



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**MONITORAMENTO CONTÍNUO DE DISTORÇÕES**  
**UTILIZANDO SENSORES A LASERS DURANTE O PROCESSO**  
**DE SOLDAGEM GMAW ROBOTIZADO DE MODELOS**  
**REDUZIDOS EM ESCALA DE ANÉIS SEGMENTADOS**

**JONATHAS HENRIQUE PEREIRA**

**Belo Horizonte, 11 de dezembro de 2015**

**Jonathas Henrique Pereira**

**MONITORAMENTO CONTÍNUO DE DISTORÇÕES  
UTILIZANDO SENSORES A LASERS DURANTE O  
PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW ROBOTIZADO DE  
MODELOS REDUZIDOS EM ESCALA DE ANÉIS  
SEGMENTADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. PhD. Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2015

P436m

Pereira, Jonathas Henrique.

Monitoramento contínuo de distorções utilizando sensores a lasers durante o processo de soldagem GMAW robotizado de modelos reduzidos em escala de anéis segmentados [manuscrito] / Jonathas Henrique Pereira. – 2015.

169 f., enc.: il.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 124-169.

Bibliografia: f. 121-123.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. 3. Análise dimensional - Teses. 4. Processos de fabricação - Teses. I. Bracarense, Alexandre Queiroz, 1959-. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel.: +55 31 3409.5145  
E-mail: [cpgmec@demec.ufmg.br](mailto:cpgmec@demec.ufmg.br)

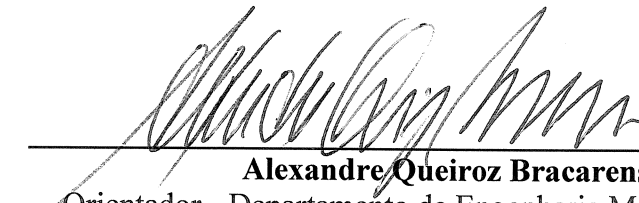
**"MONITORAMENTO CONTÍNUO DE DISTORÇÕES UTILIZANDO  
SENSORES A LASER DURANTE O PROCESSO DE SOLDAGEM  
GMAW ROBOTIZADO DE MODELOS REDUZIDOS EM ESCALA DE  
ANÉIS SEGMENTADOS"**

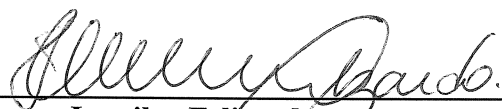
**JONATHAS HENRIQUE PEREIRA**


Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Processos de Fabricação**".


Dissertação aprovada no dia 23 de outubro de 2015.

Por:

  
\_\_\_\_\_  
**Alexandre Queiroz Bracarense**  
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica /UFMG

  
\_\_\_\_\_  
**Ivanilza Felizardo**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais/CEFET

  
\_\_\_\_\_  
**Claudio Turani Vaz**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais/CEFET

  
\_\_\_\_\_  
**Paulo Jose Modenesi**  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/ UFMG



*A Deus,  
A minha esposa Fabiana e minha filha Geovana,  
Aos meus pais Geraldo e Derli e a minha irmã Joana*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela graça da vida e proteção nessa jornada.

À minha mãe Derli, pelo amor incondicional e por sempre acreditar em mim, ao meu pai Geraldo, por ensinar a ser forte e persistente.

À minha esposa Fabiana e à minha filha Geovana, pelo carinho, amor e compreensão pela minha relativa ausência neste período.

À minha irmã Joana, ao meu cunhado Eloy e à minha sobrinha Sophia, pelo companheirismo, carinho e atenção à minha família.

A todos os meus familiares, familiares da minha esposa e familiares do meu cunhado, pelos vários momentos de descontração que vivemos juntos.

Aos meus grandes amigos, Ramon, Deyvisson, Jaques e André, por sermos amigos há tanto tempo.

À diretoria, à gerência e aos funcionários da DELP, pelo apoio. Aos colegas da DELP, Rodrigo, Guilherme, Wellington, Douglas, Leandro e Fernando, pela prontidão toda vez que alguma ajuda foi solicitada. E em especial ao meu Gerente Josane, por todo o apoio durante esse período.

Aos amigos Luciano, Ariel, Bruno, Frank, Aniceto, Aline, Alexandre e Eustáquio do LRSS pelo auxílio e dicas na realização deste trabalho.

Aos professores Cláudio, Paulo, Eduardo, Ivanilza e Ezequiel pelo auxílio e dicas na realização deste trabalho.

Em especial ao meu orientador Prof. PhD. Alexandre Queiroz Bracarense, pela ideia inicial, pelo incentivo, ensinamentos, compreensão e paciência primordiais para a realização deste trabalho.

A todos que de alguma forma contribuíram para mais esta etapa na minha carreira.

Meus sinceros agradecimentos, pois sem vocês nada disso seria possível.

*“Chegará o dia em que talvez as máquinas pensem, porém, elas nunca terão sonhos. ”*

*Theodor Heuss*

*“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá. ”*

*Ayrton Senna*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	10
LISTA DE GRÁFICOS .....	14
LISTA DE TABELAS .....	16
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	19
NOMECLATURA .....	20
RESUMO .....	22
ABSTRACT .....	23
1 INTRODUÇÃO .....	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	29
2.1 Tensões residuais e distorções .....	29
2.2 Sistemas de medições utilizados para medir distorções em estruturas soldadas .....	31
2.2.1 Laser track .....	31
2.2.2 3D laser scanning .....	32
2.2.3 Teodolito e nível ótico .....	32
2.2.4 Sistemas de medição por coordenadas .....	34
2.3 Monitoramento das distorções de soldagem .....	36
2.4 Controle e simulação das distorções de soldagem .....	46
3 METODOLOGIA .....	55
3.1 Equipamentos .....	55
3.1.1 Robô .....	55
3.1.2 Instrumentos de medição .....	56
3.2 Montagem do sistema de monitoramento das distorções de soldagem .....	57
3.2.1 Posicionamento da mesa de trabalho, calibração da ferramenta de ponta de medição como ferramenta de trabalho do robô e montagem do ponto de origem .....	58

3.2.2	Sincronização do ponto de origem do sistema de coordenada tridimensional de usuário do robô com o ponto de origem na mesa trabalho.....	60
3.2.3	Calibração do relógio comparador como ferramenta de trabalho do robô .....	63
3.2.4	Montagem dos batentes e apoios sobre a mesa de trabalho.....	64
3.2.5	Montagem e alinhamento do anteparo translúcido.....	64
3.2.6	Montagem de suportes e do sistema elétrico para os sensores a laser.....	67
3.3	Materiais .....	68
3.3.1	Definição do modelo reduzido em escala do anel segmentado, preparação, montagem e soldagem dos corpos de prova .....	68
3.4	Procedimento experimental .....	72
3.5	Controle dimensional dos corpos de prova antes e após a soldagem.....	73
3.5.1	Controle dimensional das distorções angulares com a peça apoiada sobre a mesa de desempenho.....	74
3.5.2	Marcação de pontos de monitoramento sobre os corpos de prova para posicionamento dos sensores a laser .....	75
3.5.3	Controle de planicidade com a peça apoiada sobre a mesa de trabalho .....	76
3.5.4	Controle dimensional das distorções angulares com a peça apoiada sobre a mesa de trabalho .....	78
3.5.5	Controle das dimensões externas do corpo de prova.....	78
3.5.6	Controle dimensional do bisel e reforço de solda .....	79
3.6	Procedimento de análise computacional dos vídeos para monitoramento das distorções ao longo do processo de soldagem dos corpos de prova.....	79
3.7	Projeção teórica da posição final dos feixes luminosos refletidos no painel do anteparo considerando os ângulos medidos no corpo de prova.....	81
3.8	Comprovação, por análise estatística de teste de hipótese, da eficiência do sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser .....	87
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	88
4.1	Testes iniciais de soldagem para ajustes dos parâmetros de soldagem.....	88

4.2	Testes experimentais de soldagem para monitoramento das distorções .....	93
4.2.1	Monitoramento das distorções de soldagem utilizando instrumentos de medição	
	94	
4.2.2	Monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para os corpos de prova tipo CV1 .....	97
4.2.3	Monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para os corpos de prova tipo CX1 .....	103
4.2.4	Monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para os corpos de prova tipo CV2.....	110
4.2.5	Análise das distorções de soldagem para os três tipos de corpos de prova .....	116
5	CONCLUSÕES .....	119
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	120
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	121
7	APÊNDICES .....	124
	Apêndice 01 – Desenhos de conjunto e detalhamento do sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser.....	124
	Apêndice 02 – Tabelas de valores da calibração da coordenada de usuário.....	131
	Apêndice 03 – Desenhos de fabricação dos corpos de prova.....	133
	Apêndice 04 - Roteiro para execução do procedimento experimental .....	135
	Apêndice 05 – Tabelas de valores para o controle das dimensões externas dos corpos de prova e controle dimensional dos biseis e reforços de solda.....	139
	Apêndice 06 – Tabelas de valores para o controle dimensional das distorções antes e após soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova apoiados sobre a mesa de desempenho.....	143
	Apêndice 07 – Tabelas de valores do monitoramento dos pontos sobre os corpos de prova antes a após soldagem utilizando a FPM e o relógio comparador acoplados ao braço robótico com os corpos de prova apoiados sobre a mesa de trabalho .....	146
	Apêndice 08 – Tabelas de valores para o controle dimensional das distorções antes e após soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova apoiados sobre a mesa	

de trabalho .....	149
Apêndice 09 - Tabelas resumo dos valores dos monitoramentos das distorção de soldagem utilizando diferentes instrumentos de medição.....	152
Apêndice 10 – Tabela de valores do monitoramento contínuo dos deslocamentos dos pontos refletidos no plano do anteparo através da análise dos frames dos vídeos no software Auto Cad.....	154
Apêndice 11 - Tabela dos valores da projeção teórica da posição final dos pontos refletidos no painel do anteparo .....	157
Apêndice 12 - Tabela resumo dos valores do monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser .....	158
Apêndice 13 - Planilhas dos cálculos estatísticos para os testes de hipóteses .....	160

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Processos utilizados na correção das distorções de soldagem - cortesia DELP. .....	24
FIGURA 1.2 - Representação de turbinas hidroelétricas - adaptado - (VOITH HYDRO POWER).....	25
FIGURA 1.3 - Estruturas e anéis segmentados em processo de fabricação – cortesia DELP.	26
FIGURA 2.1 - Distribuição de tensões (ARAÚJO, 2012).....	29
FIGURA 2.2 - Tipos de distorções (AMANTE, 2006). ....	30
FIGURA 2.3 - Esquema de um laser track - adaptado - (AMANTE, 2006).....	31
FIGURA 2.4 - Esquema de um laser scanning - adaptado - (AMANTE, 2006).....	32
FIGURA 2.5 - Representação ilustrativa e esquemática de teodolito. ....	33
FIGURA 2.6 - Representação ilustrativa e esquemática do nível ótico. ....	34
FIGURA 2.7 - Tipos de máquina de medição tridimensional.....	35
FIGURA 2.8 - Geometria dos corpos de prova (ROGANA, <i>et al.</i> , 1999).....	37
FIGURA 2.9 - Esquema de configuração dos corpos de prova - adaptado - (CHENG, <i>et al.</i> , 2005). ....	37
FIGURA 2.10 - Esquema de medição da distorção - adaptado - (CHENG, <i>et al.</i> , 2005).....	38
FIGURA 2.11 - Sequência de soldagem e detalhamento do chanfro (MURUGAN, <i>et al.</i> , 2005). .....	39
FIGURA 2.12 - Configuração dos corpos de provas – adaptado - (CORAINI, <i>et al.</i> , 2010). .	41
FIGURA 2.13 - Esquema de sequência de mediação dos pontos (CORAINI, <i>et al.</i> , 2010). ...	42
FIGURA 2.14 - Configuração experimental - adaptado - (YANG, <i>et al.</i> , 2014). ....	43
FIGURA 2.15 - Esquema de medição e fixação dos corpos de prova (ABELING, <i>et al.</i> , 2014). .....	45
FIGURA 2.16 - Montagem experimental para monitoração das distorções angulares (MIRANDA, <i>et al.</i> , 2007). ....	48
FIGURA 2.17 - Estrutura esférica - adaptado - (WANG, <i>et al.</i> , 2007). ....	49
FIGURA 2.18 - Representação da estrutura do painel e fixações – adaptado - (ARAÚJO, 2012). .....	51
FIGURA 2.19 - Sequências de soldagem e distribuição dos cordões de solda (CABRAL, <i>et al.</i> , 2013). ....	52



FIGURA 3.1 - Conjunto do robô antropomórfico e passos básicos para programação da linguagem <i>INFORM</i> .....	56
FIGURA 3.2 - Sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem (SMCDS)..	58
FIGURA 3.3 - Operação de calibração do TCP utilizando dispositivos usinados de referência. ....	59
FIGURA 3.4 – Definição do ponto de referência do sistema. ....	60
FIGURA 3.5 – Representação esquemática da configuração da coordenada de usuário para robô: a) Diferentes planos inclinados; b) Diferentes planos rotacionados; c) Indicação dos três pontos utilizados para configurar uma coordenada de usuário. - adaptado - (MOTOMAN YASKAWA COMPANY, 1998).....	60
FIGURA 3.6 - Calibração e sincronização da coordenada de usuário. ....	61
FIGURA 3.7 – Representação esquemática dos pontos utilizados na calibração da coordenada de usuário 02.....	62
FIGURA 3.8 - Calibração do relógio comparador como ferramenta de trabalho do robô. ....	63
FIGURA 3.9 – Montagem dos parafusos M14 para apoio, nivelamento e encosto dos CP sobre a mesa.....	64
FIGURA 3.10 – Desenho esquemático do anteparo translúcido.....	65
FIGURA 3.11 – O alinhamento da mesa de trabalho com o painel. ....	66
FIGURA 3.12 – Verificação do alinhamento entre os pontos de referência do painel e da mesa de trabalho. ....	67
FIGURA 3.13 - Suportes para lasers: a) Tubo de proteção externa; b) Abraçadeira de fixação; c) Tirante rosqueado 3/16” para ajuste de altura; d) Garra de fixação; e) Sensor laser verde 5 mW classe 3A com temperatura máxima de trabalho de 50°C; f) Manta de fibra de vidro aluminodizada espessura 1 mm para proteção interna; g) Manta de fibra de vidro aluminodizada espessura 2 mm para proteção externa; h) Cabos elétricos; j) Esquema elétrica de alimentação dos sensores laser; i) Montagem do sistema de alimentação. ....	68
FIGURA 3.14 - Representação esquemática do anel segmentado soldado pelo Grupo DELP. ....	69
FIGURA 3.15 - Sistema de identificação dos CP.....	70
FIGURA 3.16 - Montagem dos corpos de prova.....	70
FIGURA 3.17 – Representação esquemática das distorções no sentido do eixo “X” e “Y”: ..	74
FIGURA 3.18 – Representação esquemática dos pontos de medição sobre os CP.....	75
FIGURA 3.19 – Marcação e localização dos pontos para marcação para os CP com uma e duas juntas: a) Foto ilustrativa da marcação; b) CP uma junta; c) CP duas juntas. ....	76

FIGURA 3.20 –Medição de planicidade utilizando o relógio comparador. ....	77
FIGURA 3.21 - Croqui para controle dimensional das dimensões externas dos corpos de prova. ....	78
FIGURA 3.22 - Croqui para controle dimensional dos biseis e das juntas soldadas. ....	79
FIGURA 3.23 – Medição dos pontos no <i>frame</i> de 0 min. do CV16 utilizando software Auto Cad. ....	80
FIGURA 3.24 – Localização do centro do região luminosa com escala de aumento de 10x. .	80
FIGURA 3.25 - Representação esquemática dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo em função das distorções angulares sentido do eixo “X” para os CP com uma junta. ....	82
FIGURA 3.26 - Representação esquemática dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo em função das distorções angulares sentido do eixo “X” para os CP com duas junta. ....	82
FIGURA 3.27 - Representação esquemática dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo em função das movimentações angulares sentido do eixo “Y” para os CP com uma junta.....	83
FIGURA 3.28 - Representação esquemática dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo em função das movimentações angulares sentido do eixo “Y” para os CP com duas junta.....	83
FIGURA 3.29 – Esquema para cálculo do deslocamento $Z_y$ em função da distorção $\theta_y$ .....	84
FIGURA 3.30 – Representação esquemática das relações trigonométricas para os cálculos de projeção teórica da posição final dos pontos luminosos refletidos no painel do anteparo: a) Deslocamento $X_n$ e $Z_n$ ; b) Angulo $\beta_n$ ; c) Reta $K_n$ ; d) Definição dos pontos em cada vértice. ....	86
FIGURA 4.1 – Posição de retirada das amostras. ....	89
FIGURA 4.2 - Macrografias das juntas em “V” e “X” soldadas com os parâmetros da TAB. 4.1. ....	89
FIGURA 4.3 – Macrografias das juntas em “V” e “X” soldadas com os parâmetros da TAB. 4.2 ....	90
FIGURA 4.4 - Cálculo da área da secção transversal das juntas. ....	91
FIGURA 4.5 – Sequência de soldagem dos cordões de solda nas juntas em e “X” e “V”......	91
FIGURA 4.6 – Corpos de prova soldados.....	93
FIGURA 7.1 - Vista frontal do SMCDS.....	124
FIGURA 7.2 - Detalhe 1 da vista frontal. ....	125

FIGURA 7.3 - Vista lateral direita do SMCDS.....	126
FIGURA 7.4 - Detalhe 3 da vista lateral direita. ....	127
FIGURA 7.5 - Vista de planta do SMCDS. ....	128
FIGURA 7.6 - Detalhe 2 da vista de planta. ....	129
FIGURA 7.7 - Detalhe de montagem dos batentes e niveladores sobre mesa de trabalho....	130
FIGURA 7.8 - Desenho de montagem dos corpos de prova. ....	133
FIGURA 7.9 - Desenho de preparação e usinagem dos corpos de prova. ....	134
FIGURA 7.10 – Medição do corpo de prova sobre a mesa de desempenho. ....	135
FIGURA 7.11 - Etapas 1 à 4 do procedimento experimental. ....	135
FIGURA 7.12 - Etapas 5 à 8 do procedimento experimental. ....	136
FIGURA 7.13 - Etapas 10 e 11 do procedimento experimental.....	136
FIGURA 7.14 - Etapas 12 à 17 do procedimento experimental.....	137
FIGURA 7.15 - Etapas 18 à 20 do procedimento experimental.....	138
FIGURA 7.16 - Etapas 21e 22 do procedimento experimental.....	138

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4.1- Valores médios de distorção angular para os corpos de prova tipo CV1 calculados a partir das três medições realizadas com diferentes tipos de instrumentos de medição. ....	95
GRÁFICO 4.2- Valores médios de distorção angular para os corpos de prova tipo CX1 calculados a partir das três medições realizadas com diferentes tipos de instrumentos de medição. ....	96
GRÁFICO 4.3- Valores médios de distorção angular para os corpos de prova tipo CV2 calculados a partir das três medições realizadas com diferentes tipos de instrumentos de medição. ....	97
GRÁFICO 4.4- Representação em três dimensões dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo – CV12. ....	98
GRÁFICO 4.5- Representação das retas da regressão linear e projeção teórica - CV12. ....	99
GRÁFICO 4.6- Evolução das distorções de soldagem monitorada com SMCDS versus valores médios das distorções angulares medidas pelos instrumentos de medição.....	99
GRÁFICO 4.7- Evolução das distorções de soldagem em função do tempo monitorada com o SMCDS para os corpos de prova tipo CV1.....	101
GRÁFICO 4.8 - Evolução das distorções médias de soldagem em função do tempo monitorada com SMCDS x valores de distorção medidos com instrumentos de medição para os corpos de prova tipo CV1. ....	102
GRÁFICO 4.9- Representação em três dimensões dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo – CX1. ....	104
GRÁFICO 4.10- Representação das retas da regressão linear e projeção teórica –CX11.....	105
GRÁFICO 4.11- Evolução das distorções de soldagem em função do tempo medidos com SMCDS – CX11. ....	106
GRÁFICO 4.12- Evolução das distorções de soldagem em função do tempo medidos com SMCDS para os corpos de prova tipo CV1.....	107
GRÁFICO 4.13 - Evolução das distorções médias de soldagem em função do tempo medidas	

com SMCDS x valores de distorção medidos com instrumentos de medição para os corpos de prova tipo CX1. ....	109
GRÁFICO 4.14- Representação em 3 dimensões dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo – CV21. ....	111
GRÁFICO 4.15- Representação das retas da regressão linear e projeção teórica – CV21....	111
GRÁFICO 4.16- Evolução das distorções de soldagem monitorada pelo SMCDS versus valores médios das distorções angulares medidas pelos instrumentos de medição – CV21.....	112
GRÁFICO 4.17- Evolução das distorções de soldagem em função do tempo monitorada com SMCDS para os corpos de prova tipo CV2.....	114
GRÁFICO 4.18 - Evolução das distorções médias de soldagem em função do tempo medidas com SMCDS x valores de distorção medidos com instrumentos de medição para os corpos de prova tipo CV2. ....	115
GRÁFICO 4.19- Comparação das distorções de soldagem para os três tipos de corpos de prova. ....	117

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Matriz de combinações de parâmetros - adaptado - (MURUGAN, et al., 2005). .....	40
TABELA 2.2 - Relação de parâmetros fixos e variáveis (ABELING, et al., 2014).....	44
TABELA 2.3 - Parâmetros de soldagem (LOCATELLI, 2014). ....	53
TABELA 2.4 - Casos de simulação (LOCATELLI, 2014).....	54
TABELA 4.1 - Parâmetros iniciais de soldagem.....	88
TABELA 4.2 – Parâmetros de soldagem ajustados.....	89
TABELA 4.3 – Monitoramento da temperatura logo após finalizado cada passe de solda.....	92
TABELA 4.4 – Intervalos de tempo durante o processo de soldagem e resfriamento. ....	92
TABELA 7.1 - Tabela de aferição de deslocamento do braço manipulador nos eixos “X” & “Y” (mm).....	131
TABELA 7.2 - Tabela de aferição da planicidade durante a movimentação do braço manipulador (mm). ....	131
TABELA 7.3 - Tabela de aferição de deslocamento do braço manipulador no eixo Z (mm). .....	132
TABELA 7.4 – Controle dimensional dos raios interno e externo para corpos de prova tipo CX1.....	139
TABELA 7.5 – Controle dimensional dos raios interno e externo para corpos de prova tipo CV2.....	139
TABELA 7.6 – Controle dimensional dos raios interno e externo para corpos de prova tipo CV1.....	140
TABELA 7.7 – Controle dimensional dos biseis e reforços de solda para corpos de prova tipo CX1.....	141
TABELA 7.8 – Controle dimensional dos biseis e reforços de solda para corpos de prova tipo CV2.....	141
TABELA 7.9 – Controle dimensional dos biseis e reforços de solda para corpos de prova tipo	

CV1.....	142
TABELA 7.10 – Controle dimensional das distorções de soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova tipo CV1 apoiados sobre a mesa de desempenho. ....	143
TABELA 7.11 – Controle dimensional das distorções de soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova tipo CX1 apoiados sobre a mesa de desempenho. ....	144
TABELA 7.12 – Controle dimensional das distorções de soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova tipo CV2 apoiados sobre a mesa de desempenho. ....	145
TABELA 7.13 – Monitoramento dos pontos de referência utilizando o relógio comparador e a FPM acoplados ao braço robótico para os corpos de prova tipo CV2.....	146
TABELA 7.14 – Monitoramento dos pontos de referência utilizando o relógio comparador e a FPM acoplados ao braço robótico para os corpos de prova CV1.....	147
TABELA 7.15 – Monitoramento dos pontos de referência utilizando o relógio comparador e a FPM acoplados ao braço robótico para os corpos de prova CX1.....	148
TABELA 7.16 – Controle dimensional das distorções de soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova tipo CV2 apoiados sobre a mesa de trabalho. ....	149
TABELA 7.17 – Controle dimensional das distorções de soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova tipo CV1 apoiados sobre a mesa de trabalho. ....	150
TABELA 7.18 – Controle dimensional das distorções de soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova tipo CX1 apoiados sobre a mesa de trabalho. ....	151
TABELA 7.19 –Valores médios de distorção medidos pelos diferentes instrumentos de medição para os corpos de prova tipo CV1.....	152
TABELA 7.20 – Valores médios de distorção medidos pelos diferentes instrumentos de medição para os corpos de prova tipo CX1.....	153
TABELA 7.21 – Valores médios de distorção medidos pelos diferentes instrumentos de medição para os corpos de prova tipo CV2.....	153
TABELA 7.22 – Monitoramento contínuo dos deslocamentos dos pontos refletidos no plano do anteparo para os corpos de prova tipo CV2.....	154
TABELA 7.23 – Monitoramento contínuo dos deslocamentos dos pontos refletidos no plano do anteparo para os corpos de prova tipo CV1.....	155

TABELA 7.24 – Monitoramento contínuo dos deslocamentos dos pontos refletidos no plano do anteparo para os corpos de prova tipo CX1.....	156
TABELA 7.25 – Resultados dos cálculos da projeção teórica do pontos refletidos no anteparo. ....	157
TABELA 7.26 - Monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para os corpos de prova tipo CV1. ....	158
TABELA 7.27 - Monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para os corpos de prova tipo CX1. ....	159
TABELA 7.28 - Monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para os corpos de prova tipo CV2. ....	159
TABELA 7.29 – Testes de hipóteses para comparação entre os valores médios de distorção verificados com os instrumentos de medição x SMCDS para os corpos de prova tipo CV1.	160
TABELA 7.30 - Testes de hipóteses para comparação entre os valores médios de distorção verificados com os instrumentos de medição x SMCDS para os corpos de prova tipo CX1.	162
TABELA 7.31 - Testes de hipóteses para comparação entre os valores médios de distorção verificados com os instrumentos de medição x SMCDS para os corpos de prova tipo CV2.	164
TABELA 7.32 - Testes de hipóteses para comparação entre a distorção media do CV11 e valor médio de distorção entre os CV12 à CV16 medidos com os instrumentos medição. ....	165
TABELA 7.33 - Testes de hipóteses para comparação entre o valor médio de distorção final verificado com o SMCDS e o valor médio de distorção verificado com instrumentos de medição - CX1.....	166
TABELA 7.34 - Testes de hipóteses para comparação entre o valor médio de distorção final verificado com o SMCDS e o valor médio de distorção verificado com instrumentos de medição - CV1.....	167
TABELA 7.35 - Testes de hipóteses para comparação entre o valor médio de distorção final verificado com o SMCDS e o valor médio de distorção verificado com instrumentos de medição - CV2.....	168
TABELA 7.36 - Testes de hipóteses para comparação do valor médio de distorção verificado com os instrumentos de medição para os diferentes tipos de corpos de prova: (a) CV1 x CV2; (b) CV1 x CX1B.....	169



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AWS	American Welding Society
CAD	Computer-Aided Design
CP	Corpo de prova
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
EPS	Especificação de Procedimento de Soldagem
FCAW	Flux Cored Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
LRSS	Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação
MAG	Metal Active Gás
MIG	Metal Inert Gas
FPM	Ferramenta de ponta para medição
SMCDS	Sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem
TCP	Tool Center Point
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

## NOMECLATURA

$a_r$	Altura do reforço de solda [mm]
Ar	Argônio
$A_t$	Aporte térmico [kj/mm]
$A_w$	Área real da secção transversal da solda [mm <sup>2</sup> ]
$A_{w1}$	Área teórica da secção transversal da solda [mm <sup>2</sup> ]
$b$	Espessura da junta [mm]
CO <sub>2</sub>	Dioxido de carbono
$d$	Abertura da raiz [mm]
F	Valor a ser testado por hipótese da distribuição de F de Fischer-Snedecor
F <sub>c</sub>	Valor tabelado crítico da distribuição de F de Fischer-Snedecor
gl	Grau de liberdade
$h_1$	Altura do primeiro ponto (eixo “Z”) [mm]
$h_2$	Altura do segundo ponto (eixo “Z”) [mm]
He	Hélio
$k_n$	Segmento entre os pontos inicial e final refletidos pelo sensor laser [mm]
$m_n$	Comprimento do segmento $\bar{a}_j$ [mm]
n	Número de indivíduos da amostra
L	Comprimento da junta [mm]
$l_{12}$	Distância entre o ponto 1 e 2 [mm]
$l_b$	Largura do bisel [mm]
$l_r$	Largura do reforço de solda [mm]
$l_{x12}$	Distância entre o primeiro e segundo ponto no sentido do eixo “X” [mm]
$l_{x_n}$	Distância entre dois pontos quaisquer no sentido do eixo “X” [mm]
$l_{y12}$	Distância entre o primeiro e segundo ponto no sentido do eixo “Y” [mm]
$l_y$	Distância do centro do sensor laser até o anteparo após soldagem [mm]
P <sub>x</sub>	Coordenada no eixo “X” dos pontos refletidos no plano do anteparo [mm]
P <sub>z</sub>	Coordenada no eixo “Z” dos pontos refletidos no plano do anteparo [mm]
S	Desvio padrão amostral
S <sup>2</sup>	Váriância da amostra
Sp	Desvio padrão ponderado pelos graus de liberdades
tc	Valor tabelado crítico da distribuição de “t” de Student

$t_s$	Valor calculado a ser testado por hipótese da distribuição “t” de Student
$t_{[n-1]}$	“t” de Student para grau de liberdade, subtraindo 1
$\bar{X}_n$	Média amostral
$X_n$	Deslocamento no sentido do eixo “X” ocasionado pela distorção $\theta_x$ [mm]
$Z_n$	Deslocamento no sentido do eixo “Z” ocasionado pela distorção $\theta_x$ [mm]
$Z_y$	Deslocamento no sentido do eixo “Z” ocasionado pela distorção $\theta_y$ [mm]
$\alpha$	Nível de significância
$\beta_n$	Ângulo de inclinação do segmento $\bar{a}_j$ [°]
$\delta$	Taxa de diluição [%]
$\eta$	Rendimento térmico [%]
$\theta_x$	Ângulo de distorção no sentido do eixo “X” [°]
$\theta_y$	Ângulo de distorção no sentido do eixo “Y” [°]
$\mu$	Média populacional
$\sigma$	Desvio padrão populacional
$\sigma^2$	Variância populacional

## RESUMO

Distorções em componentes soldados são alterações permanentes de forma e dimensões resultantes das deformações plásticas que ocorrem devido as tensões térmicas desenvolvidas durante o processo de soldagem. A fim de atender as tolerâncias dimensionais e geométricas das especificações de projetos é necessário o uso adequado sequências de soldagem, projetar peças com maiores dimensões, utilizar dispositivos de travamento, executar prolongadas operações de desempenho a quente e outros processos de fabricação como a usinagem, que aumentam significativamente os custos do processo de fabricação. Em função dos elevados custos com a mão de obra e a matéria prima para corrigir as distorções de soldagem, existe grande interesse das indústrias de bem de capital em uma melhor previsão e controle dessas distorções de soldagem. Baseado nessas premissas, o presente trabalho propõe uma metodologia para o acompanhamento dimensional com monitoramento contínuo das distorções ocorridas no processo de soldagem GMAW robotizado de três modelos em escala reduzida de anéis segmentados. Para o controle dimensional de geometria e planicidade são utilizados o sistema de coordenada cartesiana tridimensional do robô, um relógio comparador e um inclinômetro digital, antes e após o processo de soldagem. Para o monitoramento contínuo das distorções são utilizados sensores a laser montados em suportes apoiados sobre a superfície da peça e um anteparo translúcido onde os pontos de laser são projetados. Com a progressão da distorção durante a soldagem os feixes de laser se movimentam pelo anteparo proporcionalmente às deformações ocorridas na peça. Os movimentos dos pontos de lasers pelo anteparo são filmados e a discretização dessa filmagem permite a elaboração de gráficos que representam o comportamento do plano da peça durante a soldagem. Com estes resultados é possível conhecer os valores da distorção angular durante os vários instantes do processo. Cálculos estatísticos confirmam que o valor final da distorção angular verificado pelo sistema de monitoramento utilizando sensores a laser é igual ao valor médio da distorção angular verificado com os instrumentos de medição sendo este um excelente resultado em prol do controle de distorções em soldagem. Essa informação poderá ser utilizada, por exemplo, para realimentar a trajetória do robô permitindo que o mesmo faça correções durante a soldagem, minimizando assim, as distorções. Ou ainda, auxiliar de forma mais eficiente os softwares de simulação de soldagem na calibração experimental de modelos numérico-computacionais.

