeitos entre sujeitos

Variável dependente: Distorcao

Origem	Tipo III Soma dos Quadrados	gl	Quadrado Médio	F	Sig.
Modelo corrigido	94,773 ^a	3	31,591	105,984	0,000
Intercepto	4613,115	1	4613,115	15476,454	0,000
Direcao	94,604	1	94,604	317,386	0,000
Sentido	0,143	1	0,143	0,481	0,508
Direcao * Sentido	0,025	1	0,025	0,085	0,778
Erro	2,385	8	0,298		
Total	4710,273	12			
Total corrigido	97,158	11			

a. R Quadrado = ,975 (R Quadrado Ajustado = ,966)

Parcelas de médias



Análise de Variância: Soldadura Multipasses (II)

Descritivos

	N	Média	Erro Desvio	Erro Erro	Intervalo de confiança de 95% para média	
					Limite inferior	Limite superior
M[s]	3	67,98816667	1,668000924	0,963020783	63,84462267	72,13171067
M[a]	3	55,88833333	3,904667762	2,254360984	46,18860089	65,58806577
Total	6	61,93825000	7,150751917	2,919282246	54,43399609	69,44250391

Descritivos

	Mínimo	Máximo
M[a]	51,81800000	59,60300000
Total	51,81800000	69,84400000

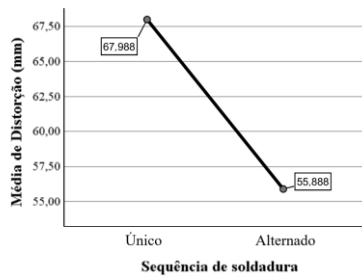
Teste de Homogeneidade de Variâncias

		Estatística de Levene	df1	df2	Sig.
Distorcao	Com base em média	1.395	1	4	0.303
	Com base em mediana	1.028	1	4	0.368
	Com base em mediana e com df ajustado	1.028	1	2.977	0.386
	Com base em média aparada	1.373	1	4	0.306

ANOVA

	Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Entre Grupos	219.609	1	219.609	24.362	0.008
Nos grupos	36.057	4	9.014		
Total	255.666	5			

Parcelas de médias



Análise de variância: Soldadura em Juntas de Topo (III)

Descritivos

	N	Média	Erro Desvio	Erro Erro	Intervalo de confiança de 95% para média	
					Limite inferior	Limite superior
SS	3	196,1470000	11,04411499	6,376322765	168,7118975	223,5821025
SR	3	223,0480000	7,079260625	4,087213028	205,4621417	240,6338583
SC	3	217,3490000	1,690406164	0,975956454	213,1497983	221,5482017
Total	9	212,1813333	13,94434906	4,648116354	201,4627578	222,8999089

Descritivos

	Mínimo	Máximo
SS	183,4130000	203,1110000
SR	215,1220000	228,7430000
SC	215,4080000	218,4980000
Total	183,4130000	228,7430000

Teste de Homogeneidade de Variâncias

		Estatística de Levene	df1	df2	Sig.
Deslocamento	Com base em média	5,209	2	6	0,049
	Com base em mediana	0,519	2	6	0,620
	Com base em mediana e com df ajustado	0,519	2	3,033	0,640
	Com base em média aparada	4,379	2	6	0,067

ANOVA

Deslocamento					
	Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Entre Grupos	1205,667	2	602,834	10,337	0,011
Nos grupos	349,892	6	58,315		
Total	1555,559	8			

Testes Post-Hoc

Comparações múltiplas

Variável dependente: Deslocamento

		(I) Sequencia	(J) Sequencia	Diferença média (I-J)	Erro Erro	Sig.	Intervalo de ...
							Limite inferior
Tukey HSD	SS	SR		-26,9010000*	6,235131291	0,012	-46,0320950
		SC		-21,2020000*	6,235131291	0,033	-40,3330950
	SR	SS		26,9010000*	6,235131291	0,012	7,769904978
		SC		5,699000000	6,235131291	0,652	-13,4320950
	SC	SS		21,2020000*	6,235131291	0,033	2,070904978
		SR		-5,699000000	6,235131291	0,652	-24,8300950

Comparações múltiplas

Variável dependente: Deslocamento

		(I) Sequencia	(J) Sequencia	Limite superior
Tukey HSD	SS	SR		-7,76990498
		SC		-2,07090498
	SR	SS		46,03209502
		SC		24,83009502
	SC	SS		40,33309502
		SR		13,43209502

*. A diferença média é significativa no nível 0,05.

Subconjuntos homogêneos

Deslocamento				
	Sequencia	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
			1	2
Tukey HSD ^a	SS	3	196,1470000	
	SC	3		217,3490000
	SR	3		223,0480000
	Sig.		1,000	0,652
Intervalo Ryan-Einot-Gabriel-Welsch	SS	3	196,1470000	
	SC	3		217,3490000
	SR	3		223,0480000
	Sig.		1,000	0,396

São exibidas as médias para os grupos em subconjuntos homogêneos.

a. Usa o Tamanho da Amostra de Média Harmônica = 3,000.

Parcelas de médias