**Palavras-chave:** Distorções de soldagem, controle dimensional, monitoramento contínuo.

## ABSTRACT

Distortions in welded components are permanent shape and dimensions changes resulting from plastic deformation that occur due to thermal stresses developed during welding process. To meet the dimensional and geometrical tolerances of project specifications is necessary to use adequate welding sequences, locking devices, and be prepared to use hot straightening operations and other manufacturing processes such as machining, that greatly increase the cost of the manufacturing process. Because of these high costs with labor and raw material to fix the welding distortion, there is great interest of the industries in better predict and control of welding distortion. Based on these premises, this work proposed a methodology for a continuous dimensional monitoring of distortions occurred during GMAW procedure of three small-scale segmented rings models. For the geometry dimensional control and flatness the three-dimensional cartesian coordinate robot system, a dial and a digital inclinometer, before and after the welding process were used. For continuous monitoring of distortion, laser sensors, mounted on brackets supported on the work-piece surface and a translucent screen, where the laser spots were projected, were used. With the distortion progression during welding the laser spots move around the screen in proportion to deformation occurred in the work-piece. The lasers spot movements were then recorded and the discretization of the move allowed to develop graphics that represent the work-piece behavior during the welding. With these results it was possible to know the angular distortion values during different moments of the welding procedure. Statistical calculations confirm that the final value of angular distortion measured by the monitoring system using laser sensors is equal to the average value of angular distortion checked with measuring instruments. This was an excellent result in favor of welding distortion control. This information may be used, for example, to feed back the robot trajectory so that it makes corrections during welding, thus minimizing the distortion. It also can help the welding simulation software in the numerical-experimental calibration of computational models.

**Key words:** Welding distortion, dimensional control, continuous monitoring.

# 1 INTRODUÇÃO

No cenário atual de estagnação da economia brasileira, é ainda mais clara a necessidade, das indústrias de bens de capital, de reduzir os elevados custos com a mão de obra e a matéria prima gastas nas correções das distorções de soldagem (FIG. 1.1). Desta forma, é possível ampliar a margem de lucro, ou ainda, proporcionar uma redução no prazo e custo final para o cliente, garantido maior competitividade em qualidade e preço.

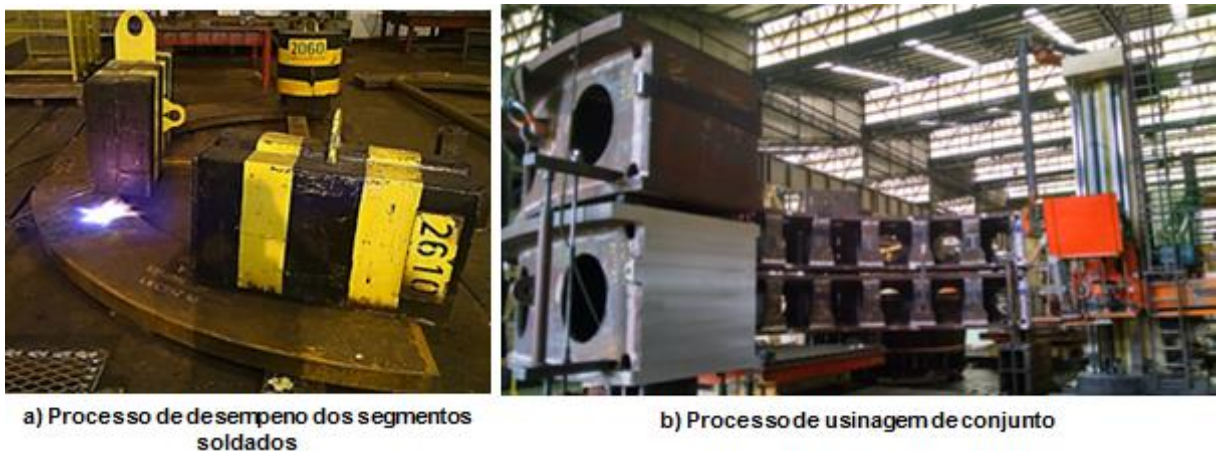


FIGURA 1.1 - Processos utilizados na correção das distorções de soldagem - cortesia DELP.

Para minimizar os efeitos das distorções de soldagem existem diferentes métodos e técnicas descritos na literatura técnico-científica como ASM Handbook (1993), AWS Welding Handbook (2001), Kou (2003), Kenndy (1979), Okumura (1982), entre outros. Vários destes métodos são praticados nos setores produtivos para controlar as distorções, entre os quais pode-se destacar: utilização de dispositivos de fixação para travar as peças; aplicação de pré-deformações opostas ao sentido das distorções para restrição e equilíbrio das distorções; montar componentes idênticos de forma geminada de tal forma que a soldagem possa ser balanceada em torno do eixo neutro; definir sequências de soldagem mais otimizadas que possibilitem a distribuição homogênea de calor sobre a peça; aplicação de pré e pós-aquecimento na soldagem.

O Grupo DELP, empresa referência no Brasil do mercado de bens de capital, especializada em caldeiraria pesada, e que tem como principal processo de fabricação a soldagem, sente de forma ainda mais acentuada os custos com as correções das distorções de soldagem. Este maior impacto se deve as construções soldadas de grande porte serem mais afetadas pelas distorções,

visto o grande volume de solda depositado nessas estruturas.

Atualmente, um dos projetos que o Grupo DELP está executando é a fabricação de estruturas soldadas de componentes de turbina hidroelétrica. Conforme apresentado na FIG. 1.2, estes componentes (tampas, rotores, flanges, rodas, etc.) são de grandes dimensões e em sua maioria apresentam geometria cilíndrica. Essas peças cilíndricas são construídas basicamente a partir de anéis fabricados pela soldagem de vários segmentos de chapas cortadas pelo processo de oxicorte em formatos circulares (FIG. 1.3). Os impactos das distorções de soldagem no processo produtivo destas peças de grandes dimensões são visualizados na FIG. 1.3d e FIG. 1.3e.

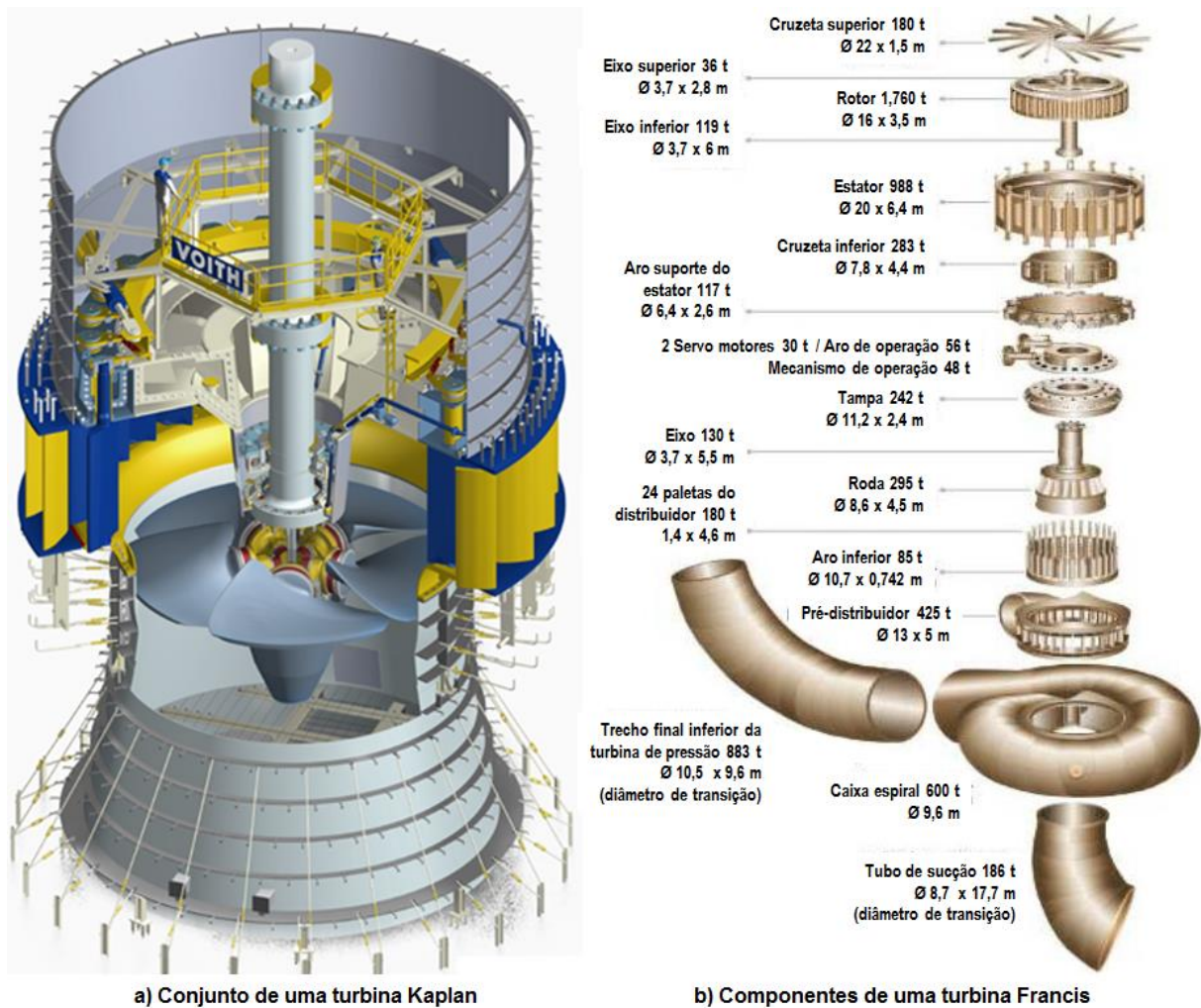


FIGURA 1.2 - Representação de turbinas hidroelétricas - adaptado - (VOITH HYDRO POWER).





FIGURA 1.3 - Estruturas e anéis segmentados em processo de fabricação – cortesia DELP.



Para a execução dos processos de correção destas distorções pode-se destacar os principais custos e riscos como sendo: tempo de retrabalho para executar o desempenho a quente; volume de gases gastos durante o processo de desempenho; possibilidade de alterações nas propriedades metalúrgicas da matéria prima por aquecimento excessivo; risco de perda do material; matéria prima adicional para correção da distorção durante a usinagem; aumento no tempo de usinagem do equipamento; multas contratuais por atrasos nos prazos de entrega, etc.

O monitoramento das distorções de soldagem nas indústrias, e até mesmos na maioria dos experimentos de soldagem realizados em laboratórios, acontecem basicamente por medições antes e após a soldagem. Desta forma, não é possível acompanhar a evolução das distorções durante o processo, limitando assim as ações preventivas, conseqüentemente, ocasionando maior número de ações corretivas.

Miranda (2006) e Rogana (1999) conseguiram monitorar o processo de evolução das distorções durante a soldagem de um cordão sobre pequenas chapas de aço engastadas de 6,35 mm. Para o monitoramento foi utilizado uma fonte de laser fixa na extremidade livre da chapa e projetando o feixe luminoso em um anteparo milimetrado. Com a deformação da chapa durante a soldagem o feixe luminoso desloca-se sobre o papel milimetrado permitindo o acompanhamento contínuo das distorções.

Com o crescimento dos métodos de simulação computacional de manufatura existem diferentes trabalhos na literatura científica como Araújo (2012), Locatelli (2014), Amaral (2004), Liang, *et al.* (2005), que visam a previsão mais eficiente e eficaz das tensões residuais e distorções em soldagem por meio da análise pelo método de elementos finitos. A simulação computacional de soldagem é sem dúvida uma ferramenta indispensável para inovação de processos de soldagem, estruturas e materiais. Entretanto, em todos os trabalhos analisados de simulação numérica, em que havia validação experimental, o monitoramento das distorções de soldagem durante os testes também ocorreu apenas por medições antes e após a soldagem. Ou seja, apesar do modelo numérico prever as evoluções das distorções ao longo do processo de soldagem, esta informação não está sendo validada de forma contínua nos testes experimentais.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo geral aperfeiçoar e validar a metodologia de monitoramento contínuo de distorções em soldagem utilizando sensores a lasers que foi utilizada por Miranda (2006) e Rogana (1999) em seus trabalhos. Para verificação experimental

foi realizada a soldagem de anéis segmentados em escala reduzida, com características semelhantes aos fabricados pelo Grupo DELP, assim será possível avaliar a viabilidade e confiabilidade desse método para aplicação nos setores fabril e laboratórios de soldagem. A evolução das distorções e deformações de soldagem será útil para definição dos métodos de controle empregados na redução dos custos de fabricação.

Portanto, este trabalho tem como objetivos específicos:

- Definir o modelo em escala do anel segmentado considerando algumas variações na forma construtiva que proporcionem diferentes valores de distorções para avaliação do comportamento do sistema de monitoramento contínuo de distorções de soldagem;
- Montar um sistema de monitoramento contínuo de distorções de soldagem com sensores lasers, utilizando o sistema de coordenada cartesiana tridimensional de um manipulador robótico;
- Realizar soldagem robotizada dos modelos em escala reduzida, observando os parâmetros utilizados na fabricação dos anéis segmentados no Grupo DELP;
- Realizar controle dimensional das distorções de soldagem antes e após soldagem utilizando instrumentos de medição;
- Realizar o acompanhamento da evolução das distorções de soldagem utilizando o sistema de monitoramento contínuo com sensores a lasers;
- Comparar os resultados das distorções para as diferentes formas construtivas do anel segmentado;
- Comparar os resultados obtidos entre as diferentes formas de monitoramento das distorções soldagem;
- Analisar estatisticamente a eficiência do sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Tensões residuais e distorções

Nos processos de soldagem por fusão, a junta a ser soldada precisa ser aquecida até a sua fusão localizada por uma fonte de calor. Neste processo trabalha-se com fontes de calor de elevadas temperaturas concentradas em pequenas áreas, resultando em uma elevada intensidade calor, ao qual, ao ser deslocada ao longo da peça, resulta na formação da solda pela fusão e solidificação localizadas (MODENESI, et al., 2012).

O processo de transferência de calor da fonte para uma junta produz uma distribuição não-uniforme de temperatura na solda e nas regiões adjacentes que, além de favorecer o processo de fusão localizado do material, pode também ocasionar efeitos indesejáveis, como por exemplo, o surgimento de tensões residuais (MODENESI, et al., 2012).

As tensões residuais que surgem numa junta de topo simples, em função de deformações plásticas não uniforme, podem ser classificadas segundo sua direção como; tensões longitudinais, tensões transversais e tensões transversais normais ao plano da chapa, encontradas no interior da chapa de grandes espessuras (FIG. 2.1) (ARAÚJO, 2012).

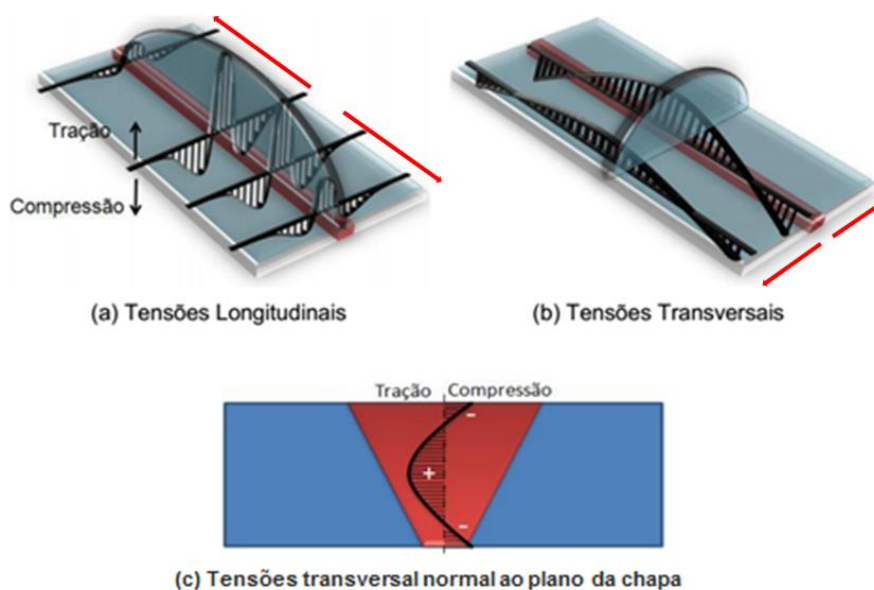


FIGURA 2.1 - Distribuição de tensões (ARAÚJO, 2012).

Durante o alívio destas tensões residuais surgem as distorções de soldagem que são um grave problema para construções soldadas. As distorções são deformações dimensionais permanentes que ocorrem na estrutura e representam quantitativamente o afastamento da superfície real em relação à superfície idealizada durante a etapa de concepção da estrutura (AMANTE, 2006).

A extensão das distorções depende das propriedades térmicas e mecânicas do material, em particular do coeficiente de expansão, condutividade térmica, limite de escoamento e módulo de elasticidade (MODENESI, et al., 2012). Okumura (1982) classificou as distorções em seis tipos básicos (FIG. 2.2).

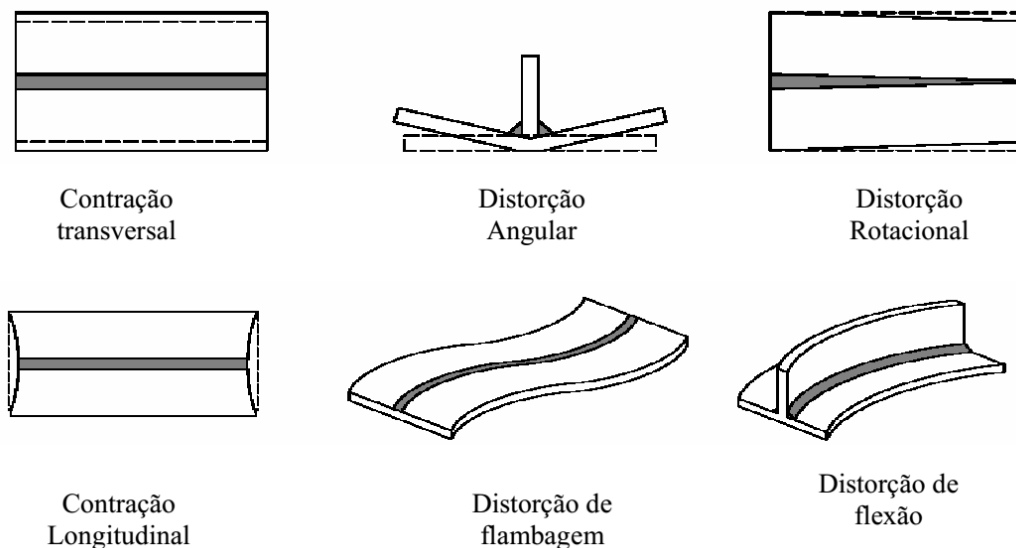


FIGURA 2.2 - Tipos de distorções (AMANTE, 2006).

Em juntas simples, três tipos básicos de distorção podem ocorrer; contração transversal, contração longitudinal e distorção angular. Estas podem causar distorções mais complexas como, por exemplo, o dobramento e torção de vigas e distorções por flambagem em peças de pequena espessura. Durante a soldagem de componentes livres de pontos de solda ou dispositivos de fixação, estes podem sofrer distorção rotacional (MODENESI, et al., 2012).

A previsão e o monitoramento dessas distorções durante o processo de fabricação de estruturas soldadas são necessários para que seja possível reduzi-las sem a execução de grandes retrabalhos. Portanto, este capítulo realiza uma revisão bibliográfica sobre os principais sistemas de medição utilizados para medir as distorções na fabricação de estruturas soldadas e

resume alguns importantes trabalhos que estudaram o controle, o monitoramento e a previsão das distorções em soldagem. O resumo de cada trabalho procura ressaltar o procedimento experimental utilizado na medição das distorções de soldagem.

## 2.2 Sistemas de medições utilizados para medir distorções em estruturas soldadas

Nesta pesquisa, foi realizado um levantamento principais tipos de sistemas de medições utilizados atualmente, nas industriais de fabricação de estruturas soldadas e nos laboratórios de pesquisa em soldagem, para medir as distorções em soldagem. Além de sistemas mais complexos, foram identificados sistemas simples de medição denominados neste trabalho por instrumentos de medição como; prumo, trena, escala, paquímetro, nível de bolha e a laser, inclinômetro.

### 2.2.1 *Laser track*

O *Laser tracker* é um equipamento que utiliza um feixe laser para a obtenção de coordenadas 3D. Este equipamento fornece a medição de um alvo, apresentado na FIG. 2.3a, que pode ser movido em qualquer posição que encontre a linha do feixe laser oriundo da unidade base (AMANTE, 2006). Uma das principais vantagens deste sistema e a medição de objetos acima de 100 m de comprimento com precisões a partir de 5 $\mu$ m por metro. A FIG. 2.3b apresenta uma medição utilizando o *laser track*, este equipamento é largamente utilizado nos processos de fabricação de caldeiraria e usinagem de peças de grande porte.

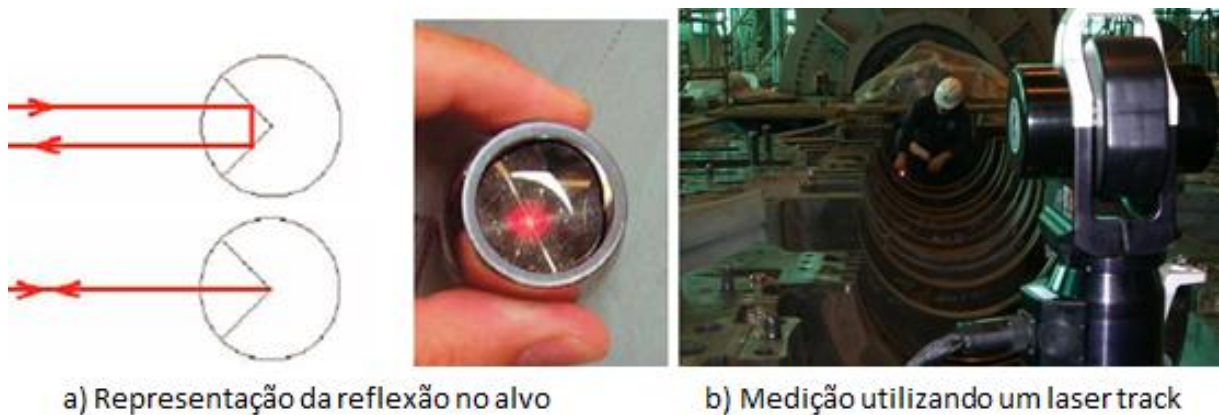


FIGURA 2.3 - Esquema de um laser track - adaptado - (AMANTE, 2006).

### 2.2.2 3D laser scanning

O *laser scanning* com sistema LIDAR (*Light Detection And Ranging*) mede a distância através do tempo de retorno do pulso laser (*Time of Flight*). Nesse sistema de varredura, o instrumento emite milhares de pulsos laser por segundo. Este instrumento mede as distâncias, a intensidade da energia refletida pelo objeto e os parâmetros de atitude do feixe (azimute e elevação), que são coordenadas polares do ponto, em relação ao referencial do laser (FIG. 2.4a). A partir destes dados é possível calcular as coordenadas cartesianas 3D. O resultado final do processo de medição e processamento é uma nuvem de pontos. O equipamento Riegl LPM-25HA-C, apresentado na FIG. 2.4b, possui uma precisão de 0,2 mm por metro e capta uma nuvem de 1000 pontos por segundo. Este tipo de equipamento tem sido utilizado na construção naval (AMANTE, 2006).

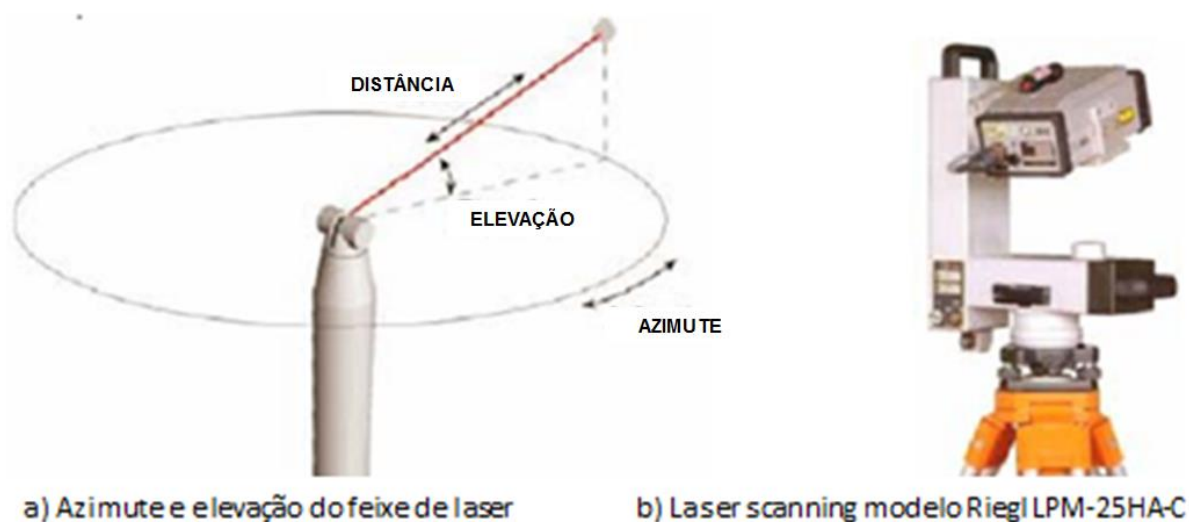


FIGURA 2.4 - Esquema de um laser scanning - adaptado - (AMANTE, 2006).

### 2.2.3 Teodolito e nível ótico

O teodolito é um instrumento óptico de medição de posições relativas tendo como principal finalidade a medida de ângulos horizontais e verticais. Indiretamente, pode-se medir distâncias que, relacionadas com os ângulos verticais, possibilita obter tanto a distância horizontal entre dois pontos quanto a diferença de nível entre os mesmos. O teodolito é composto, basicamente, por um telescópio que pode ser girado em torno de dois eixos perpendiculares graduados, um horizontal e outro vertical (FIG. 2.5a), níveis para ajuste do conjunto montado sobre um tripé. Usando o telescópio para mirar em uma régua graduada é possível realizar a medida de ângulo

entre dois pontos. Para determinar as coordenadas no plano e a altura é necessário realizar cálculos trigonométricos (ZILKHA, 2014).

Existem ainda os teodolitos eletrônicos, FIG. 2.5d, onde a medida dos ângulos é baseada na leitura digital de um círculo codificado, realizada através de feixe de luz, e os valores medidos são apresentados diretamente em um visor de cristal líquido. Além de apresentar maior precisão, o equipamento eletrônico realiza os cálculos trigonométricos necessários para determinar as medidas lineares (ZILKHA, 2014). A FIG. 2.5 apresenta ainda o modelo de teodolito mecânico (b) e o esquema de medição para um teodolito (c).

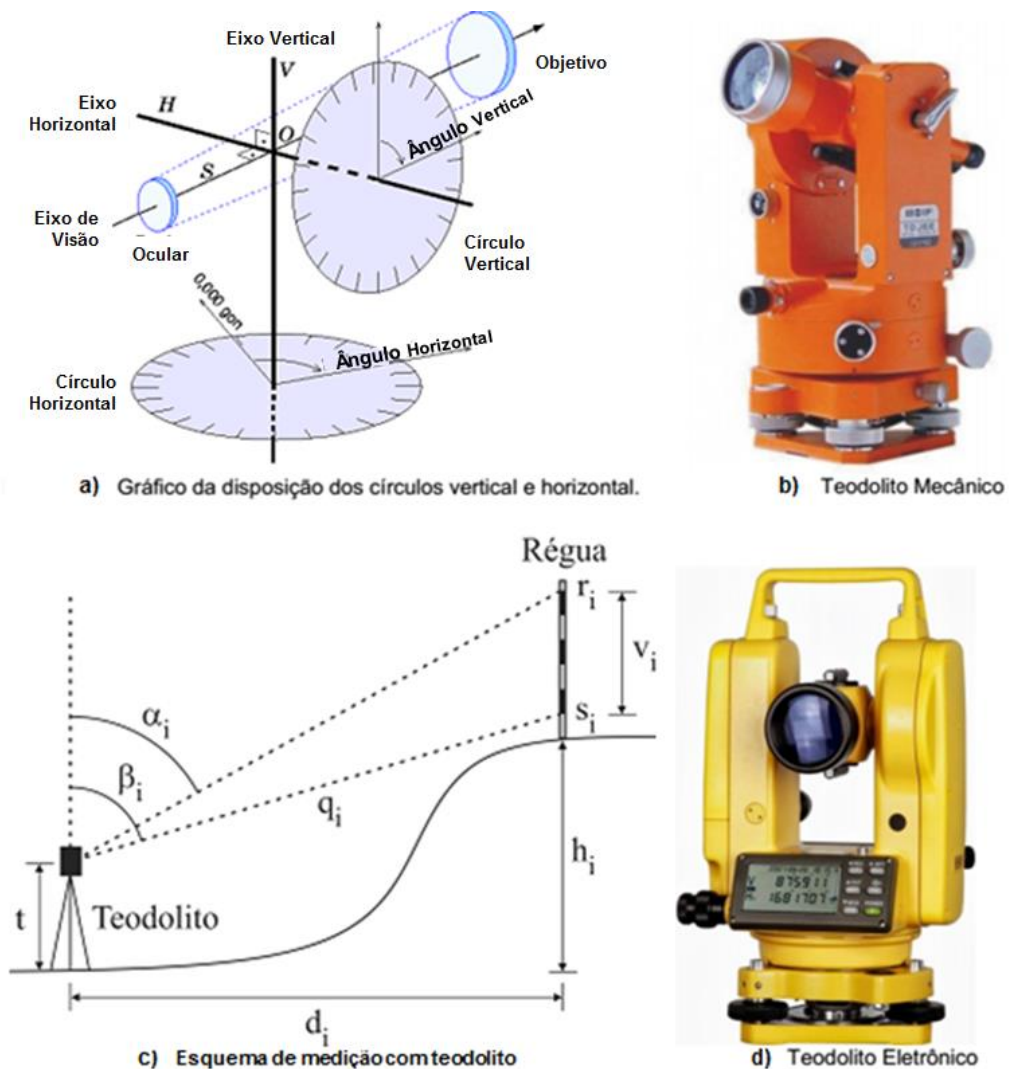


FIGURA 2.5 - Representação ilustrativa e esquemática de teodolito.

Os níveis óticos são bem mais simples que os teodolitos, sendo constituídos basicamente de uma base geral onde se situam os parafusos de ajuste, a luneta, o nível tubular ou esférico para

ajuste do conjunto montado sobre um tripé conforme apresentado na (FIG. 2.6). Trata-se de uma luneta de aumento com um centro focal e um retículo gravado na outra extremidade com três fios, médio, inferior e superior. Com o aparelho nivelado faz-se uma leitura dos fios na mira graduada em dois pontos distintos, por meio das diferenças entre as leituras de fio, encontra-se a diferença de altura entre os dois pontos conforme apresentado na (FIG. 2.6FIGURA 2.6c) (FERRAZ, et al.). O grupo DELP utilizam o teodolito e nível ótico como principais instrumentos de medição para controle dimensional de distorções em estrutura soldadas.

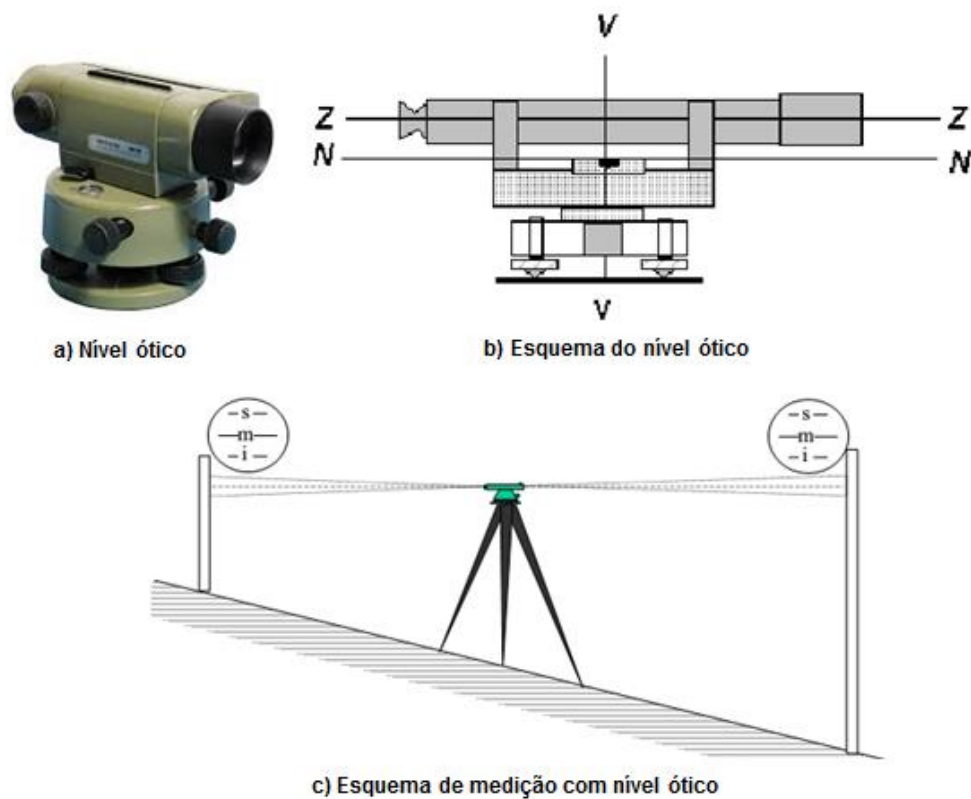


FIGURA 2.6 - Representação ilustrativa e esquemática do nível ótico.

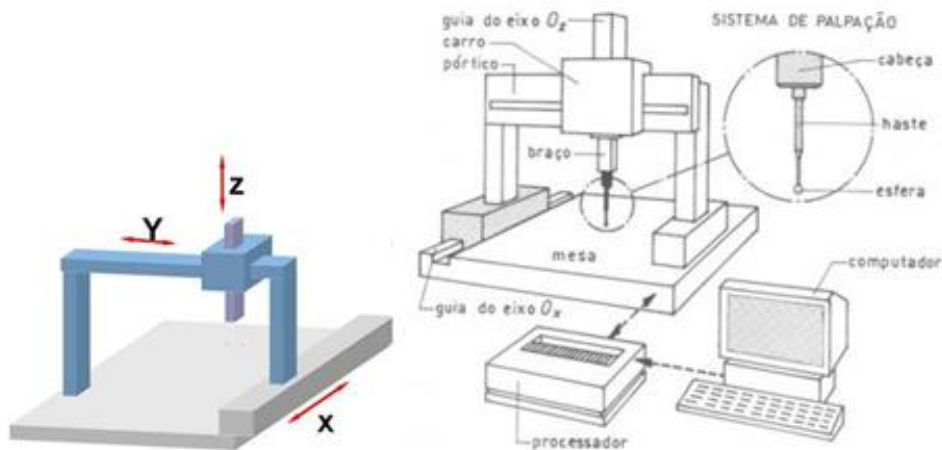
#### 2.2.4 Sistemas de medição por coordenadas

As máquinas de medir por coordenadas ou máquinas de medição tridimensional, são sistemas eletromecânicos que adquirem coordenadas cartesianas de pontos sobre a superfície de uma peça rígida relacionando as coordenadas do sensor com a peça a um referencial conhecido do sistema (BEREZA, et al., 2007). A FIG. 2.7a apresenta um esquema de um sistema de medição tridimensional. As máquinas de medir por coordenadas podem ser divididas basicamente em três tipos: tipo pórtico (FIG. 2.7b), tipo braço (FIG. 2.7c) e tipo coluna (FIG. 2.7d).



As máquinas do tipo pórtico ou coluna são estações fixas de trabalho, montadas em uma estrutura preparadas exclusivamente para recebê-la. São utilizadas principalmente para medição de peças com alta precisão e complexidade geométricas, como protótipos, moldes, produção seriada na indústria automobilística. Porém, não é raro encontrar experimentos de soldagem em laboratórios que utilizam esses equipamentos para medição das distorções.

Os braços de medição são estações moveis de trabalho, com grande aplicabilidade em medições no chão de fábrica e medições em peças de grandes dimensões com uma incerteza de medição na faixa 0,02 mm.



a) Esquema de uma máquina de medição tridimensional



b) Tipo pórtico



c) Tipo coluna



d) Tipo braço

FIGURA 2.7 - Tipos de máquina de medição tridimensional.

### 2.3 Monitoramento das distorções de soldagem

Existem diversos trabalhos que estudam a influência dos parâmetros de soldagem, restrições externas, tipos de juntas, resistência de material, etc., nos valores de distorções ocasionadas pelo processo de soldagem, através do monitoramento direto ou indireto destas distorções.

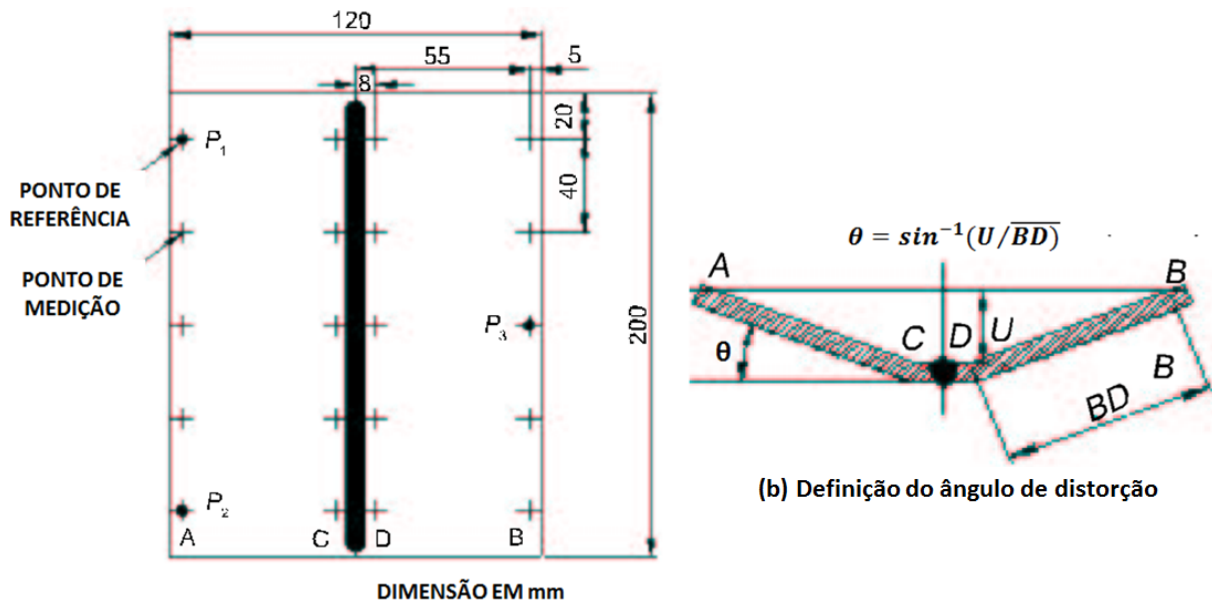
Rogana *et al.* (1999) apresentaram um projeto de um dispositivo capaz de monitorar distorções e tensões térmicas durante uma operação de soldagem. O dispositivo foi projetado com atuadores, sensores de carga e sensores de deslocamento, e é capaz de monitorar a evolução das deformações macroscópicas e das forças produzidas pelas tensões térmicas, devido a operações de soldagem, em diferentes pontos de um corpo de prova. Além disto, o dispositivo é capaz de simular carregamentos externos de maneira controlada.

Afim de verificar a viabilidade da utilização de sensores localizados em pontos afastados do cordão de solda no dispositivo, testes experimentais de soldagem de cordões sobre chapa foram realizados, com fontes de laser fixadas na extremidade livre de chapas engastadas de aço baixo carbono (FIG. 2.8). Para monitorar a distorção angular foram utilizadas fontes de laser fixadas em posições paralelas e afastadas do cordão de solda. As distorções foram acompanhadas ao longo do tempo posicionando uma folha de papel milimetrada afastada das fontes de laser, e marcando-se os pontos sobre esta folha durante e após a realização do cordão de solda.

O processo de soldagem utilizado foi o GMAW com arame tipo AWS ER 70S-6, diâmetro de 0,8mm. Para permitir a comparação entre os testes, mantiveram-se inalterados os parâmetros de soldagem: corrente de  $148 \pm 2A$ ; tensão de soldagem de 22,6V; gás de proteção 20% CO<sub>2</sub> e 80% Ar com vazão de 18 l/min; velocidade de soldagem de 2,13 mm/s; *stick out* de 9,5mm. A abertura do arco ocorreu no ponto base, conforme apresentado na FIG. 2.8, e a extinção do arco ocorreu após 35 segundos do início da soldagem.

Os ensaios experimentais mostraram que é possível monitorar as deformações em chapas submetidas a ciclos térmicos devido a operações de soldagem, através dos dados coletados por sensores de deslocamento em pontos afastados do cordão de solda.





(a) Locais de medição sobre o corpo de prova

FIGURA 2.10 - Esquema de medição da distorção - adaptado - (CHENG, et al., 2005).

A distorção angular é então calculada a partir da diferença de altura e a distância entre os pontos (FIG. 2.10b). Foi utilizado o processo de soldagem GTAW com alimentação automática de arame tipo AWS ER 5356, diâmetro de 1,6 mm e velocidade de alimentação de 400 a 440 mm/min. Foram utilizados corrente de 220A, gás de proteção 30% He e 70% Ar com vazão de 10 l/min e velocidade de soldagem de 340 mm/min.

Os resultados experimentais demonstraram que, quando o ângulo do chanfro é igual a  $0^\circ$ , o nível de distorção angular dos corpos de prova com restrição pode exceder os corpos de prova sem restrição. Além disso, quando o ângulo dos chanfros é  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ou  $90^\circ$ , as soldagens com restrições apresentam menores distorções angulares. A distorção angular aumentou com o aumento do ângulo do chanfro, porém tende a diminuir quando o ângulo do chanfro é igual a  $60^\circ$ , aumentado novamente quando o ângulo do chanfro é igual a  $90^\circ$ . Foi observado também que o limite de escoamento do material afeta a distorção angular, sendo que, a distorção é diretamente proporcional ao limite de escoamento do material.

Através de um delineamento experimental, Murugan *et al.* (2005) desenvolveram modelos matemáticos para estabelecer uma relação o número de passes, intervalo de tempo entre passes, taxa de alimentação do arame e a distorção angular de soldagem de chapas de aço estruturais multipasses. O planejamento adotado foi do tipo composto central rotacional de três fatores e cinco níveis, que consiste em um grupo de procedimentos estatísticos e matemáticos, que

podem ser usados no estudo das inter-relações entre uma ou mais respostas (variáveis dependentes) com inúmeros fatores (variáveis independentes).

As soldagens foram realizadas pelo processo GMAW com gás de proteção CO<sub>2</sub> e arame AWS ER70S-6 de diâmetro de 1,2 mm. Para garantir uma velocidade de soldagem constante foi utilizado um dispositivo de deslocamento. Os corpos de provas são de chapa estrutural nas dimensões de 25x150x300 mm. A FIG. 2.11 apresenta as seqüências de soldagem e detalhamento do chanfro. Os corpos de prova foram montados e travados com pontos de solda sendo a soldagem realizada livremente. A distorção foi medida após a soldagem utilizando um paquímetro traçador de altura.

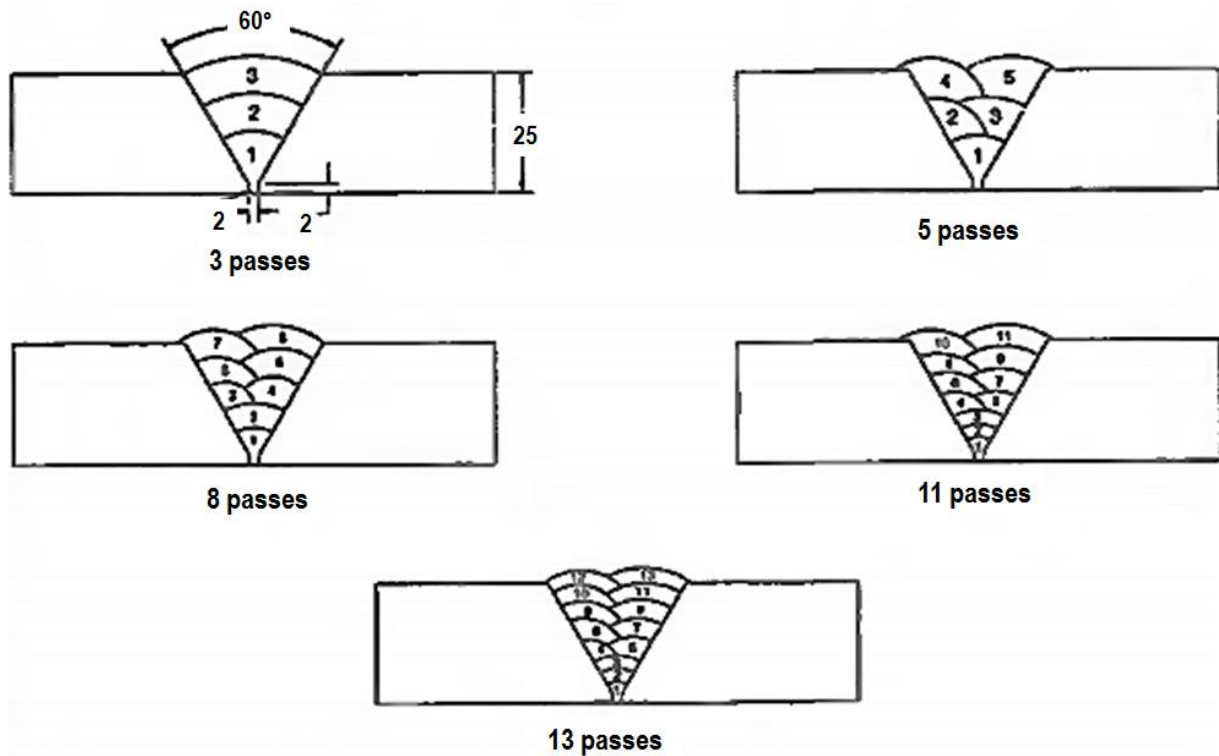


FIGURA 2.11 - Seqüência de soldagem e detalhamento do chanfro (MURUGAN, et al., 2005).

Os experimentos foram realizados de forma aleatória de acordo com a TAB. 2.1 para eliminar a possibilidade de erros sistemáticos. Os valores de distorções medidos no experimento para cada corpo de prova também estão apresentados nesta mesma tabela.

TABELA 2.1 - Matriz de combinações de parâmetros - adaptado - (MURUGAN, et al., 2005).

Parâmetros de processo	Nomeclatura	Limites				
		-1,682	-1	0	1	1,682
Tempo entre passes [min]	$I_t$	6,6	10	15	20	23,4
Número de passes	$N$	3	5	8	11	13
Taxa de alimentação do arame [m/min]	$F$	4,2	4,5	5	5,5	5,8

**Matriz de combinações e valores de distorções mesurados**

S. No.	$I_t$	$N$	$F$	$\alpha$ (ângulo)
1	-1	-1	-1	6.37
2	+1	-1	-1	6.23
3	-1	+1	-1	8.92
4	+1	+1	-1	8.45
5	-1	-1	+1	5.80
6	+1	-1	+1	5.68
7	-1	+1	+1	8.40
8	+1	+1	+1	7.59
9	-1.682	0	0	7.82
10	+1.682	0	0	7.24
11	0	-1.682	0	5.91
12	0	+1.682	0	9.50
13	0	0	-1.682	8.05
14	0	0	+1.682	6.89
15	0	0	0	7.76
16	0	0	0	7.70
17	0	0	0	7.59
18	0	0	0	7.53
19	0	0	0	7.70
20	0	0	0	7.12

Os resultados foram analisados por meio de software *Quality America — DOE PC TV*, sendo utilizada uma análise de variância Anova para estimar os parâmetros estatísticos e a previsão do modelo matemático apresentado na EQ. (2.1).

$$\theta = 7,552 - 0,184t + 1,122N - 0,326F - 0,95t^2 - 0,113F^2 - 0,127tN \quad (2.1)$$

Estes modelos desenvolvidos são muito úteis para determinar quantitativamente a distorção angular, pois essa previsão permite uma tomada de decisão mais eficaz nas formas de controle da distorção durante a soldagem. Em geral a distorção angular diminui para um menor número de passes de solda, o aumento do intervalo entre passes de solda e o aumento da velocidade de alimentação do arame. O número de passes é o parâmetro que apresentou maior influencia na distorção angular.

Coraini *et al.* (2010) analisou como as situações rotineiras utilizadas na soldagem robotizada de alumínio podem influenciar nas distorções angulares deste material, sem comprometer a integridade mecânica da junta soldada e com confiabilidade estatística. Para isso, foram realizados testes com variações de tecimento, do tipo de chanfro e do sentido de conformação da chapa em relação ao cordão de solda, mantendo os demais parâmetros de soldagem fixos.

Os corpos de prova foram construídos conforme apresentado na FIG. 2.12. A soldagem foi realizada com o processo robotizado GMAW pulsado com arame tipo AWS ER 5356, diâmetro de 1,2 mm e gás de proteção 100% Ar. Foram aplicados três tipos de tecimento; sem tecimento, zig-zag e vai-vem, ao longo do comprimento da solda, em juntas de topo montadas sem chanfro e com chanfro de 60°, dispostas tanto transversais quanto longitudinais ao sentido de conformação da chapa.

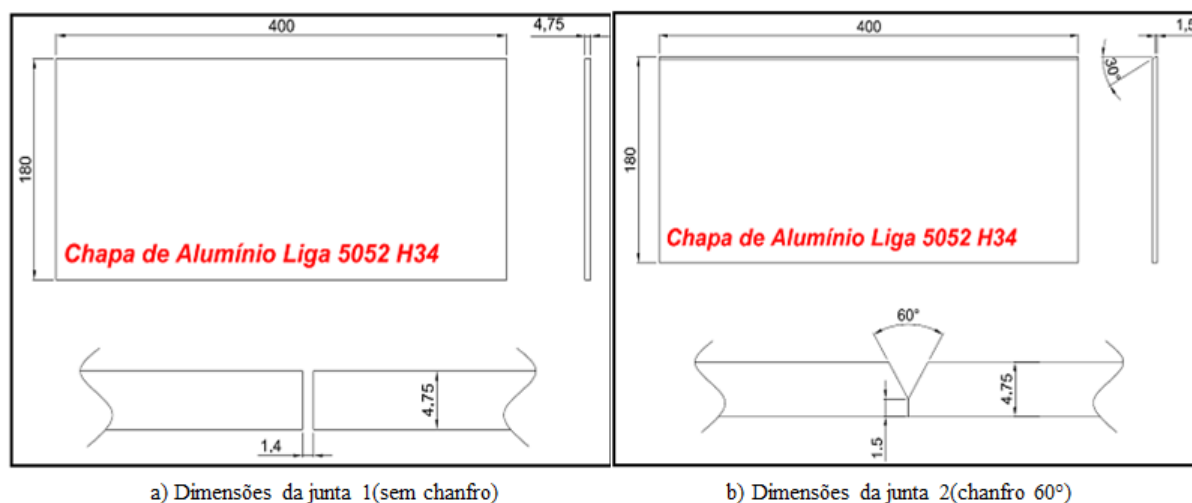


FIGURA 2.12 - Configuração dos corpos de provas – adaptado - (CORAINI, et al., 2010).

Para medir a distorção, pontos foram demarcados com distâncias de 15 mm, um em relação ao outro, ao longo do perímetro dos corpos de provas. Com um braço tridimensional, foi medida a altura destes pontos em relação a um plano padrão tirado no dispositivo (FIG. 2.13).

Após coletados as amplitudes das distorções, comparou-se estatisticamente as distorções entre os tipos de tecimento e os sentidos de laminação da chapa em relação ao cordão de solda, nos dois tipos de juntas testadas. O software Excel 2007 foi utilizado para tal finalidade, em específico as ferramentas de Análise de Dados Anova.



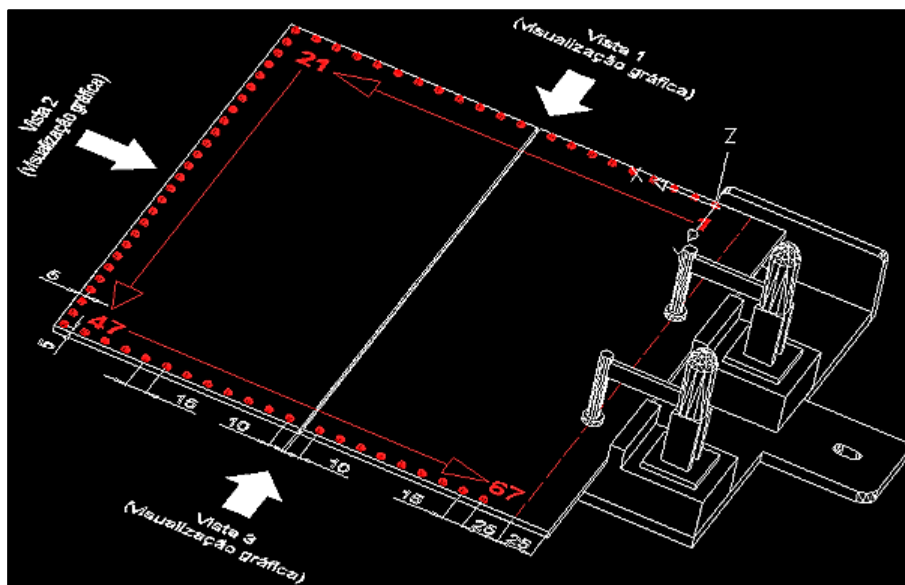


FIGURA 2.13 - Esquema de sequência de medição dos pontos (CORAINI, et al., 2010).

O sentido de conformação da chapa em relação ao cordão de solda originou diferença estatística significativa nas amplitudes das distorções da junta sem chanfro, sendo os valores médios dessas amplitudes menores que os encontrados na junta com chanfro de  $60^\circ$ . Não se evidenciou diferença estatística significativa entre as amplitudes das distorções nos tipos de tecimento em nenhuma das duas juntas.

Yang *et. al.* (2014) conduziram um estudo experimental em laboratório sobre o efeito da resistência do material, aporte térmico ( $A_t$ ) e espessura do material na contração e distorção da soldagem de 44 painéis em escala reduzida. Os painéis foram construídos utilizando quatro tipos de aços, sendo três de alta resistência (HSLA80, HY80 e HY100) e um aço estrutural de baixa resistência (ABS Grau DH36). As soldagens foram realizadas em ambos os lados dos painéis utilizando o processo FCAW, gás de proteção 75% Ar e 25%  $\text{CO}_2$ , arame AWS E81T1-Ni1MJDH4 para os aços DH-36, HSLA 80 e HY80 e AWS E111T1-K3M para o aço HY100.

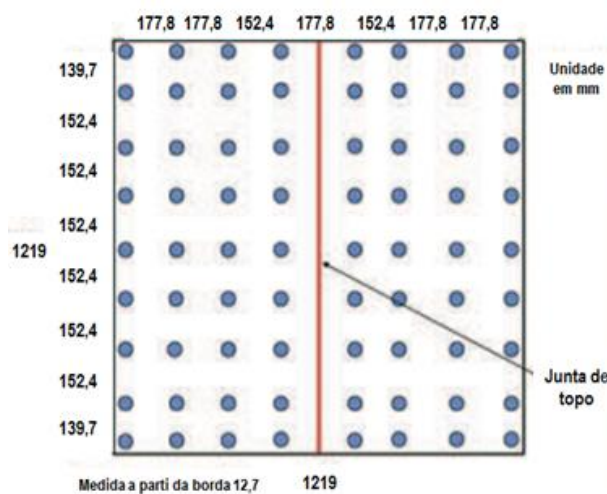
A FIG. 2.14a apresenta uma matriz de configuração experimental para cada corpo de prova. Todos os corpos de provas foram soldados com restrição externas através do dispositivo apresentado na A FIG. 2.14c. Após a soldagem as fixações serão retiradas somente após o corpo de prova atingir uma temperatura de  $38^\circ\text{C}$ . Para mensurar as distorções e contrações foram realizadas três medições em 72 pontos na face de cada corpo de prova de utilizando um braço de medição 3D. A disposição dos pontos na face dos painéis está apresentada na FIG. 2.14b.



Após a análise dos resultados pode-se observar que o aumento do aporte térmico proporciona o aumento da distorção e da contração de soldagem para todos materiais. Para um mesmo aporte térmico o aumento da espessura diminui a distorção e a contração. Os aços de alta resistência (HSLA-80, HY-80 e HY-100) apresentam menores valores de distorção e contração do que o aço estrutural (DH -36) para um aporte térmico normal. Para um aporte térmico elevado (maior que 2 kJ / mm), o aço HSLA- 80 apresentou valores de distorção e contração semelhantes ao do aço DH-36.

MATERIAL	ESPESSURA (mm)	At (kJ/mm)	JUNTA	QTD.	DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA E DO CHANFRÓ DUPLO V
HSLA80	4,76	1,14	Topo Sem chanfro	3	
		1,57		3	
		2,09		3	
	6,35	1,14	Topo Sem chanfro	3	
		1,69		5	
		2,13		3	
	9,53	1,65	Topo Duplo V <sup>1</sup>	3	
		2,2		3	
		2,56		3	
DH36	6,35	1,14	Topo Sem chanfro	3	
		1,65		3	
		2,09		3	
HY80	6,35	1,65	Topo sem chanfro	3	
HY100	6,35	1,65	Topo sem chanfro	3	

a) Tabela de configuração dos 44 corpos de prova



b) Localização do pontos de medição



c) Sistema de fixação dos corpos de prova para soldagem

FIGURA 2.14 - Configuração experimental - adaptado - (YANG, et al., 2014).

O estudo de Abeling *et al.* (2014) teve como objetivo apresentar os resultados de distorções geradas durante o processo de soldagem em aço inoxidável austenítico de forma experimental comparando quatro parâmetros: espessura da chapa, velocidade de soldagem, tensão e quantidade de pontos de travamento na peça conforme apresentado na TAB. 2.2, em um total de 81 corpos de provas.

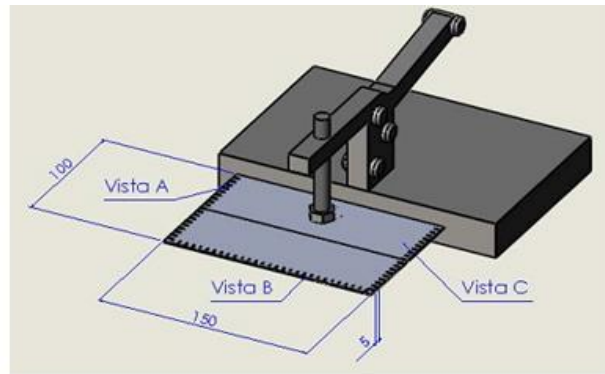
TABELA 2.2 - Relação de parâmetros fixos e variáveis (ABELING, et al., 2014).

Parâmetros Variáveis		Parâmetros Fixos	
Espessura do material	1,0 ; 1,5 ; 2,0 (mm)	Distância entre eletrodo e material	2 (mm)
Velocidade de solda	8,0 ; 11,0 ; 14,0 (mm/s)		
Corrente	80 ; 100 ; 120 (Amperes)	Vazão do gás	15 (litros/min)
Quantidade de pontos	2 ; 3 ; 4 (unidade)		

Os testes foram realizados com processo de solda TIG, com polaridade direta, utilizou-se gás 100% Ar, eletrodos de tungstênio, em chapas de aço inox austenítico AISI 304 com dimensões 50 x 150 mm, e para ter um avanço contínuo, utilizou-se uma mesa de avanço automático. Após os corpos de prova serem ponteados, preparou-se a bancada para realizar a primeira parte das medições, onde foram demarcados pontos nas arestas superiores da chapa, com uma distância de 5 mm entre eles. Para facilitar determinou-se que seriam demarcados os pontos em 3 vistas, sendo que na vista restante seria utilizada para a fixação (FIG. 2.15a).

A medição foi feita a partir de fotos das 3 vistas de cada corpo de prova, em um total de 243 fotos da posição inicial. Como as peças foram fixadas em apenas um ponto, manteve-se a câmera na mesma posição para que a fotos permanecessem do mesmo tamanho, facilitando e assim o registro dos dados, pois cada peça tem 73 pontos de medição. Este mesmo procedimento foi adotado após a soldagem, totalizando mais 243 fotos da posição final.

Utilizando o software *Solidworks*, conforme FIG. 2.15b, mediu-se a distância inicial, e a distância final após soldagem. A análise das peças através de diferença de cota antes e após soldagem, mostra semelhanças no perfil em que os corpos de prova sofreram após o processo.



a) Posicionamento dos corpos de provas e suas vistas

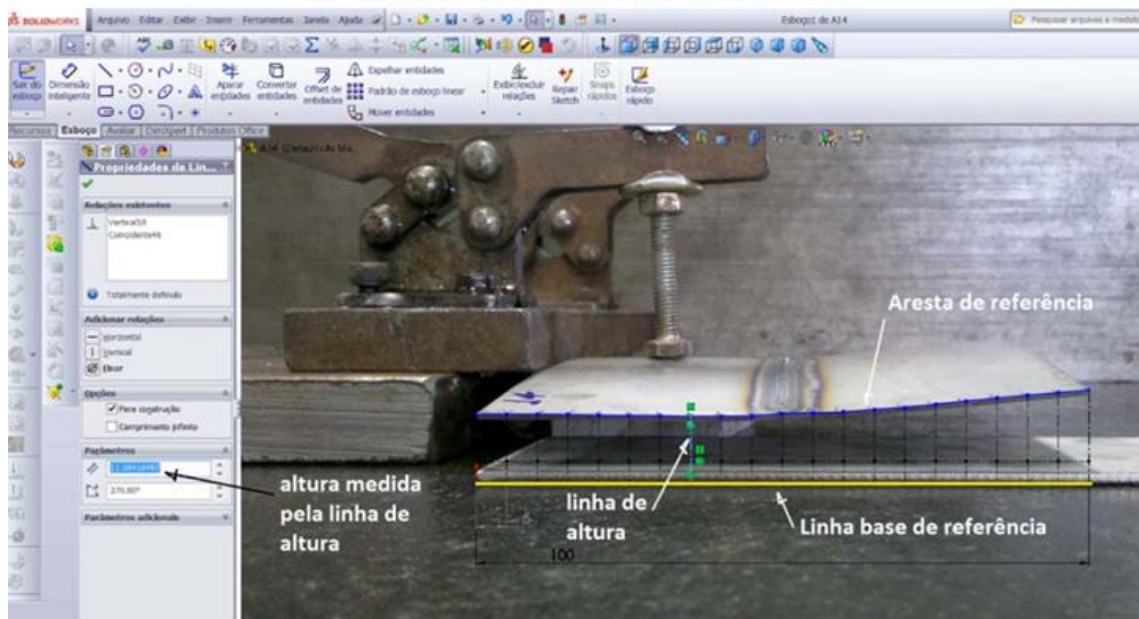
b) Medições realizadas com auxílio do software *SolidWorks*

FIGURA 2.15 - Esquema de medição e fixação dos corpos de prova (ABELING, et al., 2014).

As chapas de 1,0 e 1,5 mm, apresentaram um formato bem parabólico, tanto com a concavidade para cima como com a concavidade para baixo. Os poucos corpos de prova que ficaram com a concavidade da parábola voltada para cima, ocorreram a soldagem, mesmo que com algumas falhas. Já os corpos de prova de 2,0 mm tiveram uma diferença alta nas vistas A e C, isso provavelmente ocorreu por não ter uma distorção longitudinal maior, evidenciando que a espessura da chapa assim como a corrente utilizada tem uma influência direta na distorção.

Em função dos resultados pode-se ter uma previsão de que o sentido da concavidade é diretamente influenciado pelo perfil da soldagem, que depende da espessura, velocidade e corrente de soldagem.

## 2.4 Controle e simulação das distorções de soldagem

Como os métodos de remoção das distorções após a soldagem são onerosos e prejudiciais ao equipamento, todo esforço deve ser concentrado na tentativa de prever e reduzir ou eliminar as distorções antes e durante o processo de soldagem Locatelli (2014), Kennedy (1974), AWS (2001), Okumura (1982), entre outros, citam métodos utilizados na fase de projeto e fabricação de estruturas soldadas para controlar as distorções de soldagem entre os quais pode-se destacar:

- a) Projetar juntas e realizar a soldagem com a menor quantidade possível de soldas;
- b) Especificar o menor comprimento de solda possível compatível com as solicitações existente, sempre que possível utilizar soldas intermitentes;
- c) Utilizar o menor número de passes possível na soldagem de juntas chanfradas;
- d) Em passes longos de solda, não preencher a junta em uma única direção; técnicas de soldagem por passe à ré ou soldagens alternadas devem ser usadas;
- e) Posicionar as soldas junto à linha neutra da peça ou em posições simétricas à mesma;
- f) Balancear o volume de solda em torno do centro de gravidade da peça;
- g) Predizer a distorção que ocorrerá durante a solda e definir o posicionamento das peças de forma a equilibrar esta distorção;
- h) Utilizar dispositivos de fixação para pré-deformações opostas ao sentido das distorções para restrição e equilíbrio das distorções;
- i) Montar componentes idênticos de forma geminada (*back-to-back*) de tal forma que a soldagem possa ser balanceada em torno do eixo neutro;
- j) Desenvolver sequências ótimas de soldagem que possibilitem a distribuição homogênea de calor sobre a peça;
- k) Aplicar pré e pós-aquecimento na soldagem, buscando o balanço de calor no processo;
- l) Montagem de reforços longitudinais para prevenir curvamento/abaulamento longitudinal em soldas de topo de estruturas de chapas finas;
- m) Escolher processos e técnicas de soldagem objetivando o depósito do metal o mais rápido possível;
- n) Montagem e soldagem de equipamentos por subconjuntos.

Normalmente mais de uma ação descrita acima é utilizada na tentativa de controlar as distorções de soldagem.

Miranda *et al.* (2007) verificaram a evolução da distorção angular em chapas de aço baixo carbono, ASTM A-36, com diferentes geometrias, utilizando ou não, refrigeração forçada da poça de fusão com dióxido de carbono para controle das distorções de soldagem. O processo de soldagem utilizado foi o *FCAW (Flux Cored Arc Welding)* robotizado.

A FIG. 2.16a apresenta a descrição geométrica dos corpos de prova em formato retangular utilizados nos testes de 1 a 10. A FIG. 2.16b mostra os corpos de prova de formato *halter* utilizados nos testes de 11 a 30. Para a execução do cordão de solda foi utilizado o arame tubular AWS ET71T-1 de diâmetro de 1,2 mm. Para permitir a comparação entre os testes, mantiveram-se inalterados os parâmetros de soldagem: corrente de  $220 \pm 5$  A, tensão de 21,5 V, gás de proteção 25% CO<sub>2</sub> e 75% Ar com vazão de 17,5 l/min, a velocidade de soldagem utilizada foi de 3 mm/s, *stick out* de 14 mm. Nos testes 21 a 30, utilizou-se um cilindro de dióxido de carbono conectado a uma mangueira flexível de aço inoxidável, resistente a baixas temperaturas. A mangueira foi presa à tocha de soldagem para refrigeração forçada da poça de fusão durante a soldagem.

Para monitorar as distorções angulares, as chapas foram engastadas de um lado e na outra extremidade livre fixou-se uma fonte de laser (FIG. 2.16c). Monitorou-se as variações de posição do feixe de laser projetadas sobre um papel milimetrado com uma filmadora digital. Os vídeos foram revistos e a cada intervalo de 1 segundo, a tela foi paralisada e foi feita a leitura da distorção no eixo Y do papel milimetrado, até a estabilização da distorção.

A análise dos resultados mostra que é possível utilizar resfriamento da poça de fusão para redução da distorção angular. No início da soldagem, a chapa distorce no sentido negativo e, posteriormente, começa a distorcer no sentido positivo e em poucos segundos após a soldagem a distorção é estabilizada. Pode-se concluir ainda que a geometria dos corpos-de-prova também influencia no nível de distorção angular da chapa.



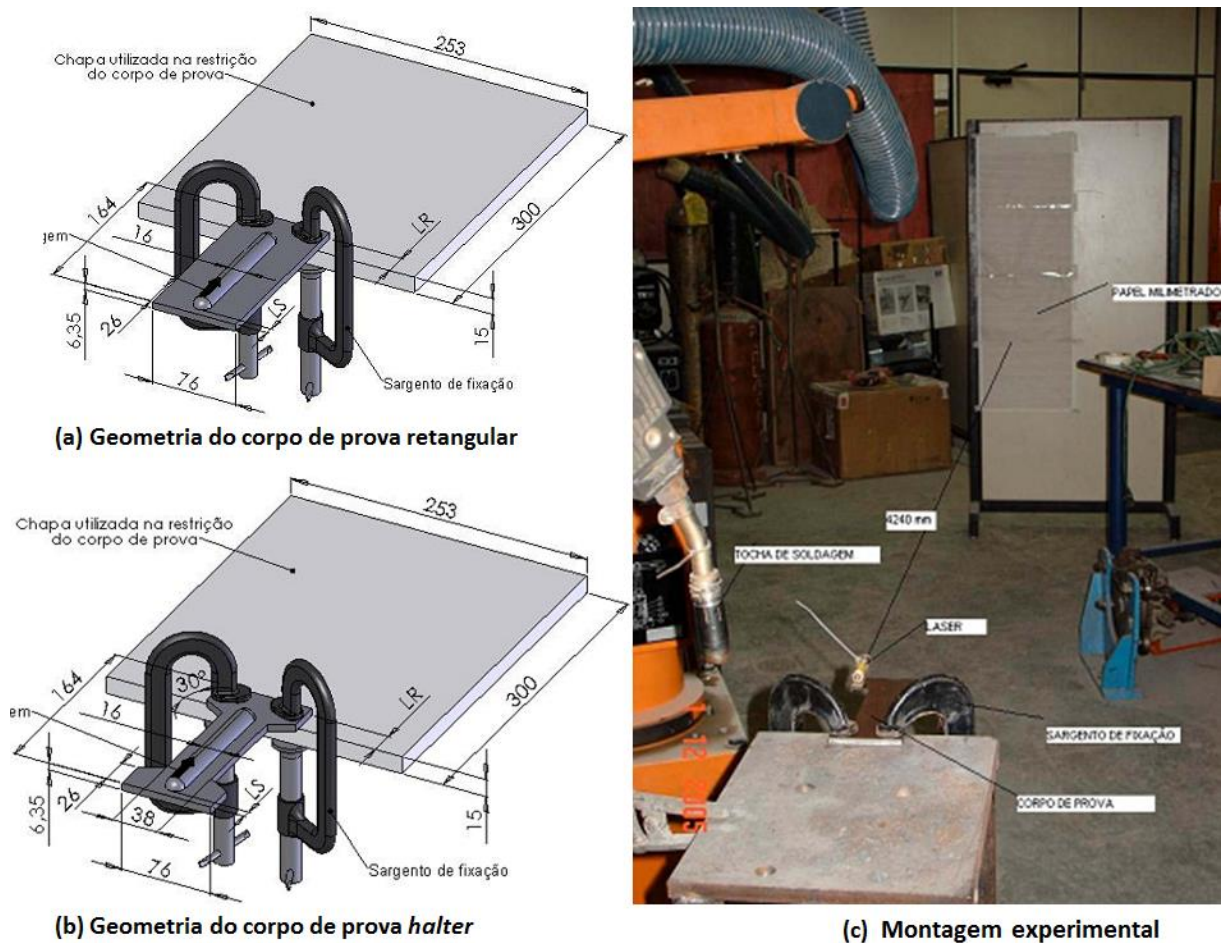


FIGURA 2.16 - Montagem experimental para monitoração das distorções angulares (MIRANDA, et al., 2007).

Wang *et al.* (2011) conduziram um estudo sobre as distorções em uma estrutura esférica soldada através de análises experimental e numérica utilizando o método de elementos finitos. A FIG. 2.17a apresenta a estrutura esférica soldada que é montada a partir de 14 segmentos de chapas conformadas e duas chapas circulares de topo, todas na espessura de 1 mm e material Q235A.

A soldagem foi realizada com o processo manual TIG, na sequência apresentada na FIG. 2.17b. O sentido das sequências de soldagem de W5 à W11 são da chapa circular superior para a inferior, e o sentido das demais sequências de soldagem são opostas a estas. Os principais parâmetros de soldagem utilizados foram: corrente de 70-80 A; tensão 20-30 V; velocidade de soldagem 8-12 mm/s.

Para avaliar a distorção de soldagem na estrutura esférica, foram utilizados sensores deslocamentos radiais nos três pontos de referência apresentados na FIG. 2.17b após a soldagem cada segmento. O ponto de medição P1 está localizado no centro da chapa circular de topo. Os

pontos de medição P2 e P3 estão localizados no centro de cada segmento, ou seja na linha média entre duas soldas. O ângulo de latitude do ponto P2 é de  $45^\circ$  e do ponto P3 é na linha equatorial.

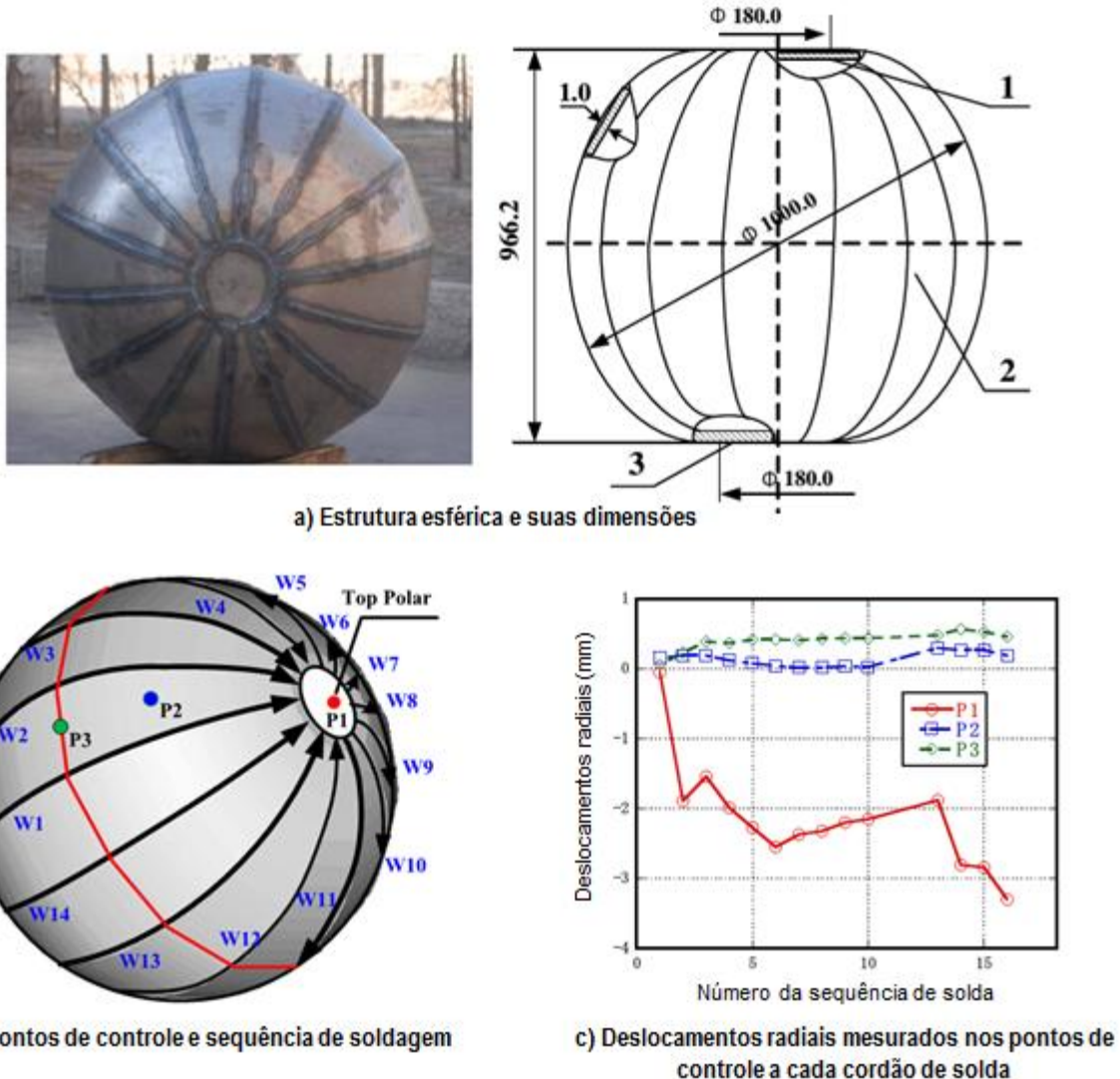


FIGURA 2.17 - Estrutura esférica - adaptado - (WANG, et al., 2007).

Para a análise por elementos finitos, a estrutura esférica foi modelada por elemento de casca e sua distorção a cada cordão de solda foi avaliada utilizando o método de deformação inerente proposto pelos autores. Para determinar a deformação dos cordões de solda, foi modelada uma junta típica de topo com elemento sólido 3D e um caso foi avaliado pelo método de análise transiente termo elasto-plástico.

Os resultados experimentais apresentados na FIG. 2.17c e numéricos apresentam deslocamentos radiais para o lado interno da estrutura esférica sobre os cordões de solda e no centro das chapas circulares. Os deslocamentos radiais no centro de cada segmento e entre os

cordões de solda apresentam deslocamentos para o lado externo da estrutura esférica. A distorção medida nos pontos de controle alteram a cada cordão de solda.

A evolução da distorção a cada cordão de solda e a distorção final da estrutura esférica previstas pelo método de deformação inerente distribuídos ao longo do cordão de solda apresentou boa concordância com os resultados experimentais.

Araújo (2012) buscou estudar o fenômeno das distorções no processo de soldagem utilizando técnicas numérica e experimentais. O trabalho foi dividido em duas etapas, onde foram explorados fatores que causam distorções e abordagens numéricas para seu cálculo.

Na primeira etapa foi investigado a ocorrência de distorções em estruturas simples. Verificou-se o rendimento térmico de soldagem em função do tipo de junta, a influência das restrições ou fixações das chapas na junta em “T” e a influência do calor e da geometria na distorção rotacional. Em seguida, foram realizados ensaios experimentais para calibração do modelo através do método inverso para estimação do parâmetro de distribuição da fonte de calor utilizando-se a técnica de Evolução Diferencial.

Para a realização soldagem foi utilizado o processo GMAW robotizado, arame AWS ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm. Os principais parâmetros de soldagem utilizados foram: tensão de 20 V; gás de proteção 25% CO<sub>2</sub> e 75% Ar com vazão de 15 l/min; a velocidade de soldagem de 30 cm/min, *stick out* de 14 mm. Para as aquisições dos valores de distorção foi utilizado um sistema de medição por coordenadas. As medições das distorções são realizadas antes da soldagem obtendo assim, as distorções pré-existentes. E são realizadas novamente as medições das distorções depois que o painel sofreu o processo de soldagem. Este procedimento minimiza os erros de medições.

O experimento consistiu na soldagem por simples deposição, em juntas do tipo “T” e sobrepostas compostas por chapas de aço carbono ASTM A36. Para cada tipo foram realizadas quatro repetições do experimento. Em todos os casos foram utilizados o processo de soldagem GMAW com transferência metálica por curto-circuito convencional. A segunda etapa foi a simulação de estruturas complexas. As condições iniciais para a simulação das estruturas complexas foram as forças calculadas pela simulação de estruturas simples, basicamente juntas em “T”. Esta abordagem é chamada de “forças equivalentes”.



As simulações foram validadas pelo ensaio experimental principal de soldagem, onde foram realizadas soldagens em painéis em aço carbono ASTM A36 de dimensões de 400 x 400 x 3,2 mm com enrijecedores de dimensões de 400 x 50 x 4 mm cruzados (FIG. 2.18). Durante o processo de soldagem da estrutura, foi realizado um cordão de cada vez e o próximo cordão só começa com o resfriamento de toda estrutura até a temperatura ambiente para que a temperatura de um cordão não interfira no próximo cordão.

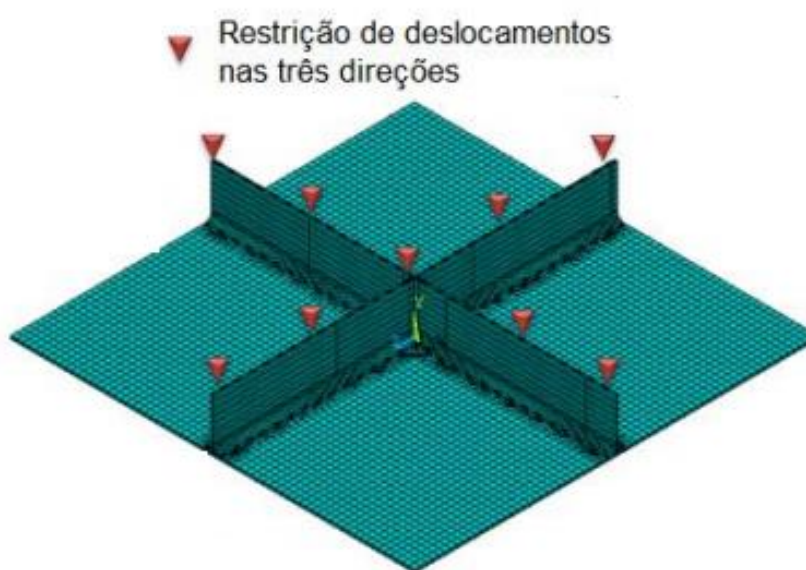


FIGURA 2.18 - Representação da estrutura do painel e fixações – adaptado - (ARAÚJO, 2012).

Os resultados demonstram concordância entre simulação e medição experimental tanto para os campos de temperatura, quanto para as deformações. As análises mostram ainda que o nível de restrição das juntas, tem grande influência na distorção angular da junta. O nível de distorção cai potencialmente com o aumento da espessura da chapa do painel para os mesmos valores de forças. Com o aumento da dimensão da chapa do painel a distorção também aumenta, porém, este aumento vai diminuindo até a estabilidade.

Em seu estudo Cabral *et al.* (2013) analisaram as distorções provenientes da soldagem de um modelo de painel enrijecido, empregando diferentes sequências e direções de soldagem previamente estabelecidas e três modos de transferência de metal. As soldagens foram realizadas pelo processo MAG robotizado utilizando arame AWS ER70S-6 com diâmetro 1,2 mm e gás de proteção CO<sub>2</sub> puro com vazão de 15 l/min.

Os painéis são compostos de uma placa de aço carbono ABNT 1020 com dimensões de 400 x 400 x 3,2 mm e 2 enrijecedores de cantoneira “L” de abas iguais 3/16” x 1” x 195 mm. Em cada painel foram depositados seis cordões de solda, respeitando a ordem e a sequência de soldagem (FIG. 2.19). O painel foi fixo em um suporte em uma mesa rígida onde foi realizada a soldagem. Após a soldagem essa mesa foi a referência para as medições de distorção utilizando a haste de altura de um paquímetro convencional nas pontas do painel.

Foi realizado primeiramente a soldagem por MAG curto circuito em duas peças de cada um dos cinco tipos de sequências. Depois apenas na sequência mais otimizada, FIG. 2.19b, a soldagem com os três tipos de modo de transferência: MAG curto circuito; MAG curto circuito controlado; MAG com adição de arame não energizado.

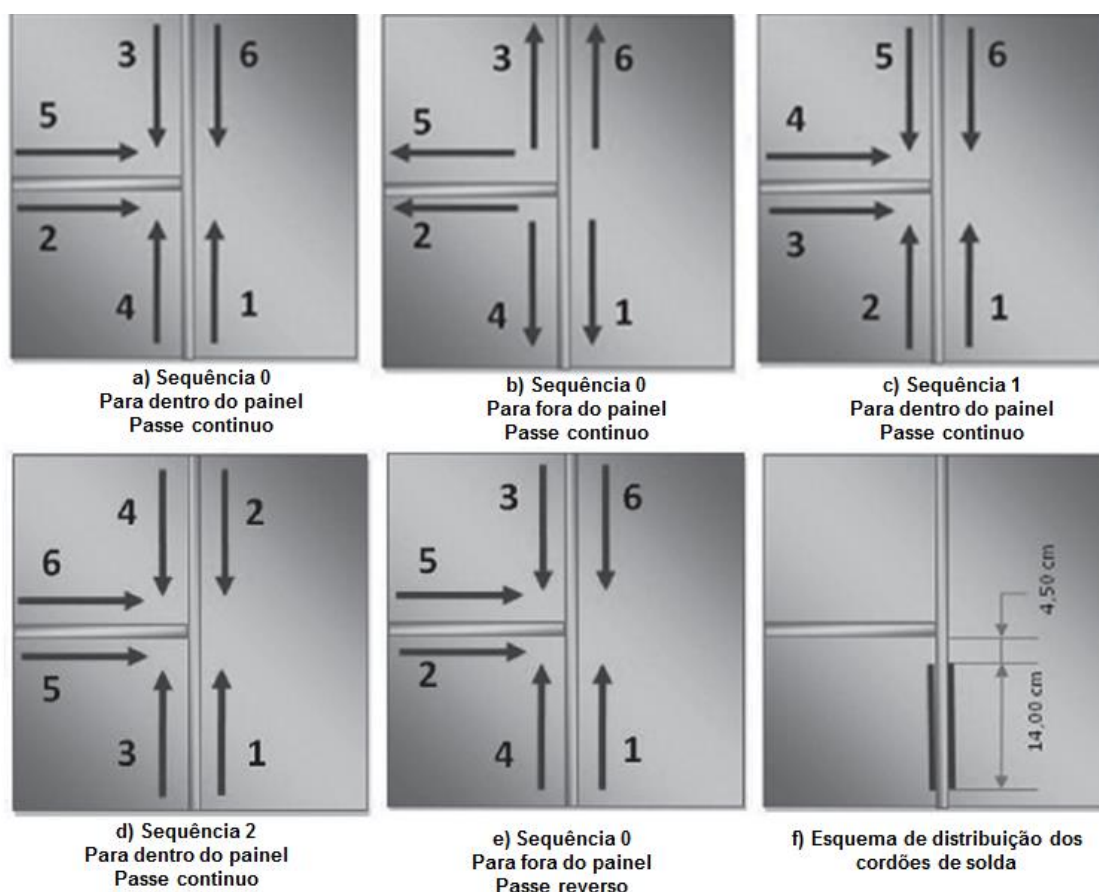


FIGURA 2.19 - Sequências de soldagem e distribuição dos cordões de solda (CABRAL, et al., 2013).

A variável mais importante foi a mudança de direção de soldagem, que está ligada diretamente aos níveis de restrição do painel teste. As sequências utilizadas surtiram pouco efeito nos valores de distorção. O passo reverso obteve valores baixos de distorções, contudo, mostrou-se improdutivo. Os valores de distorção para os processos MAG curto circuito e curto circuito

controlado resultaram em valores semelhantes de distorção. Os painéis soldados pelo processo MAG com adição de arame não energizado obtiveram menores valores de distorção medidos. Estes resultados demonstram que a determinação de procedimentos adequados e parâmetros de solda otimizados, pode-se obter baixos níveis de distorções ao longo da estrutura soldada.

Locatelli (2014) analisou em seu trabalho as distorções na soldagem de uma junta tipo “T”, através do estudo termoestrutural em um modelo numérico pelo método dos elementos finitos com validação experimental. Para isso, o trabalho foi dividido em duas etapas sequenciais, sendo a primeira destinada à validação experimental do modelo numérico e a segunda à elaboração de casos numéricos para análise. O modelo numérico utilizou elementos finitos tridimensionais para a obtenção do campo de temperaturas e distorções.

Na primeira etapa realizou-se a soldagem pelo processo GMAW robotizado de duas peças de aço carbono AISI 1020 com filete único na junta T, sendo utilizados arame AWS ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm, gás de proteção 90% Ar e 10% CO<sub>2</sub> e dois conjuntos de parâmetros de soldagem apresentados na TAB. 2.3. Os corpos provas da junta em “T” apresentam geometria da chapa base horizontal de 150 x 150 x 3 mm e a chapa perpendicular de 75 x 150 x 3mm. O campo de temperaturas transiente é verificado pela medição de temperaturas em oito pontos, enquanto o campo de distorções é verificado utilizando um sistema de medição por coordenadas. As medições das distorções foram realizadas antes e após a soldagem a fim de obter a diferença entre elas e isolar as distorções decorrentes somente do processo de soldagem.

TABELA 2.3 - Parâmetros de soldagem (LOCATELLI, 2014).

	Tensão (U) [V]	Corrente (I <sub>A</sub> ) [A]	Eficiência ( $\eta$ ) [-]	Vel. Soldagem (v <sub>s</sub> ) [mm/s]	Aporte Térmico (E <sub>liq</sub> ) [J/mm]
Parâmetros Principais (A1)	20	125	0,9	4,5	500
Parâmetros Alternativos (A2)	23,3	185	0,9	7,5	517,2

A fim de encontrar um conjunto de variáveis que apresente a menor e a maior distorção, a segunda etapa consistiu na elaboração de oito casos de estudo numéricos. A criação dos casos partiu da análise combinatória de três variáveis, a saber: variação da velocidade mantendo a mesma energia de soldagem; sequência de soldagem (sentido “vai-volta” ou “vai-vai”) e tempo de resfriamento entre filetes (TAB. 2.4).

TABELA 2.4 - Casos de simulação (LOCATELLI, 2014).

Casos de Simulação	Velocidade de Soldagem		Sequência de Soldagem		Tempo de Resfriamento	
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
1	A1		B1		C1 <sup>1</sup>	
2	A1		B1		C2	
3	A1		B2		C1 <sup>2</sup>	
4	A1		B2		C2	
5	A2		B1		C1 <sup>1</sup>	
6	A2		B1		C2	
7	A2		B2		C1 <sup>2</sup>	
8	A2		B2		C2	

A1 :  $U=20V$   $I=125A$   $v_s= 4,5mm/s$

A2 :  $U=23,3V$   $I=185A$   $v_s= 7,5mm/s$

B1 : vai-volta

B2 : vai-vai

C1<sup>1</sup> : 9s tempo de movimentação do robô

C1<sup>2</sup> : 11,5s tempo de movimentação do robô

C2 : tempo de resfriamento 360s

Dos dois conjuntos de parâmetros adotados na soldagem para o mesmo aporte térmico, denominados de principais e alternativos, os parâmetros alternativos, que correspondem a uma soldagem mais rápida, se mostraram mais adequados considerando a menor distorção apresentada. Dentre os casos analisados numericamente, a menor distorção foi observada no caso 6 (velocidade mais rápida, sequência “vai-volta” e com intervalo de resfriamento) onde a distorção máxima foi de 4,31 mm, enquanto a maior distorção foi apresentada pelo caso 4 (velocidade mais lenta, sequência “vai-vai” e com intervalo de resfriamento) com distorção máxima de 6,41 mm.

De forma geral, a comparação ponto a ponto entre os resultados numéricos e experimentais possibilitou avaliar que os modelos térmico e estrutural desenvolvidos pelo método dos elementos finitos apresentam resultados coerentes com os obtidos experimentalmente.

## 3 METODOLOGIA

Este capítulo, além de apresentar o procedimento experimental para a realização dos testes de monitoramento das distorções de soldagem, descreve também a metodologia utilizada para montagem do sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser. Os materiais e equipamentos utilizados também estão descritos com suas respectivas especificações.

### 3.1 Equipamentos

#### 3.1.1 Robô

Para a execução das soldagens, controle dimensional dos corpos de prova e montagem do sistema de monitoramento das distorções de soldagem foi utilizado um robô antropomórfico composto por: (a) painel central com o controlador MCR; (b) tocha de soldagem refrigerada a água; (c) trocador de calor para refrigeração a água da tocha; (d) *pendant*; (e) manipulador robótico; (f) alimentador de arame; (g) transformador retificador, tensão constante, modelo *Moto Arc 450 – Motoman*; (h) suporte para carretel de arame; (i) mesa de trabalho 700 x 700 x 785 mm (FIG. 3.1).

O controlador MCR possui linguagem própria de programação (*INFORM*) que é elaborada diretamente no *pendant* (programação *on line*) através de linhas de comando. Os principais passos para a elaboração de um programa nessa linguagem estão apresentados no fluxograma apresentado na FIG. 3.1. Neste trabalho, além dos programas de soldagem, também foram elaborados programas apenas com instruções de trajetória para marcações e controle dimensional utilizando o braço robótico, que foram denominados de programas de medição.

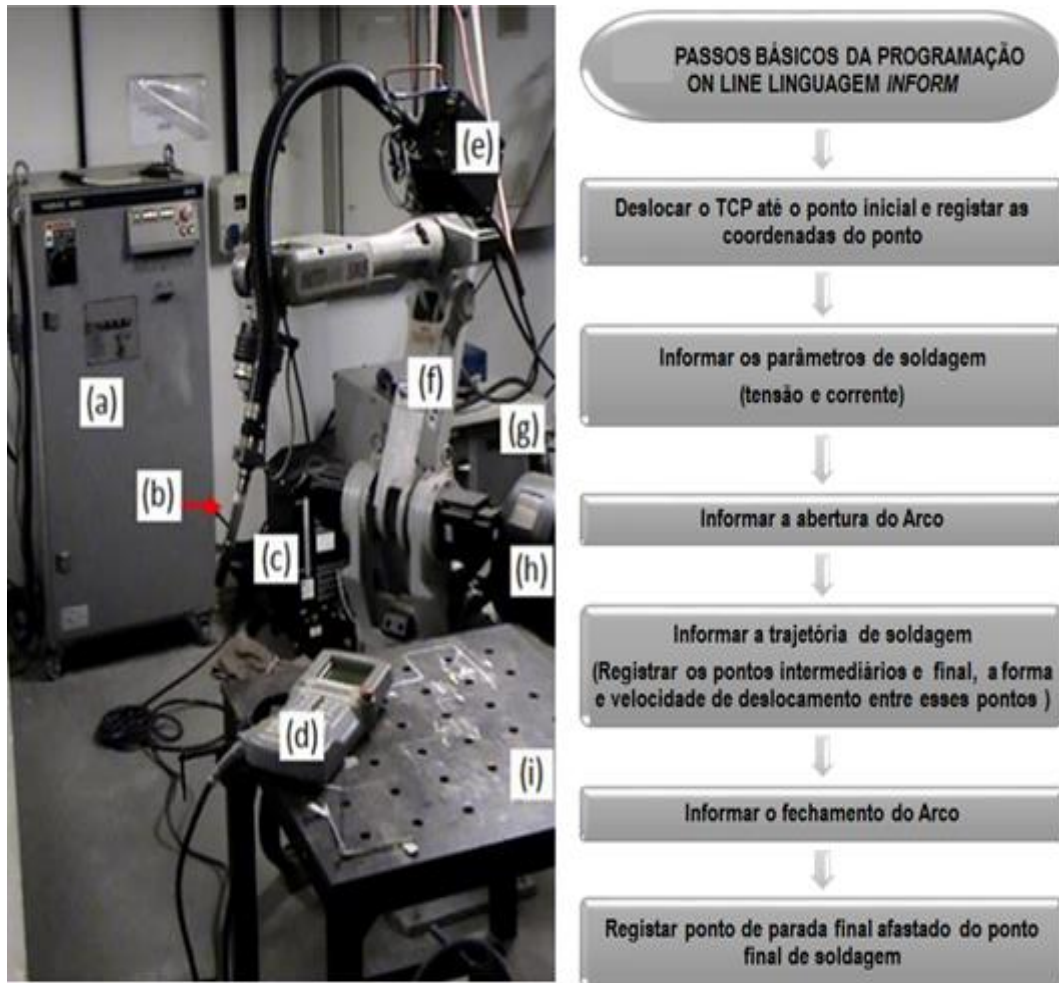


FIGURA 3.1 - Conjunto do robô antropomórfico e passos básicos para programação da linguagem *INFORM*.

### 3.1.2 Instrumentos de medição

Para a montagem do sistema de monitoramento e controle dimensional dos corpos de provas (CP) foram utilizados os seguintes instrumentos de medição:

- ✓ Relógio comparador com faixa de medição 0 a 10 mm e resolução 0,01 mm;
- ✓ Inclinômetro digital com faixa de medição 0 a 180° e resolução 0,1° (1,745mm/m);
- ✓ Nível de bolha de precisão com comprimento 250 mm e resolução 0,04 mm/m (0,002°);
- ✓ Paquímetro universal com faixa de medição 0 a 150 mm e resolução 0,05 mm;
- ✓ Mesa de desempenho com dimensões de 490 x735 mm e planicidade 2 µm.
- ✓ Trena com faixa de medição 0 a 3 m e resolução 1,0 mm;
- ✓ Escala com faixa de medição 0 a 1 m e resolução 0,5 mm;
- ✓ Termômetro infravermelho com faixa de medição -50 a 550 °C e resolução 0,1°C.

### 3.2 Montagem do sistema de monitoramento das distorções de soldagem

O sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser (SMCDS), consiste no monitoramento do ângulo de distorção através da movimentação de pontos refletidos num anteparo translúcido por feixes luminosos de sensores a laser apoiados sobre a superfície de uma peça a ser monitorada.

Este sistema é composto por: (a) mesa de trabalho rígida com niveladores, (b) anteparo translúcido com niveladores, (c) robô, (d) sistema de alimentação elétrica para os sensores a laser, (e) sensores a laser com suporte para fixação, (f) proteções térmicas, (g) equipamento de filmagem digital 13 megapixels e (i) proteções negras para auxiliar a filmagem (FIG.3.2). A montagem esquemática completa do aparato experimental está representada nos desenhos das FIG. 7.1 a 7.6 do Apêndice 1.

Em função das distorções ao longo do processo de soldagem, os pontos refletidos se movimentaram pelo anteparo, proporcionalmente as deformações ocorridas na peça. Pelo lado oposto ao anteparo translúcido, os movimentos dos pontos luminosos foram filmados. A discretização dessa filmagem permite gerar imagens do anteparo com a localização dos pontos refletidos a qualquer instante do processo de soldagem. Através do cálculo do ângulo de inclinação da reta de regressão linear destes pontos é possível obter a distorção angular na peça e elaborar gráficos que representam o comportamento das distorções de soldagem em função do tempo.

Para obter precisão no monitoramento das distorções, é necessário que a peça esteja apoiada sobre uma superfície plana e precisamente perpendicular ao anteparo de reflexão. Para garantir precisão no alinhamento e nivelamento das partes, o conjunto mesa e anteparo foi sincronizado com o sistema de coordenada cartesiana do manipulador robótico, permitindo que espaço cartesiano tridimensional do sistema seja conhecido com exatidão. As principais etapas de montagem e ajuste serão resumidas nos tópicos a seguir.



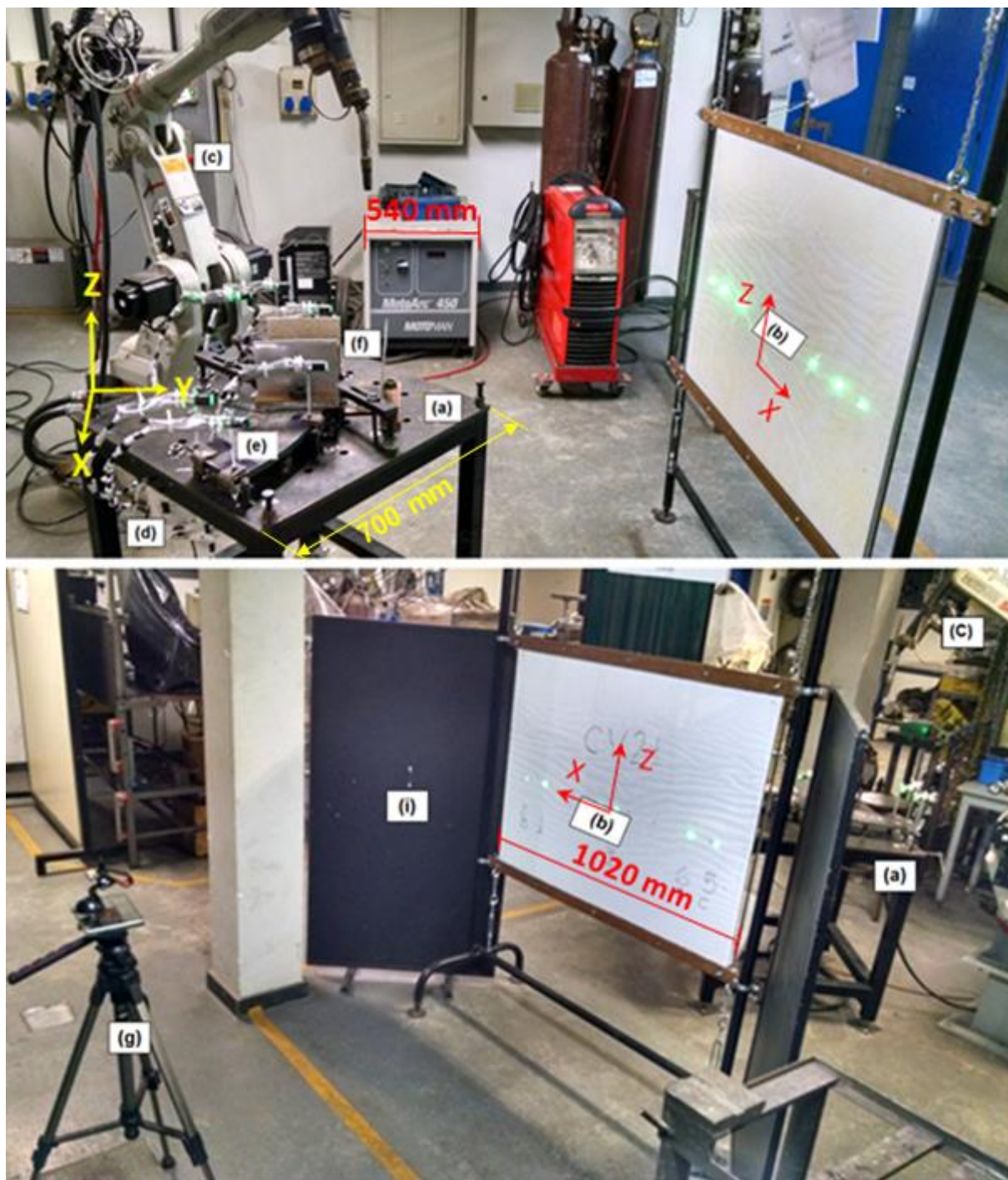


FIGURA 3.2 - Sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem (SMCDs).

### 3.2.1 Posicionamento da mesa de trabalho, calibração da ferramenta de ponta de medição como ferramenta de trabalho do robô e montagem do ponto de origem

Com o objetivo de aproveitar ao máximo o raio de atuação do braço manipulador sobre o sistema, a mesa de trabalho foi fixada rotacionada à  $45^\circ$  em relação ao robô (FIG.3.2).



Para o manipulador robótico realizar interpolações lineares ou circulares corretamente, se faz necessário definir o ponto central da ferramenta (TCP) pela calibração do mesmo (FIG.3.3) (MOTOMAN YASKAWA COMPANY, 1998). A fim de garantir a precisão desta operação foram utilizados dois dispositivos usinados, um cilindro escalonado de ponta cônica, FIG. 3.3a, e a ferramenta de ponta para medição (FPM) (FIG. 3.3b). A FPM que é rosqueada no mesmo local de fixação do bico de contato, será utilizada também para garantir a precisão nas operações de traçagem e medição com o braço robótico.

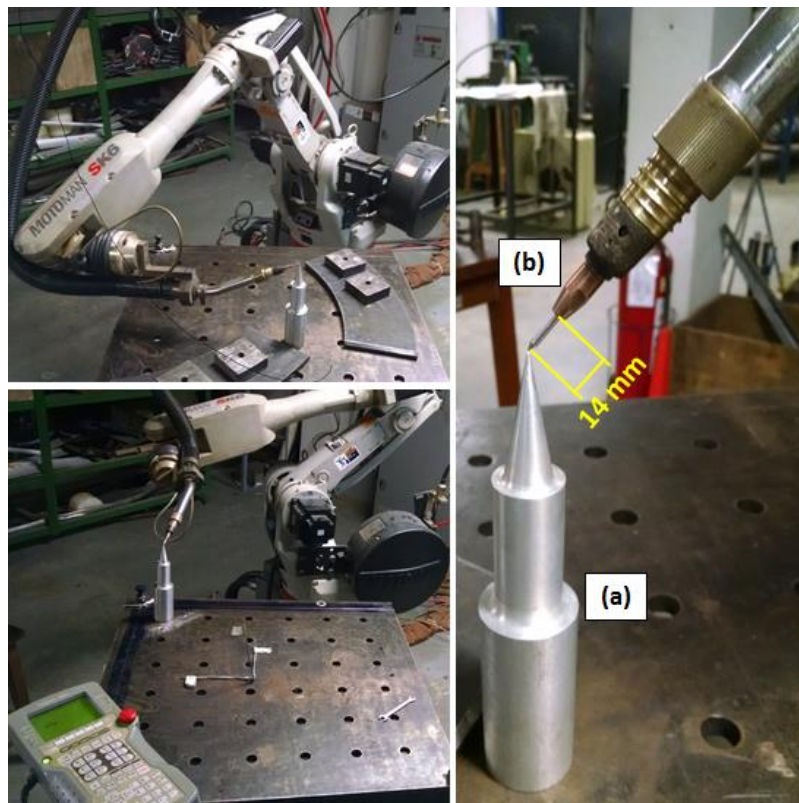


FIGURA 3.3 - Operação de calibração do TCP utilizando dispositivos usinados de referência.

Para a definição do ponto de origem sobre a mesa de trabalho conforme desenho da FIG. 7.1, Apêndice 2, foi realizada a traçagem do ponto zero a partir da quina da mesa mais próxima do robô. Uma porca longa M14 foi ponteadada no centro desta traçagem utilizando o processo de eletrodo revestido (E6013). Rosqueando um parafuso M14x45 mm na porca criou-se um nivelador de altura com amplitude de 45 a 60 mm. A altura desse nivelador foi ajustada em 50 mm e no centro da cabeça do parafuso foi puncionado o ponto central que será o ponto de referência do sistema (FIG. 3.4).



FIGURA 3.4 – Definição do ponto de referência do sistema.

### 3.2.2 Sincronização do ponto de origem do sistema de coordenada tridimensional de usuário do robô com o ponto de origem na mesa trabalho

Para coincidir o ponto de origem do sistema de coordenadas do robô com o ponto de origem na mesa de trabalho, foi utilizado o recurso de programação do robô chamado de coordenada de usuário. Esse recurso permite configurar um plano cartesiano com direção, inclinação e origem determinados em qualquer posição dentro da área de trabalho (FIG. 3.5a e FIG.3.5b). Para definir este plano é necessário registrar as coordenadas cartesianas de três pontos distintos conforme FIG. 3.5c, para que a linguagem *INFORM* configure o sistema de coordenada de usuário.

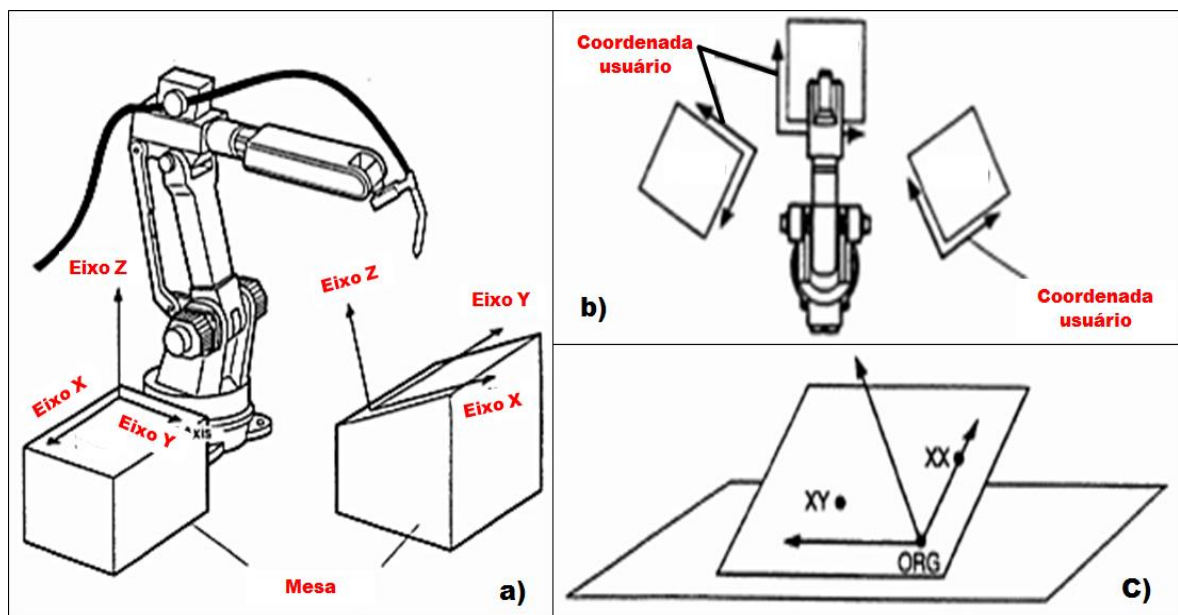


FIGURA 3.5 – Representação esquemática da configuração da coordenada de usuário para robô: a) Diferentes planos inclinados; b) Diferentes planos rotacionados; c) Indicação dos três pontos utilizados para configurar uma coordenada de usuário. - adaptado - (MOTOMAN YASKAWA COMPANY, 1998).

Para que esses três pontos fossem registrados com exatidão foi necessário primeiramente criar uma coordenada de usuário utilizando uma superfície plana e regular como referência. Sendo assim, a mesa de desempenho foi montada alinhada e nivelada sobre a mesa de trabalho com o nível de bolha de precisão (FIG. 3.6a).

Utilizando a FPM e relógio comparador fixado no bico de contato da tocha como instrumentos de posicionamento e medição, foi possível registrar com precisão os três pontos da coordenada do usuário 01 sobre a mesa de desempenho e transferir o ponto de origem do plano 01 para o plano 02 criando a coordenada de usuário 02 (FIG. 3.6b). Desta forma, o ponto de referência da mesa de trabalho e o ponto de origem da coordenada de usuário 02 estão sincronizados como ponto zero do sistema de coordenada cartesiana tridimensional (FIGURA 3.6FIG.3.6c).

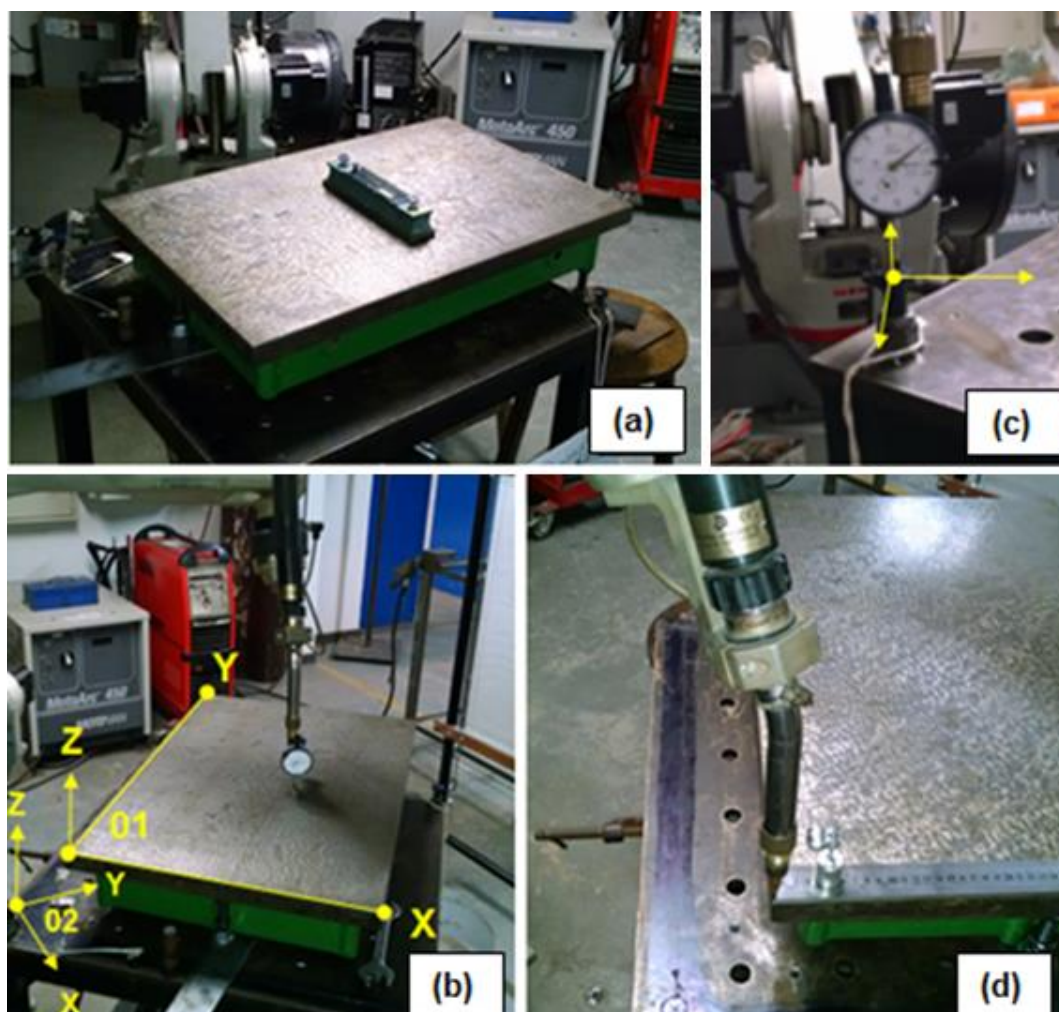


FIGURA 3.6 - Calibração e sincronização da coordenada de usuário.



Para a calibração do sistema da coordenada tridimensional de usuário 02, foi realizada sobre a mesa de desempenho, a verificação das tolerâncias de deslocamento e planicidade para os movimentos do braço manipulador robótico utilizando o relógio comparador, a FPM e a escala métrica (FIG. 3.6d).

Para verificação de planicidade e deslocamento nos eixos “X” e “Y”, foram medidos no total de 130 pontos espaçados 50 mm um do outro. Já para verificação de deslocamento no eixo “Z” foram medidos um total de 65 pontos nas 4 extremidades e no centro da mesa (FIG. 3.7). Os valores verificados com os instrumentos de medição e os valores apresentados no *display* do *pendant* estão apresentados nas tabelas do Apêndice 02.

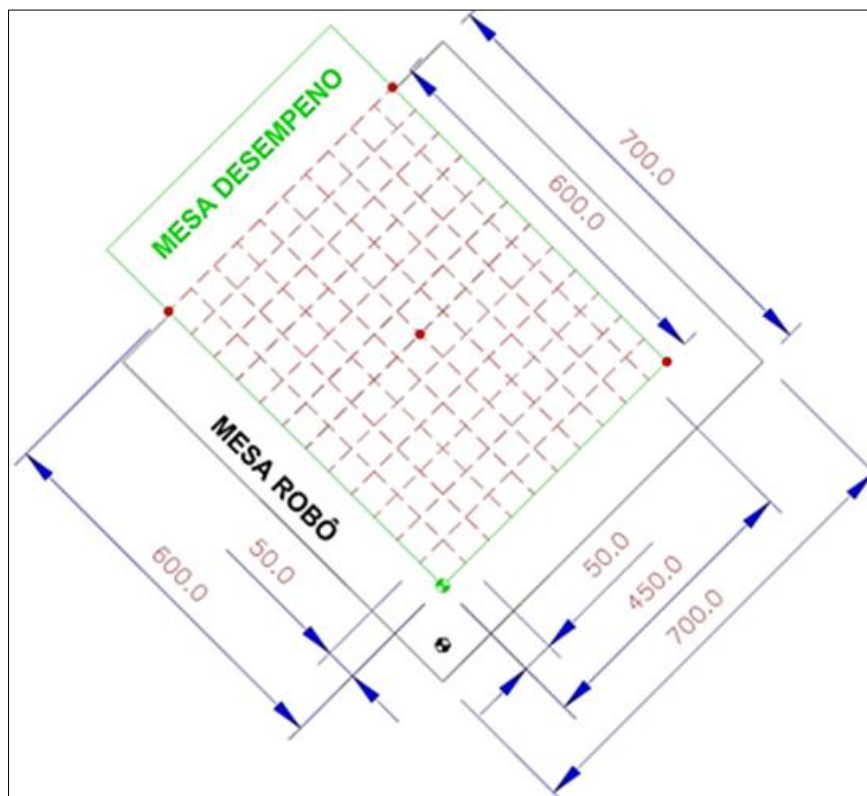


FIGURA 3.7 – Representação esquemática dos pontos utilizados na calibração da coordenada de usuário 02.

Os erros de deslocamento apresentados pelo braço manipulador podem ser definidos como os erros máximos observados nas TAB. 7.1 à TAB. 7.3 do Apêndice 02, referentes a calibração da coordenada de usuário 02. O erro de repetibilidade de posicionamento do braço manipulador é de  $\pm 0,1$  mm (MOTOMAN YASKAWA COMPANY, 1998). Assim, os erros apresentados pelo sistema de medição utilizando o braço manipulador robótico são:

- Eixos “X” e “Y”  $\pm 0,5$  mm;
- Eixo “Z”  $\pm 0,05$  mm;
- Planicidade 0,5 mm;
- Repetibilidade de posicionamento 0,1 mm.

Tendo o sistema de coordenada cartesiana tridimensional conhecido e controlado, todas as rotinas de deslocamento dos programas de soldagem, posicionamento e marcação foram programadas pela indicação dos valores das coordenadas cartesianas dos pontos que definem a trajetória.

### 3.2.3 Calibração do relógio comparador como ferramenta de trabalho do robô

Utilizando a FPM, foi verificado se o ponto de referência da mesa de trabalho coincide com o ponto zero do sistema de coordenada de usuário 02 (FIG.3.8a). Para calibração do relógio comparador como ferramenta de trabalho, o mesmo foi posicionado exatamente no ponto de origem (FIG.3.8b). Os valores das coordenadas apresentados no *display* do *pendant* representam as dimensões desta ferramenta em relação ao flange do robô. Informando essas dimensões a linguagem INFORM foi possível configurar o relógio comparador como a segunda ferramenta de trabalho do robô.



FIGURA 3.8 - Calibração do relógio comparador como ferramenta de trabalho do robô.

### 3.2.4 Montagem dos batentes e apoios sobre a mesa de trabalho

Utilizando a FPM e o relógio para posicionamento e ajuste de altura, foi realizada a montagem de mais 3 parafusos M14x45mm nas quinas da mesa de trabalho determinando, assim, os 4 pontos de referência do sistema cartesiano tridimensional. Foram montados ainda parafusos M14x30 mm para apoio, nivelamento e encosto para os corpos de prova (FIG.3.9 e FIG. 7.7 do Apêndice 01).

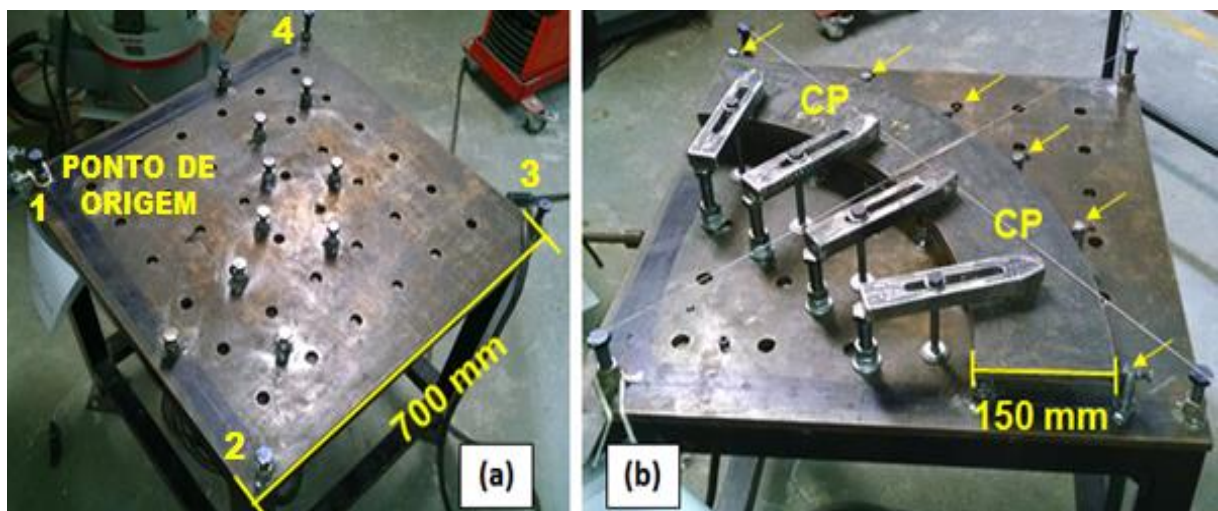


FIGURA 3.9 – Montagem dos parafusos M14 para apoio, nivelamento e encosto dos CP sobre a mesa.

### 3.2.5 Montagem e alinhamento do anteparo translúcido

O anteparo é composto por um suporte de estrutura tubular, um quadro com dois vidros transparentes de 4 mm, um papel branco milimetrado e esticadores que ligam o quadro de vidro a estrutura tubular. No papel branco foi impresso em ambos os lados uma malha quadriculada de 10x10 mm e pontos de referência para ajuste da mesa de trabalho com o painel dos pontos alinhamento dos pontos luminosos refletidos pelos sensores a laser (FIG. 3.10).

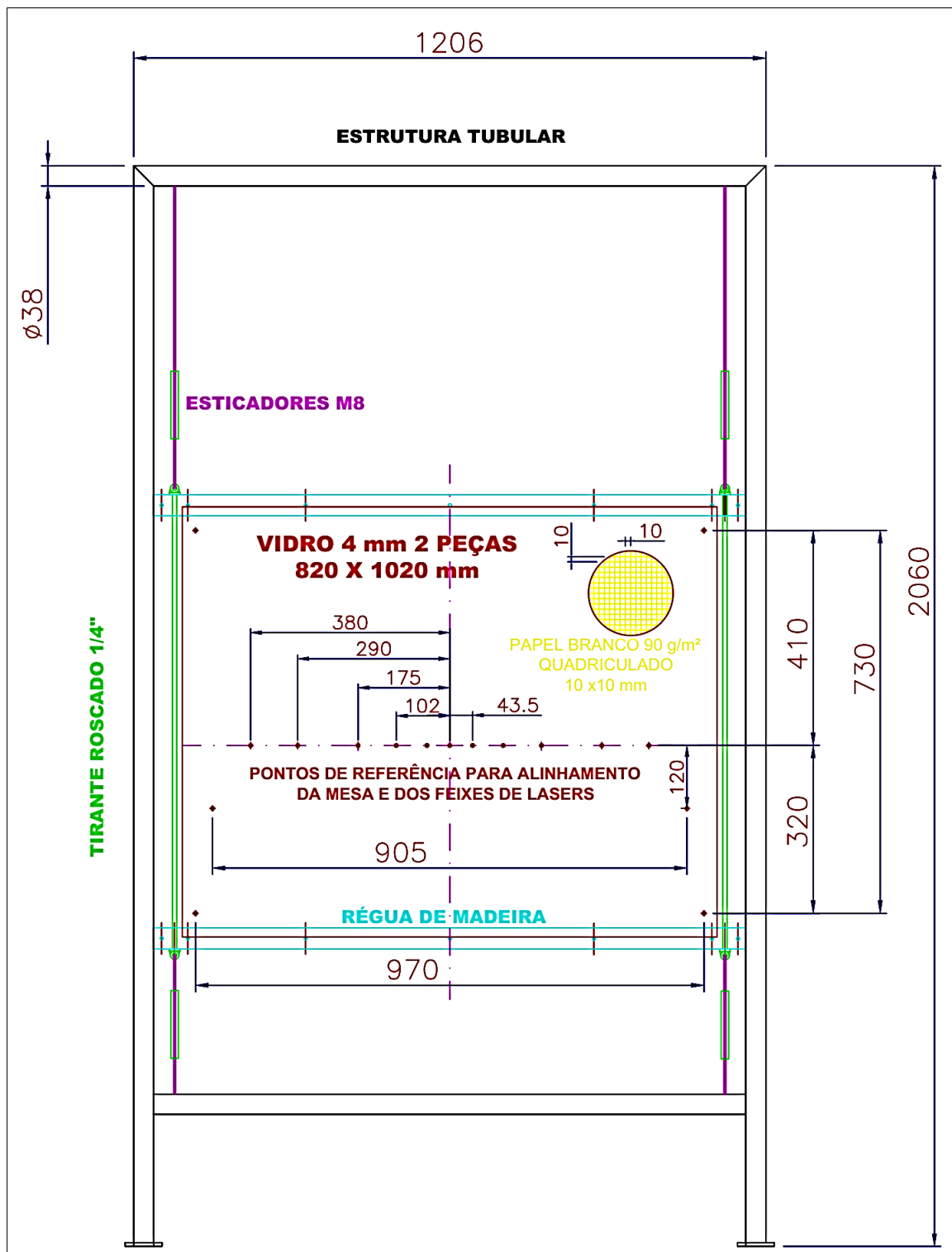


FIGURA 3.10 – Desenho esquemático do anteparo translúcido.

O alinhamento e perpendicularidade da mesa de trabalho com o painel do anteparo foi realizado utilizando pêndulos (linha com peso na ponta) e trena. Para verificar a perpendicularidade do painel com a mesa trabalho, foi utilizado o inclinômetro digital e a configuração de um triângulo retângulo entre as peças (FIG. 3.11).

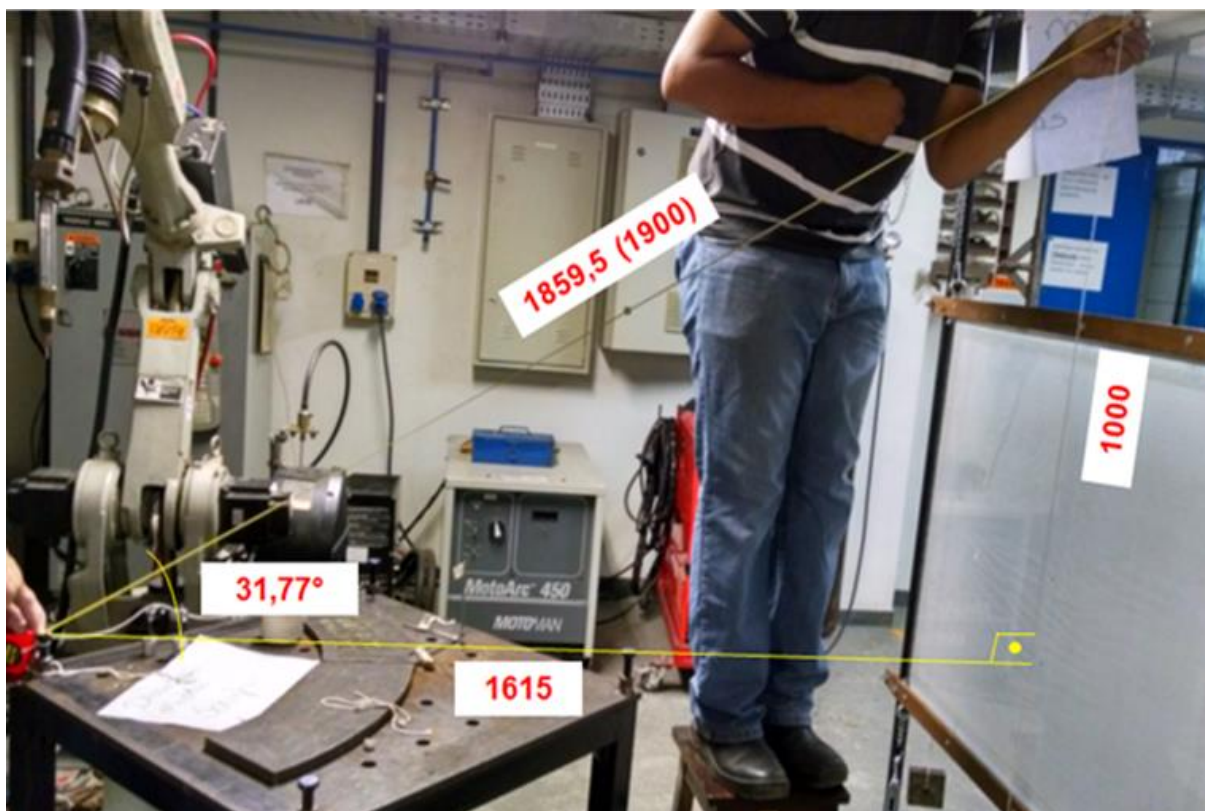


FIGURA 3.11 – O alinhamento da mesa de trabalho com o painel.

Para realizar a aferição da montagem, foi verificado o alinhamento entre os pontos de referência do painel e da mesa de trabalho utilizando a FPM montada no braço manipulador (FIG. 3.12). Para garantir a repetibilidade desta operação, foi elaborado o programa somente de trajetória (JON-00-R) para verificação dos pontos de referência da mesa e anteparo. Assim os erros de montagem da mesa e do anteparo são:

- Planicidade da mesa de trabalho 0,5 mm;
- Posicionamento da mesa em relação ao anteparo  $\pm 0,5$  mm;
- Perpendicularidade do anteparo em relação a mesa  $\pm 0,3^\circ$ ;

Todo o rigor utilizado na montagem da mesa de trabalho e anteparo de reflexão visou eliminar as variações dimensionais que podem interferir na avaliação e conclusões sobre a eficiência do monitoramento das distorções de soldagem utilizando sensores lasers.



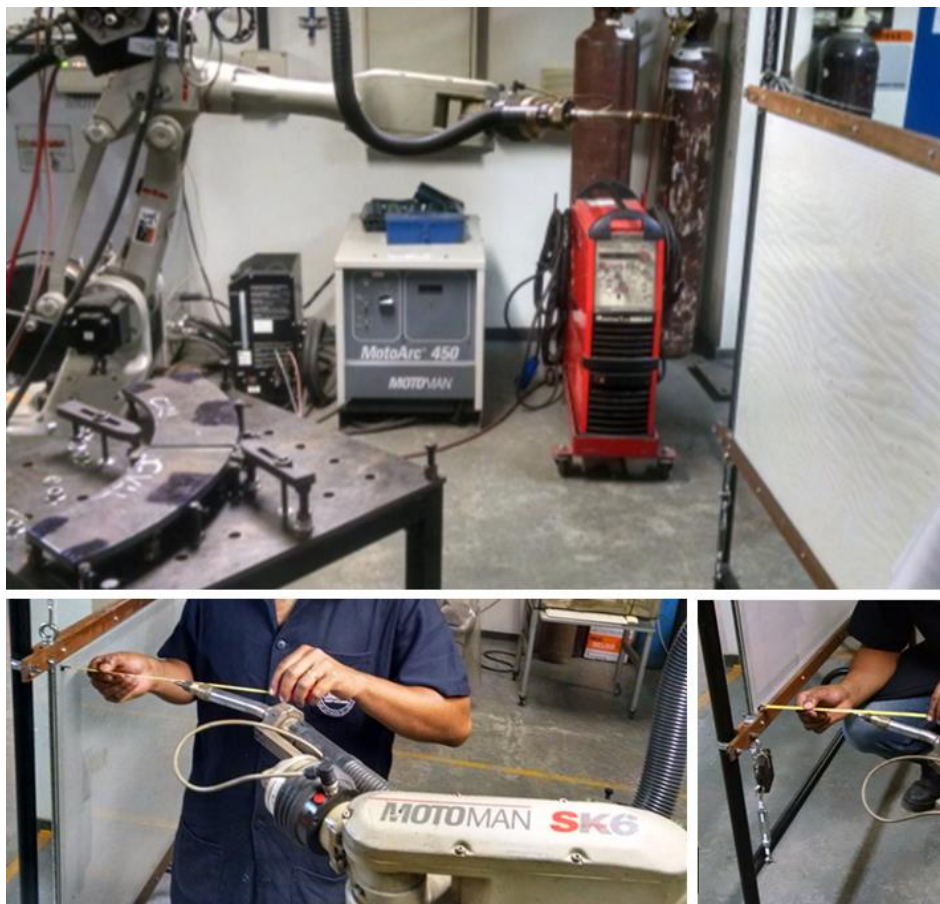


FIGURA 3.12 – Verificação do alinhamento entre os pontos de referência do painel e da mesa de trabalho.

### 3.2.6 Montagem de suportes e do sistema elétrico para os sensores a laser

Para fixação dos lasers sobre os corpos de prova a uma altura de 120 mm, foi necessário construir um suporte composto conforme apresentado na FIG. 3.13. Em função do longo período que o laser permaneceu ligado durante o experimento e da necessidade de ajustar intensidade luminosa para permitir a medição do ponto de luz no anteparo, foi montado um sistema de alimentação elétrica para até oito lasers com um potenciômetro que permite o ajuste de corrente para ajuste da intensidade do feixe luminoso (FIG.3.13j e FIG. 3.13i).

Considerando ainda as altas temperaturas atingidas pelo corpo de prova durante a soldagem, foi necessário isolar os suportes e os fios elétricos com mantas térmicas de fibra de vidro aluminodizada para temperatura de trabalho até 500°C.

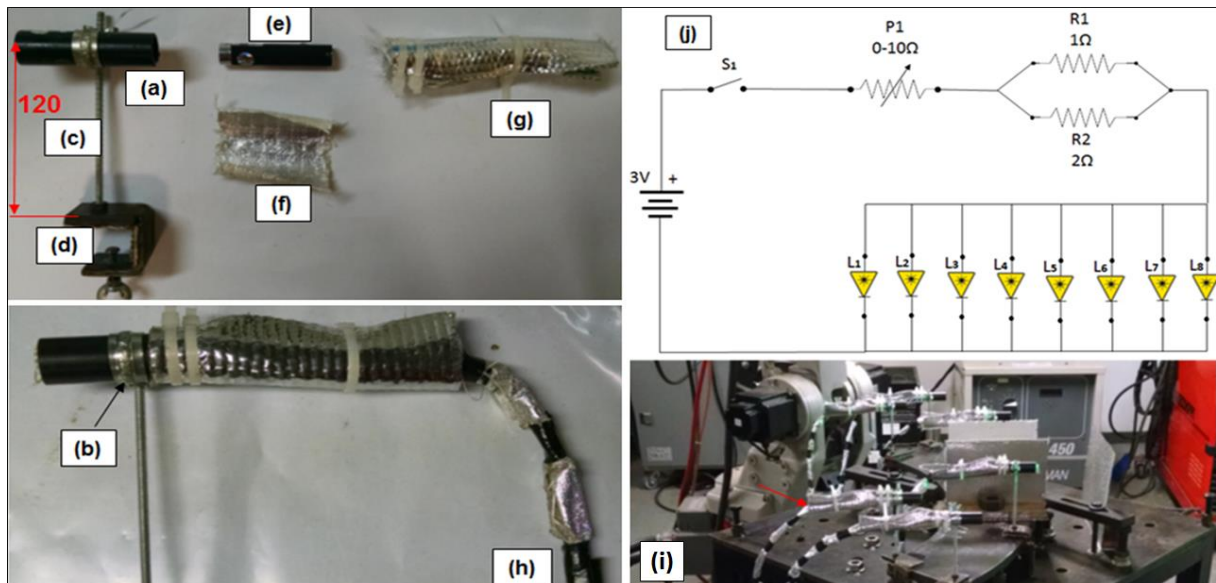


FIGURA 3.13 - Suportes para lasers: a) Tubo de proteção externa; b) Abraçadeira de fixação; c) Tirante rosqueado 3/16" para ajuste de altura; d) Garra de fixação; e) Sensor laser verde 5 mW classe 3A com temperatura máxima de trabalho de 50°C; f) Manta de fibra de vidro aluminodizada espessura 1 mm para proteção interna; g) Manta de fibra de vidro aluminodizada espessura 2 mm para proteção externa; h) Cabos eletrônicos; j) Esquema elétrica de alimentação dos sensores laser; i) Montagem do sistema de alimentação.

### 3.3 Materiais

Os parâmetros de soldagem utilizados nesse experimento estão baseados em um procedimento de soldagem (EPS) qualificado pelo Grupo DELP para o projeto dos anéis segmentados. Para as soldagens foi utilizado o processo GMAW com arame sólido AWS ER70S-6, diâmetro 1,2 mm e mistura de gás com 75% Argônio e 25% CO<sub>2</sub> com transferência metálica preferencialmente globular.

#### 3.3.1 Definição do modelo reduzido em escala do anel segmentado, preparação, montagem e soldagem dos corpos de prova

A definição dimensional do anel segmentado em escala reduzida foi realizada levando em consideração espessura de chapas comerciais disponíveis no mercado, dimensões máximas da mesa de trabalho e a manutenção das proporções dimensionais do modelo real (FIG.3.14).

Baseado nestas condições de contorno para a definição do modelo reduzido, chegou-se a uma escala de redução de 9,5 vezes, sendo ainda necessário reduzir a ângulo do segmento de 180° para 90°, para que o corpo de prova não extrapolasse o tamanho da mesa.

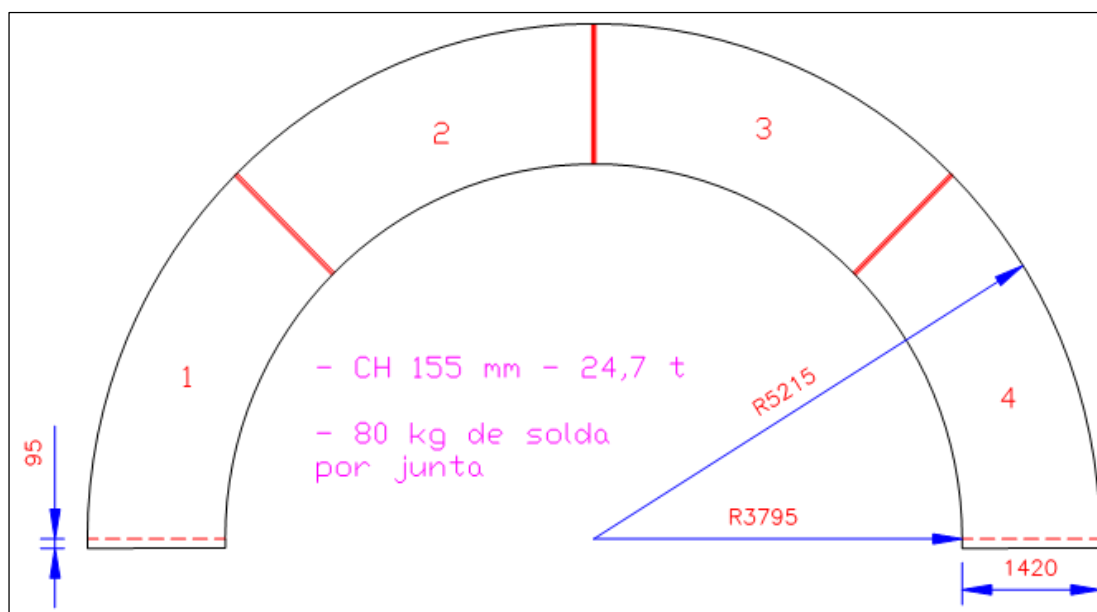


FIGURA 3.14 - Representação esquemática do anel segmentado soldado pelo Grupo DELP.

A redução nas dimensões lineares e no ângulo do segmento proporcionou uma redução de 1646 vezes na massa dos corpos de prova em relação a peça real. Sendo assim, o corpo de prova utilizado neste experimento foi um anel segmentado com ângulo de  $90 \pm 2^\circ$ , raio externo de  $550 \pm 4$  mm por  $400 \pm 4$  mm de raio interno, espessura de  $16 \pm 0,3$  mm e peso de aproximadamente de 15 kg.

Para proporcionar diferentes amplitudes de distorções a serem avaliadas durante o experimento, foram definidos ainda três formas construtivas para os corpos de prova com variações no tipo de chanfro e quantidade de juntas conforme apresentado na FIG. 7.8 do Apêndice 03.

As peças avulsas para a montagem dos corpos de prova foram fornecidas pelo grupo DELP, sendo fabricadas pelos processos de corte a plasma e usinagem dos chanfros a partir de chapas de aço de baixo carbono, ASTM A572 GR.50, com espessura de 16 mm (FIG. 7.9 do Apêndice 03).

O sistema de identificação para os corpos de prova adotado tem o intuito de fornecer a informação da configuração de cada corpo de prova por um código de duas letras e dois dígitos conforme exemplo apresentado na FIG.3.15.

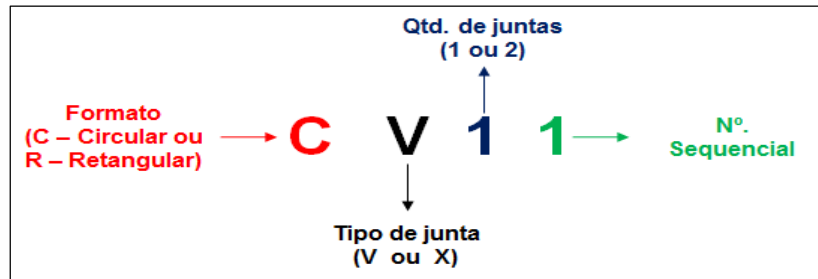


FIGURA 3.15 - Sistema de identificação dos CP.

Neste trabalho foram executadas as soldagens de 12 corpos de prova, sendo: 6 com uma junta e chanfro em “V” (CV11 à CV16); 3 com duas juntas e chanfro em “V” (CV21 à CV23); 3 com uma junta e chanfro em “X” (CX11 à CX13). Foram fabricados também 8 corpos de prova com dimensões de 16 x 150 x 200 mm, sendo 4 com uma junta e chanfro em “V” (RV11 à RV14) e 4 com uma junta e chanfro em “X” (RX11 à RX14), para verificação dos parâmetros de soldagem.

A montagem dos corpos de provas foi realizada sobre a mesa de trabalho, FIG.3.16, utilizando chapas auxiliares de aço carbono ASTM A36 de 6,3 mm de espessura para travamento. Essas chapas também serão utilizadas para abertura e estabilização do arco de solda fora dos chanfros. As dimensões e tolerâncias de montagem dos corpos de prova estão apresentados na FIG 7.8 do Apêndice 03.

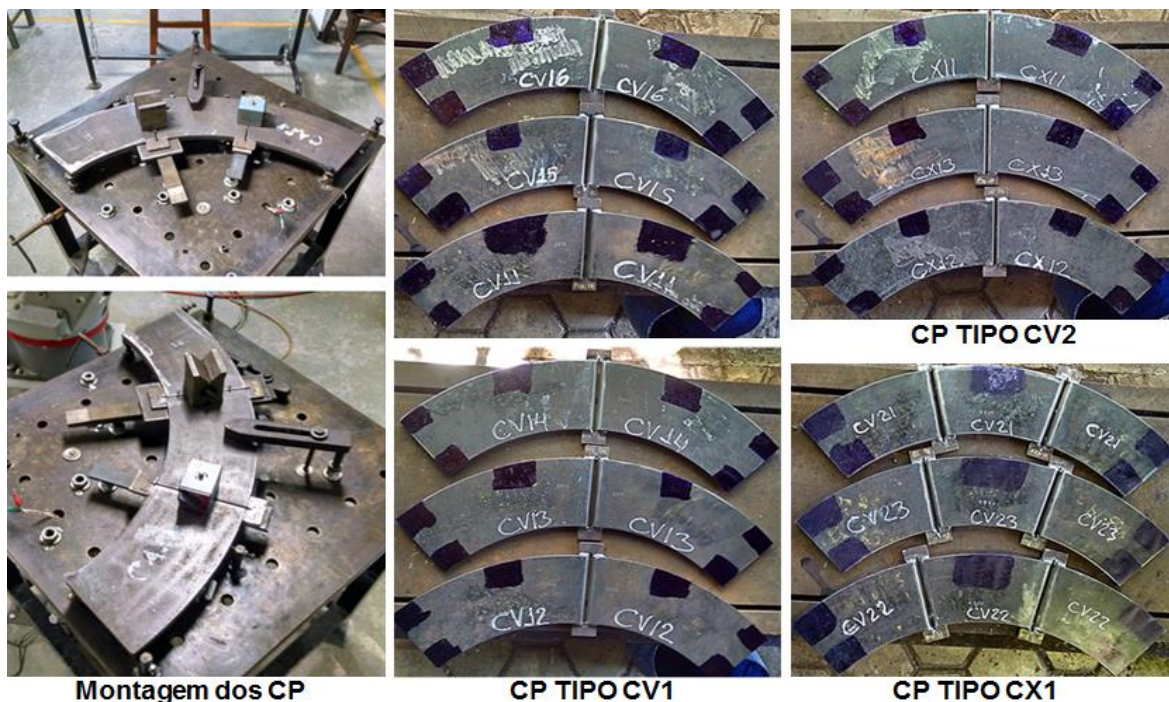


FIGURA 3.16 - Montagem dos corpos de prova.



Para ajustar os parâmetros de soldagem e comportamento dos sensores a laser foram realizadas três etapas de testes iniciais de soldagem utilizando os corpos de provas retangulares. A fim de verificar a integridade da junta soldada foi realizada macrografia retirando duas amostras de cada tipo de junta. As amostras foram cortadas, lixadas (lixas 80 à 1200) e atacadas com Nital 5%. As Fotografias foram feitas com uma câmera digital de 13 megapixels sobre um suporte fixo para garantir a mesma posição para todas as amostras. Para verificar a eficiência dos parâmetros de soldagem, foi calculado da taxa de diluição conforme EQ. **Erro! Fonte de referência não encontrada.**3.1). Para o cálculo da área da seção transversal das juntas, foi utilizado o software Auto Cad.

$$\delta = \frac{A_w - A_{w1}}{A_w} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

- $\delta$  - Taxa de diluição;
- $A_w$  - Área real da seção transversal da solda;
- $A_{w1}$  - Área teórica da seção transversal da solda.

Durante a terceira etapa dos testes iniciais de soldagem foram realizados ainda o monitoramento de temperatura, utilizando um termômetro infravermelho e um cronômetro, para verificar: temperatura no ponto de apoio do sensor a laser localizado mais próximo da junta ao final de cada passe de solda; temperatura no centro da junta ao final de cada passe de solda; intervalo tempo de para garantir a temperatura interpasse (300° C) descrita na EPS; tempo de resfriamento total.

Após os testes iniciais foram realizados os testes experimentais de soldagem com monitoramento das distorções para os 12 corpos de prova do modelo reduzido em escala conforme procedimento descrito nos itens a seguir deste capítulo. Durante a soldagem dos seis corpos de prova do tipo CV1, o corpo de prova CV11 foi soldado com parâmetros de soldagem que apresentaram menor aporte térmico que os corpos de prova CV12 à CV16. Para a soldagem dos corpos de prova com junta em “X” foi necessário soldar em ambos os lados do chanfro. Neste trabalho a soldagem no primeiro lado do chanfro será denominada “LADO A” e a

soldagem no lado oposto de “LADO B”.

### 3.4 Procedimento experimental

Esta seção tem o objetivo de descrever a sequência das atividades realizadas para os testes de monitoramento das distorções de soldagem utilizando sensores a laser. As principais etapas deste procedimento experimental são:

- Controle dimensional do corpo de prova;
- Posicionamento do corpo de prova sobre a mesa de trabalho;
- Controle dimensional do corpo de prova após posicionamento sobre a mesa de trabalho;
- Montagem dos sensores a laser sobre a peça;
- Posicionamento dos acessórios de proteção e equipamento de filmagem;
- Soldagem dos CP com acompanhamento do funcionamento dos sensores a laser;
- Desmontagem dos sensores a laser, acessórios de proteção e equipamento de filmagem;
- Controle dimensional do corpo de prova após soldagem;

Para verificar a geometria inicial e final dos corpos de prova, foram realizados controles dimensionais utilizando instrumentos de medição antes e após o processo de soldagem. Essas medições foram analisadas e comparadas com os resultados obtidos com o sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser.

Os corpos de prova foram montados sobre a mesa trabalho observando o pleno apoio das peças sobre os batentes e encostos para garantir o posicionamento das juntas sempre no mesmo local. Para posicionamento dos sensores laser e controle dimensional foram realizadas marcações de pontos de referência sobre a superfície do corpo de prova.

A soldagem robotizada foi utilizada para minimizar os efeitos da variação de parâmetros como velocidade de soldagem e *stick out* (distância da face do bico de contato até a peça) que interferem diretamente no aporte térmico e, conseqüentemente, nas distorções de soldagem. Os programas de soldagem (JON-CV1, JON-CV2 e JON-CX1) foram elaborados prevendo uma sequência de soldagem otimizada e intervalos de tempo, que garantam repetibilidade na temperatura entresses entre os corpos de prova.

Os sensores lasers foram apoiados sobre os locais demarcados no corpo de prova e o feixe luminoso de cada laser alinhado manualmente com seu respectivo ponto de referência existente no painel do anteparo. Após alinhamento dos lasers, foram posicionados os anteparos de proteção e o equipamento de filmagem. Para garantir a repetibilidade desta operação foram demarcados no piso e na mesa os locais de posicionamento dos anteparos de proteção e equipamento de filmagem.

A soldagem foi iniciada logo após início da filmagem que prossegue durante o período de resfriamento até a peça atingir uma temperatura abaixo de 110°. Para padronizar a execução destas atividades, elaborou-se um roteiro que foi seguido durante os testes de soldagem. Este procedimento está apresentado no Apêndice 4.

### 3.5 Controle dimensional dos corpos de prova antes e após a soldagem

Para verificar com exatidão e precisão a geometria inicial dos corpos de prova e as distorções provenientes do processo de soldagem foram realizadas várias etapas de controle dimensional descritas a seguir:

- Controle da distorção angular com a peça apoiada sobre a mesa de desempenho;
- Marcação dos pontos de monitoramento no corpo de prova;
- Controle da distorção angular com a peça apoiada sobre a mesa de trabalho;
- Controle da planicidade com a peça apoiada sobre a mesa de trabalho;
- Controle das dimensões externas dos corpos de prova;
- Controle dimensional do biseis e do reforço do cordão de solda.

A distorção angular que ocorre na peça 2 (FIG. 3.17, lado esquerdo) dos corpos de prova no sentido anti-horário de rotação do eixo “Y” foi denominada  $-\theta_{x/2}$ . Já a distorção angular que ocorre na peça 1 (FIG. 3.17, lado direito) no sentido horário de rotação do eixo Y, foi denominado  $+\theta_{x/2}$ . O valor total da distorção angular será dado pela soma dos módulos dos valores das distorções angulares das peças 1 e 2 conforme apresentado na EQ. (3.3).

$$\theta_x = |-\theta_{x/2}| + |+\theta_{x/2}| \quad (3.3)$$

A movimentação angular dos corpos de prova no sentido anti-horário de rotação eixo X foi denominada  $\theta_y$ , já a movimentação angular dos corpos de prova no sentido horário de rotação eixo “X” foi denominada  $-\theta_y$  (FIG.3.17).

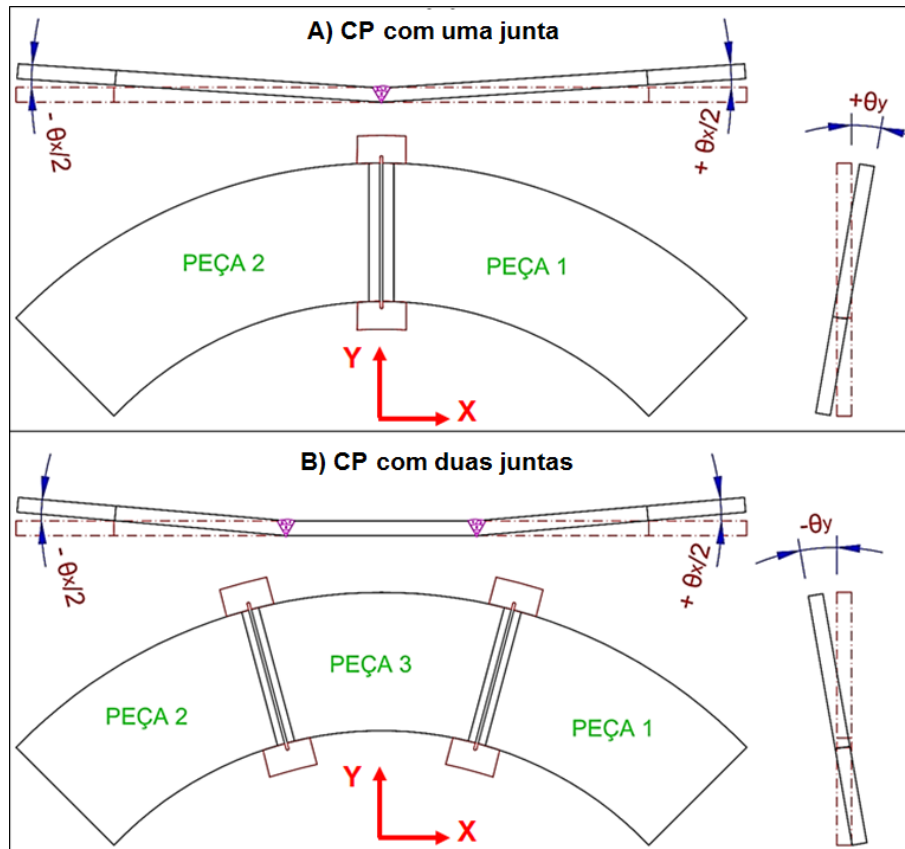


FIGURA 3.17 – Representação esquemática das distorções no sentido do eixo “X” e “Y”:

### 3.5.1 Controle dimensional das distorções angulares com a peça apoiada sobre a mesa de desempenho

Para utilizar a mesa de desempenho como referência foi necessário nivelá-la sobre uma mesa utilizando pequenas lâminas de aço e o inclinômetro digital. Os corpos de prova foram posicionados sobre a mesa de desempenho apoiados sobre 4 calços com altura de  $10 \pm 0,03$  mm. Utilizando o inclinômetro digital foram medidas as distorções angulares antes e após a soldagem.

A FIG.3.18 apresenta a localização dos pontos de medição sobre os corpos de prova com uma e duas juntas. Para cada ponto foram realizadas duas medições para identificar as distorções no



sentido do eixo “X” e “Y”.

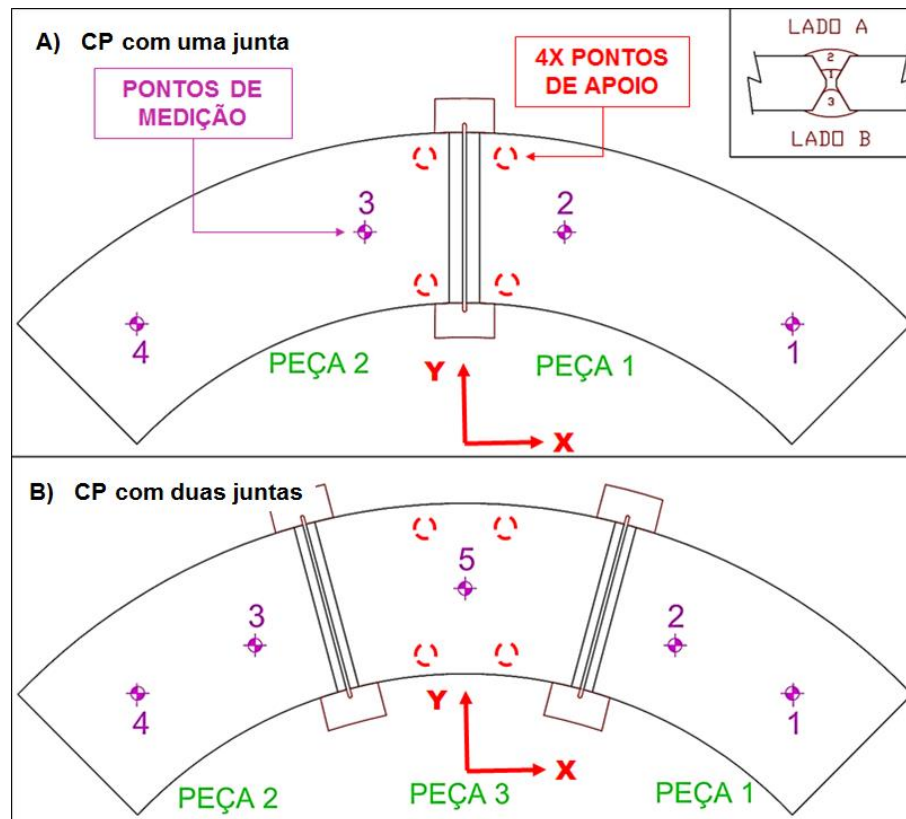


FIGURA 3.18 – Representação esquemática dos pontos de medição sobre os CP.

### 3.5.2 Marcação de pontos de monitoramento sobre os corpos de prova para posicionamento dos sensores a laser

Utilizando a FPM acoplada ao braço manipulador, foram marcados sobre os corpos de prova os pontos de monitoramento para posicionamento dos sensores laser, controle de distorção e planicidade sobre a mesa de trabalho (FIG.3.19a). A FIG.3.19b e FIG.3.19c apresentam a distribuição desses pontos de referência (A à J) para os corpos de prova com uma e duas juntas. Para garantir a repetibilidade desta operação foram elaborados programas de medição (JON-PC-01 & JON-PC-02).

A repetição desses programas de marcação após soldagem permitiu verificar os valores de deslocamento dos pontos de referência durante a soldagem. Os deslocamentos são calculados pela diferença entre os valores das coordenadas verificadas no *display* do *pendat* antes e após soldagem.

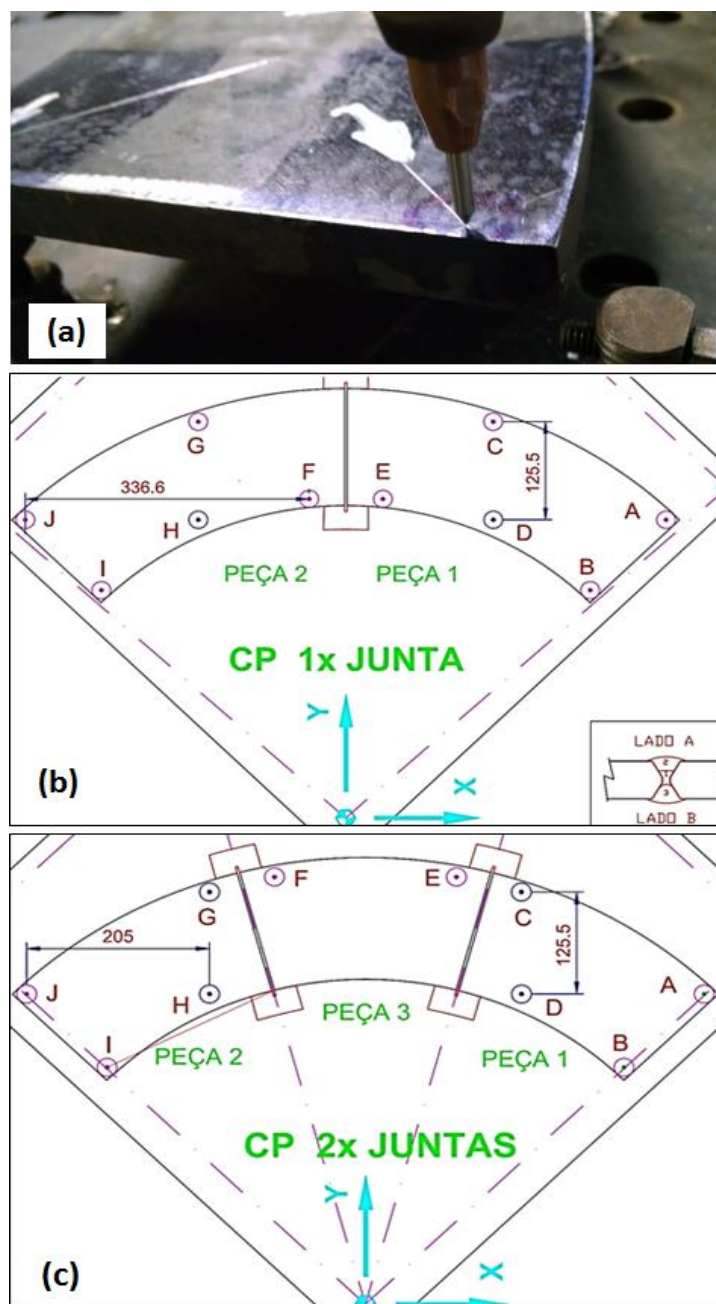


FIGURA 3.19 – Marcação e localização dos pontos para marcação para os CP com uma e duas juntas: a) Foto ilustrativa da marcação; b) CP uma junta; c) CP duas juntas.

### 3.5.3 Controle de planicidade com a peça apoiada sobre a mesa de trabalho

O controle de planicidade foi realizado, antes e após soldagem, utilizando o relógio comparador acoplado ao braço manipulador para medir o valor de altura da coordenada “Z” dos pontos de monitoramento (FIG.3.20). Para garantir a repetibilidade desta operação foram elaborados dois programas de medição (JON-RC-01 & JON-RC-02) para controle dos corpos de prova com uma e duas juntas.

Os controles dimensionais com a FPM e o relógio comparador descritos acima permitem determinar as coordenadas tridimensionais dos pontos de referência, antes e após soldagem. Com esses valores foi possível verificar novamente as distorções angulares pela medição indireta através da relação trigonométrica entre a diferença de altura e a distância entre dois pontos conforme apresentada na EQ. (3.4).

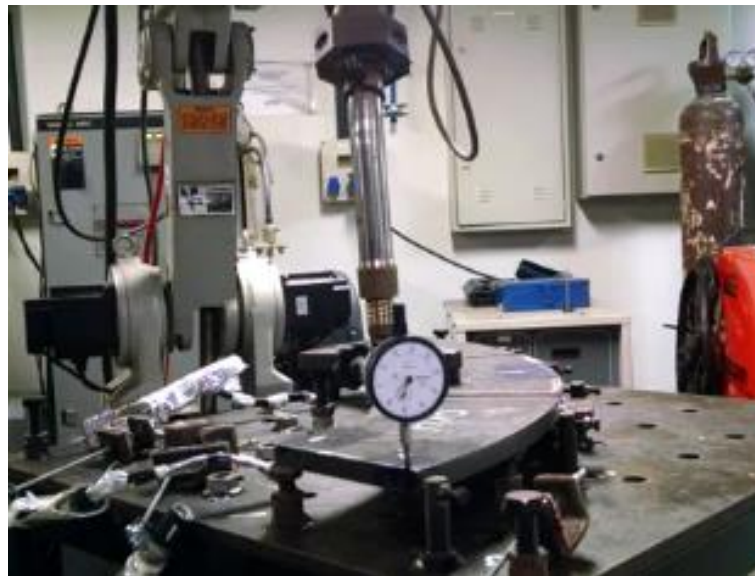


FIGURA 3.20 –Medição de planicidade utilizando o relógio comparador.

$$\frac{\theta_x}{2} = \arctan \times \frac{h_2 - h_1}{lx_{12}} \quad \text{ou} \quad \theta_y = \arctan \times \frac{h_2 - h_1}{ly_{12}} \quad (3.4)$$

Sendo:

- $\theta_x/2$  – distorção angular no sentido do eixo “X.” para uma peça;
- $\theta_y$  – distorção angular no sentido do eixo “Y”;
- $h_1$  – altura do primeiro ponto (eixo “Z”);
- $h_2$  – altura do segundo ponto (eixo “Z”);
- $lx_{12}$  – distância entre o primeiro e segundo ponto no sentido do eixo “X”;
- $ly_{12}$  – distância entre o primeiro e segundo ponto no sentido do eixo “Y”;

Para o corpo de prova com uma junta, FIG. 3.19b, os pontos A&E e C&D permitem calcular as distorções  $\theta_x/2$  e  $\theta_y$  para a peça 1. Já os pontos J&F e G&H permitem calcular as distorções  $\theta_x/2$  e  $\theta_y$  para a peça 2.

Para o corpo de prova com duas juntas, FIG. 3.19c, os pontos A&D e C&D permitem calcular as distorções  $\theta_x/2$  e  $\theta_y$  para a peça 1. Já os pontos J&H e G&H permitem calcular as distorções  $\theta_x/2$  e  $\theta_y$  para a peça 2.

#### 3.5.4 Controle dimensional das distorções angulares com a peça apoiada sobre a mesa de trabalho

Os controles dimensionais das distorções angulares de soldagem foram realizados, antes e após soldagem, utilizando o inclinômetro digital. Foram realizadas duas medições em cada ponto de referência (A à J), a fim de identificar as distorções angulares no sentido do eixo “X” e “Y”.

#### 3.5.5 Controle das dimensões externas do corpo de prova

Os controles das dimensões externas dos corpos de prova foram realizados pela medição dos raios interno e externo dos segmentos, antes e após a soldagem, utilizando a trena. Foram medidos cinco pontos diferentes em cada raio conforme apresentado na FIG.3.21.

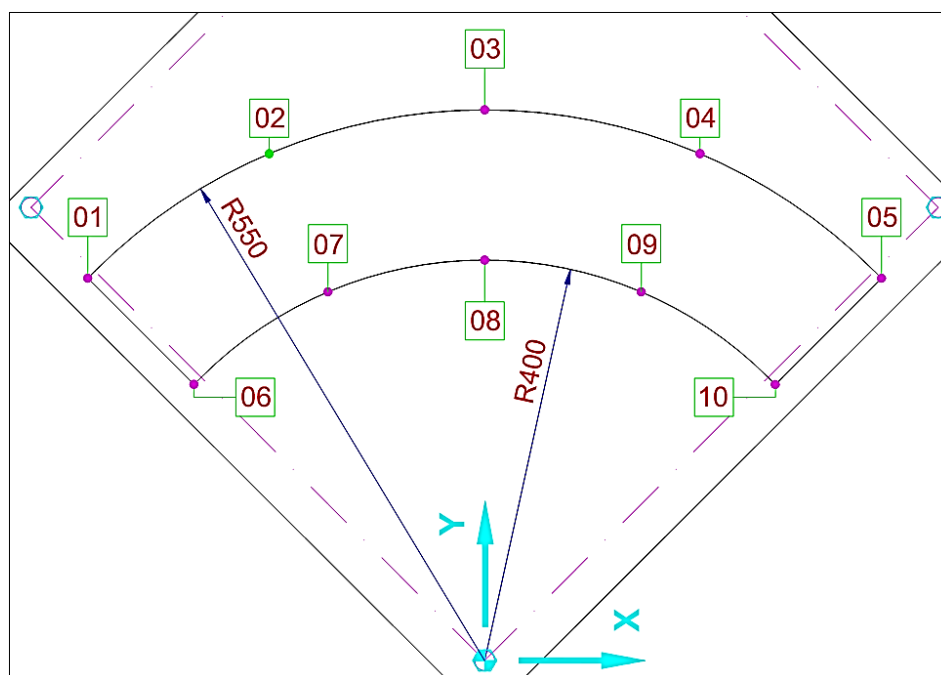


FIGURA 3.21 - Croqui para controle dimensional das dimensões externas dos corpos de prova.

### 3.5.6 Controle dimensional do bisel e reforço de solda

Para os controles dimensionais dos biseis e reforços das soldas foram medidos, FIG. 3.22, a abertura da raiz ( $d$ ), a largura do bisel ( $l_b$ ), largura reforço de solda ( $l_r$ ) e altura do reforço de solda ( $a_r$ ). A abertura da raiz foi medida utilizando um gabarito passa ou não passa ( $2,8 \pm 0,03$  &  $3,2 \pm 0,03$  mm) e as demais cotas foram medidas com o paquímetro convencional. Para cada junta foram realizadas três medições longo do comprimento. O esquema para medição do bisel e da junta soldada está apresentado na FIG. 3.22.

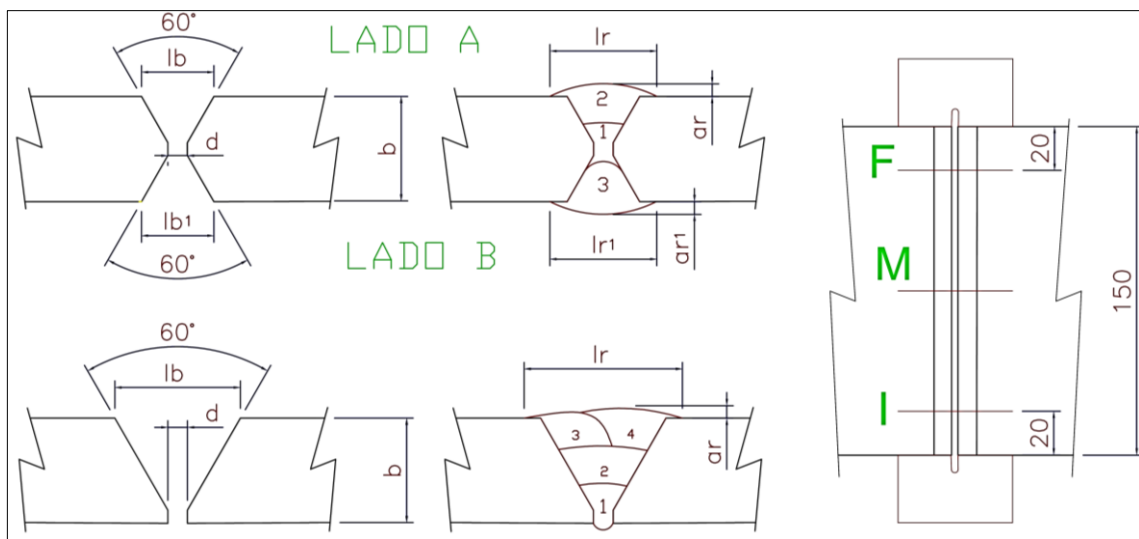


FIGURA 3.22 - Croqui para controle dimensional dos biseis e das juntas soldadas.

### 3.6 Procedimento de análise computacional dos vídeos para monitoramento das distorções ao longo do processo de soldagem dos corpos de prova

Na primeira etapa do procedimento de análise dos vídeos para o monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser foi realizada a identificação dos valores de deslocamento de cada ponto projetado no painel do anteparo pelos sensores a laser. Esta identificação foi realizada com o auxílio do software Auto Cad analisando as imagens geradas pelos *frames* correspondentes aos instantes de 0, 5, 10, 15, 20 e 30. Cada *frame* foi exportado para o ambiente do software, sempre mantendo o ponto de origem no canto inferior esquerdo da imagem. A imagem teve seu tamanho ajustado pela ferramenta de escala do software, até que as distâncias entre os pontos de referências conhecidos do painel atingissem as medidas reais (530 e 510 mm).



Utilizando as ferramentas de precisão do software, foram realizadas as medições do ponto de origem até o centro de cada região verde gerada pelos feixes luminosos (FIG. 3.23). A diferença entre os valores medidos para cada *frame* corresponde aos valores de deslocamentos de cada ponto em função do tempo. Para garantir precisão na localização do centro de cada região verde, está operação foi realizada utilizando uma escala de aumento de 10x (FIG. 3.24).

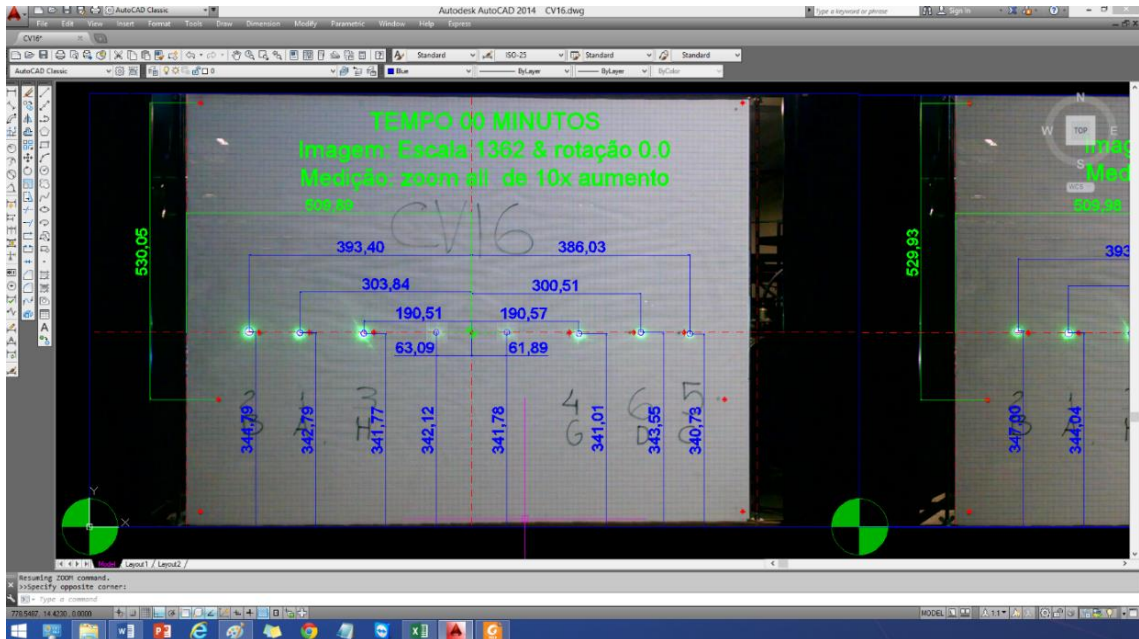


FIGURA 3.23 – Medição dos pontos no *frame* de 0 min. do CV16 utilizando software Auto Cad.

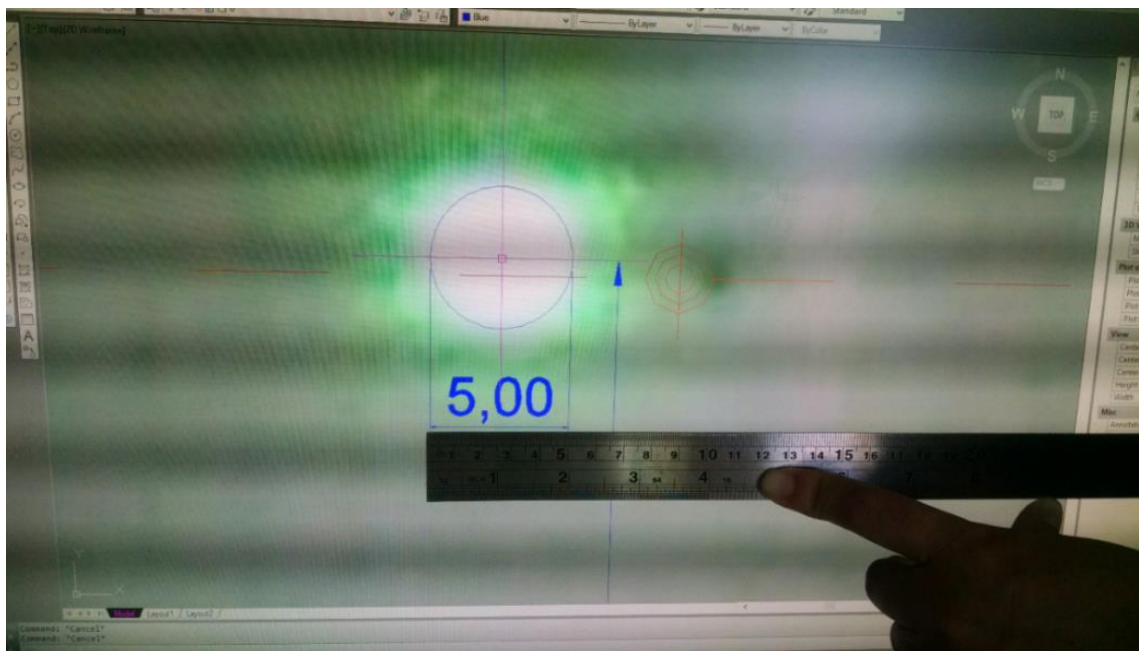


FIGURA 3.24 – Localização do centro do região luminosa com escala de aumento de 10x.

Determinadas as coordenadas dos pontos refletidos no anteparo para cada *frame* é possível na segunda etapa do procedimento de análise dos vídeos determinar retas que melhor se ajustam a cada conjunto de pontos identificado em cada frame através da regressão linear. O ângulo de inclinação da reta obtida pela regressão linear corresponde ao valor da distorção angular do corpo de prova medido pelo sistema de monitoramento utilizando sensores a laser.

Na terceira etapa do procedimento de análise dos vídeos foram elaborados os gráficos de distorção em função do tempo. O processamento do cálculo de regressão linear foi realizado com o auxílio dos *softwares Excel e Matlab*.

### **3.7 Projeção teórica da posição final dos feixes luminosos refletidos no painel do anteparo considerando os ângulos medidos no corpo de prova**

Após medição dos ângulos de distorções dos corpos de prova, foi realizada a previsão da posição final de cada ponto luminoso refletido no painel do anteparo. Esta previsão foi realizada por cálculo trigonométrico considerando apenas a influência das distorções angulares no sentido do eixo “X” ( $\theta_x$ ) e “Y” ( $\theta_y$ ).

Conforme apresentado nas FIG. 3.25 e FIG. 3.26, a distorção angular  $\theta_x$  dos corpos de prova proporciona deslocamentos dos pontos luminosos no sentido dos eixos “X” e “Z”. Já a distorção  $\theta_y$  dos corpos de prova proporciona deslocamentos dos pontos luminosos apenas no sentido do eixo “Z” (FIG. 3.27 FIGURA 3.27 e 3.28). Para facilitar o entendimento dos cálculos que serão apresentados a seguir, os deslocamentos dos pontos luminosos pelo painel do anteparo serão denominados como  $P_x$  para os deslocamentos no sentido do eixo “X” e  $P_z$  para os deslocamentos no sentido do eixo “Z”.

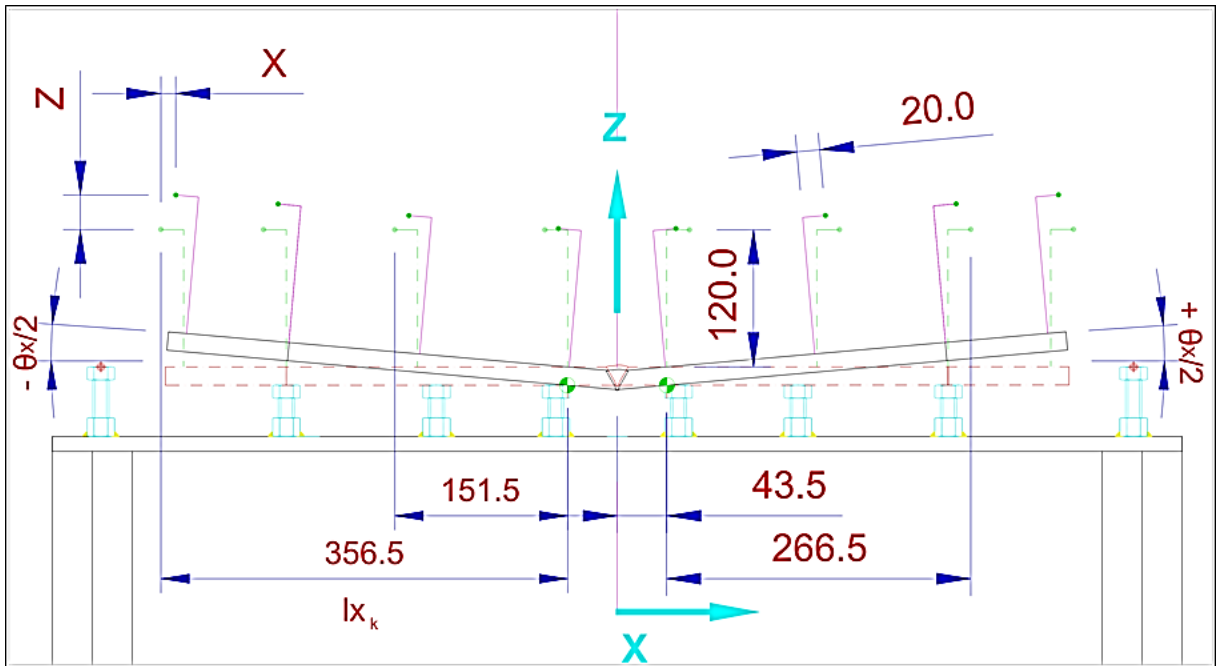


FIGURA 3.25 - Representação esquemática dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo em função das distorções angulares sentido do eixo "X" para os CP com uma junta.

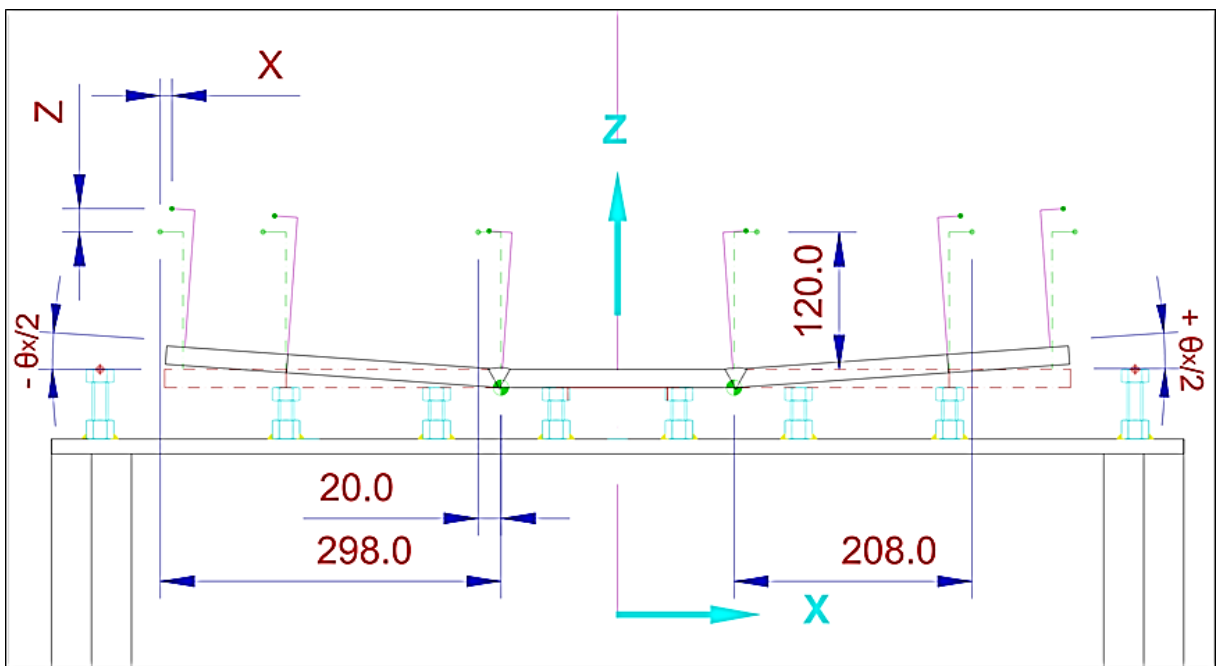


FIGURA 3.26 - Representação esquemática dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo em função das distorções angulares sentido do eixo "X" para os CP com duas junta.



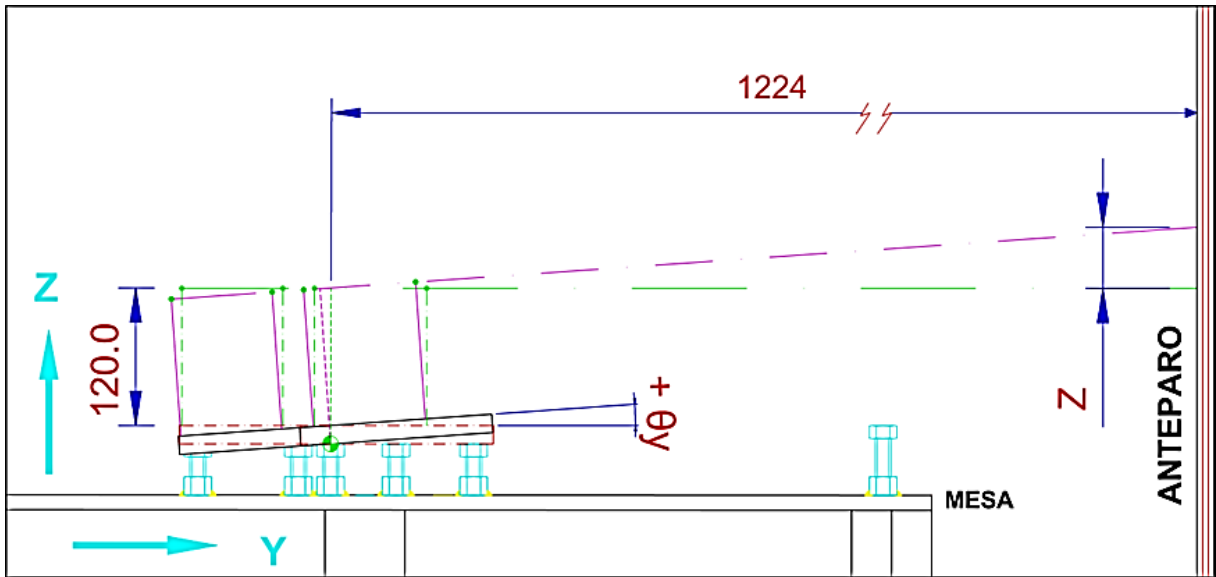


FIGURA 3.27 - Representação esquemática dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo em função das movimentações angulares sentido do eixo “Y” para os CP com uma junta.

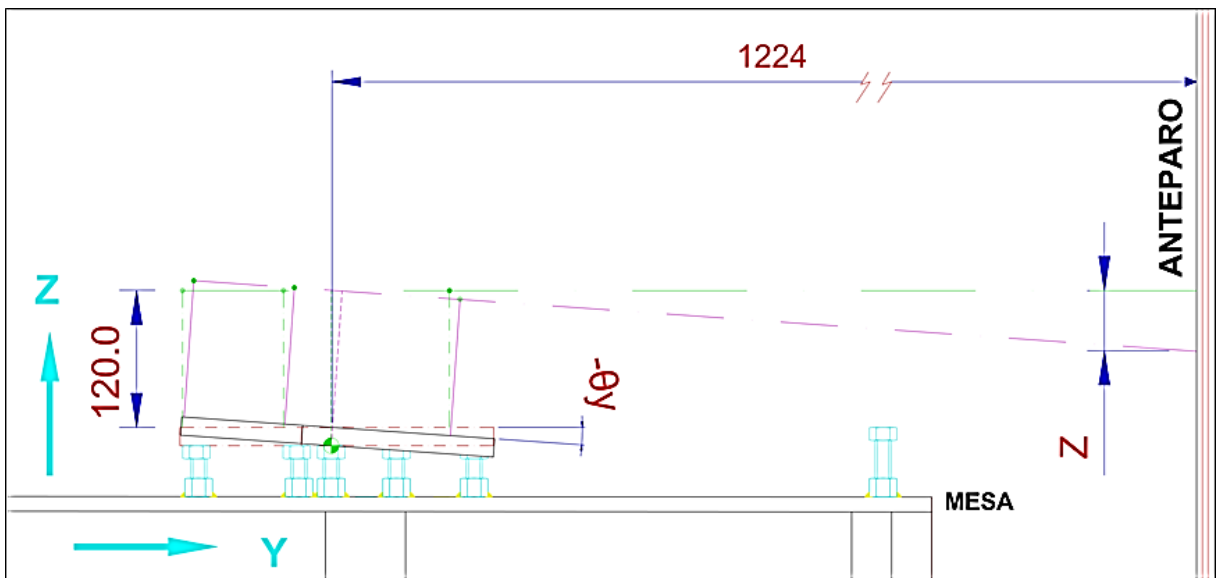


FIGURA 3.28 - Representação esquemática dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo em função das movimentações angulares sentido do eixo “Y” para os CP com duas junta.

A projeção da posição final de um ponto luminoso no painel do anteparo depende da amplitude das distorções e da posição do sensor laser sobre o corpo de prova. O par de coordenadas da posição final de um ponto refletido no painel do anteparo é igual à soma dos deslocamentos proporcionados pelas distorções dos corpos de prova, conforme apresentado nas EQ. (3.5).

$$\left( \begin{array}{l} Px = Xn \\ Pz = Zy + Zn \end{array} \right) \quad (3.5)$$

Onde:

- $P_x$  – coordenada “X” da posição final do ponto no plano do painel;
- $P_z$  – coordenada “Z” da posição final do ponto no plano do painel;
- $X_n$  – deslocamento no eixo “X” do painel ocasionados pela distorção  $\theta_x/2$ ;
- $Z_n$  – deslocamento no eixo “Z” do painel ocasionados pela distorção  $\theta_x/2$ ;
- $Z_y$  – deslocamento no eixo “Z” do painel ocasionados pela distorção  $\theta_y$ .

O deslocamento  $Z_y$  ocasionado pela distorção  $\theta_y$  pode ser determinado pela relação trigonométrica apresentada nas EQ. (3.6) e ilustrada esquematicamente na FIG. 3.29.

$$Z_y = \tan \theta_y \cdot l_y \quad (3.6)$$

Onde,  $l_y$  é a distância do centro do sensor laser até o anteparo, após soldagem. Considerando a expressão de  $l_y$  apresentada na FIG. 3.29, tem-se:

$$Z_y = \tan \theta_y \left( 1224 + \left( \tan \frac{\theta_y}{2} \times 120 \right) \right) \quad (3.7)$$

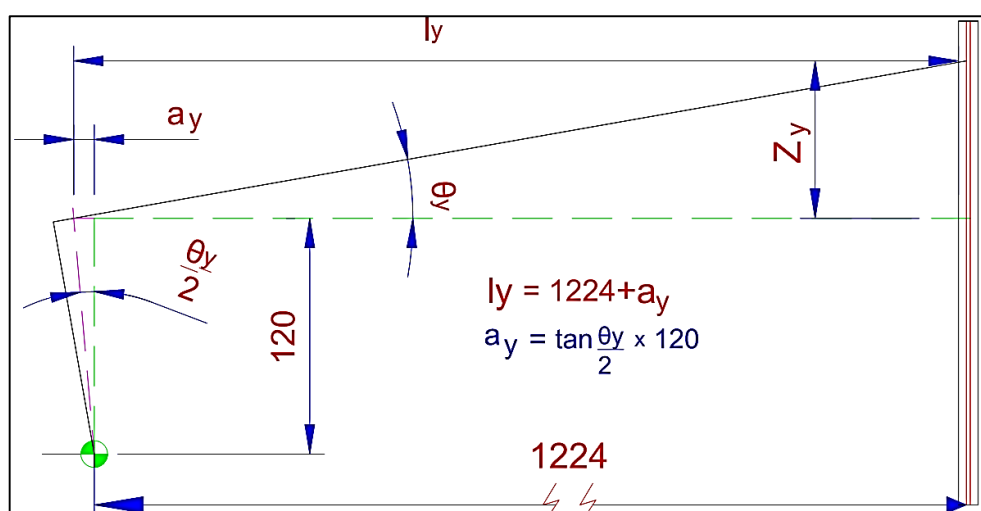


FIGURA 3.29 – Esquema para cálculo do deslocamento  $Z_y$  em função da distorção  $\theta_y$ .

Para determinar os valores de deslocamento  $X_n$  e  $Z_n$ , FIG. 3.30a, ocasionados pela distorção  $\theta_x/2$ , foram utilizadas as relações trigonométricas apresentadas na EQ. (3.8) e ilustradas esquematicamente em 4 etapas na FIG. 3.30.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Xn} = \sin\left(\beta_n + \frac{\theta_x}{4}\right) \times k_n \\ \mathbf{Zn} = \cos\left(\beta_n + \frac{\theta_x}{4}\right) \times k_n \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

O ângulo  $\beta_n$  é o ângulo de inclinação do segmento ( $\bar{a}j$ ) formado entre o centro do sensor laser e o ponto onde ocorre a articulação da distorção angular conforme apresentado na FIG. 3.30b, sendo determinado pela EQ. (3.9).

$$\beta_n = \arctan\left(\frac{120}{lx_n}\right) \quad (3.9)$$

Onde,  $lx_n$  é a distância no eixo “X” do centro de cada sensor laser ao ponto onde ocorre a articulação da distorção angular, apresentados nas FIG. 3.25 e FIG. 3.26.

A reta  $k_n$  é o segmento entre ponto de posição inicial e final de um ponto luminoso refletido pelos sensores a laser, FIG. 3.30c, e pode ser determinado pela EQ. (3.10).

$$k_n = \sin\left(\frac{\theta_x}{4}\right) \times m_n \times 2 \quad (3.10)$$

Onde,  $m_n$  é o comprimento da reta  $\bar{a}j$ , FIG. 3.30d, que pode ser determinado pela EQ. (3.11).

$$m_n = \sqrt{(120^2 + lx_n^2)} \quad (3.11)$$

Realizando a substituição dos termos  $m_n$ ,  $\beta_n$  e  $k_n$  na EQ.(3.8) tem-se:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Xn} = \sin\left(\arctan\left(\frac{120}{lx_n}\right) + \frac{\theta_x}{4}\right) \times \left(\sin\left(\frac{\theta_x}{4}\right) \times \sqrt{(120^2 + lx_n^2)} \times 2\right) \\ \mathbf{Zn} = \cos\left(\arctan\left(\frac{120}{lx_n}\right) + \frac{\theta_x}{4}\right) \times \left(\sin\left(\frac{\theta_x}{4}\right) \times \sqrt{(120^2 + lx_n^2)} \times 2\right) \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

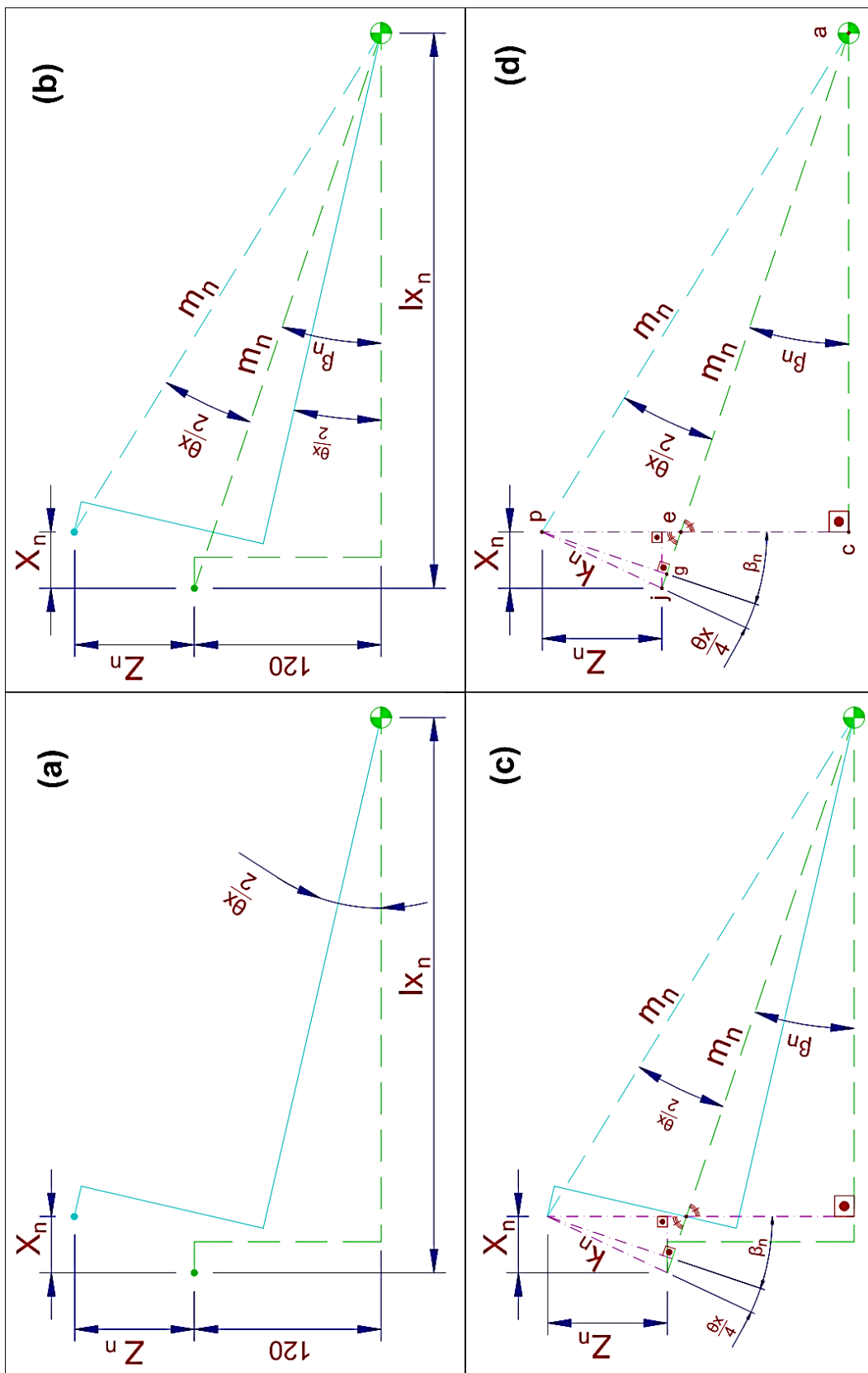


FIGURA 3.30 – Representação esquemática das relações trigonométricas para os cálculos de projeção teórica da posição final dos pontos luminosos refletidos no painel do anteparo: a) Deslocamento  $X_n$  e  $Z_n$  ; b) Ângulo  $\beta_n$ ; c) Reta  $Kn$  ; d) Definição dos pontos em cada vértice.

### **3.8 Comprovação, por análise estatística de teste de hipótese, da eficiência do sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser**

Para verificar se os valores finais das distorções angulares medidos pelo sistema de monitoramento contínuo utilizando sensores a laser estão coerentes com os valores das distorções angulares medidos pelos instrumentos de medição, foi realizada a análise comparativa entre esses valores obtidos.

Essa comparação visou confirmar se os resultados apresentados sustentam a condição de serem estatisticamente iguais e conseqüentemente podem ser aceitos para a comprovação da eficiência do sistema de monitoramento das distorções de soldagem utilizando sensores a laser. De forma geral, a análise consiste em verificar se as amostras podem ser consideradas como provenientes da mesma população.

Primeiramente, foi realizada a comparação entre os valores de distorção medidos com os instrumentos medição e o SMCDS para cada corpo de prova. Para essa comparação foi utilizado o teste de hipótese de uma média com desvio-padrão desconhecido com distribuição amostral de *t* de *Student* (TAVARES, 2011). Em função do corpo de prova CV11 ter sido soldado com diferentes parâmetros de soldagem, foi realizado ainda a comparação entre os valores médios de distorções verificados nos CV12 à CV16 e o valor médio de distorção verificado no CV11, a fim de comprovar a influência dos parâmetros de soldagem nas distorções.

Posteriormente, foi realizada a comparação entre os valores médios de distorções medidos com os instrumentos de medição e o SMCDS para cada tipo de corpo de prova (CV1, CV2 e CX1). O teste de hipótese utilizado foi o comparativo entre duas médias considerando amostras independentes e pequenas, com variâncias populacionais desconhecidas, estatisticamente iguais ou desiguais. Para verificar a igualdade estatística entre as variâncias populacionais de duas amostras foi utilizando a distribuição F (TAVARES, 2011).

Foram realizados testes de hipóteses entre as médias dos valores de distorção para os três tipos de construção dos corpos de prova (CV1 x CV2 & CV1 x CX1) a fim de comprovar estatisticamente a influência do tipo e da quantidade de junta nos valores de distorção angular.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Testes iniciais de soldagem para ajustes dos parâmetros de soldagem

Baseado na EPS do Grupo DELP, foram definidos os parâmetros de soldagem para a primeira etapa dos testes iniciais de soldagem conforme apresentado na TAB. 4.1. Nesta primeira etapa foram soldados dois corpos de prova retangulares de cada tipo de junta (RV11, RV12, RX11 e RX12).

TABELA 4.1 - Parâmetros iniciais de soldagem.

PARÂMETROS		JUNTA X			JUNTA V			
DESCRIÇÃO	INCERTEZA	1º PASSO RAIZ	2º PASSO ACABAMENTO	3º PASSO ACABAMENTO	1º PASSO RAIZ	2º PASSO REFORÇO	3º PASSO ACABAMENTO	4º PASSO ACABAMENTO
TENSÃO	±0,5 V	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1
CORRENTE	± 3 A	235	235	235	235	235	235	235
STICK OUT	± 0,1 mm	17	17	17	17	17	17	17
VELOCIDADE DE SOLDAGEM	± 0,3 mm/s	5	3,3	2,7	5	2,7	3,3	3,3
VAZÃO DE GÁS	± 0,5 l/min	16	16	16	16	16	16	16
AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO	± 0,3 mm	4	-	-	4	-	-	-
FREQÜÊNCIA DE OSCILAÇÃO	(Hz)	2	-	-	2	-	-	-
TEMPERATURA ENTRE PASSES	± 10 °C	170	240	300	170	240	300	300
APORTE TÉRMICO	(kJ/mm)	0,93	1,42	1,73	0,93	1,73	1,42	1,42
OBSERVAÇÕES	1 - PARA SOLDAGEM DO PASSE DE RAIZ UTILIZAR ANTEPARO CERÂMICO (BACK) 2 - TÉCNICA DE SOLDAGEM EMPURRANDO 3 - $\eta = 90\%$							

Para verificar o perfil das juntas soldadas foram realizados ensaios metalográficos de macrografia. A posição de retirada das amostras está representada na FIG. 4.1. Conforme pode ser observado nas macrografias da FIG. 4.2, as juntas soldadas apresentam defeitos de porosidade e falta de fusão. Portanto, os parâmetros apresentados na TAB. 4.1 foram considerados insatisfatórios e novos testes foram realizados.

Marques et al.(2009) citam as principais causas que ocasionam porosidades e falta de fusão na soldagem como sendo: a falta de limpeza da junta; falta ou excesso de proteção gasosa; aporte térmico insuficiente e falta de acesso do arco a junta em soldagem multipasses. Baseado nestas causas, os parâmetros de soldagem foram alterados da seguinte forma: redução *stick out*, aumento da vazão de gás, tensão e corrente. Além disso, foi acrescentada a limpeza entre passes por escovamento manual. A TAB. 4.2 apresenta os novos parâmetros de soldagem.

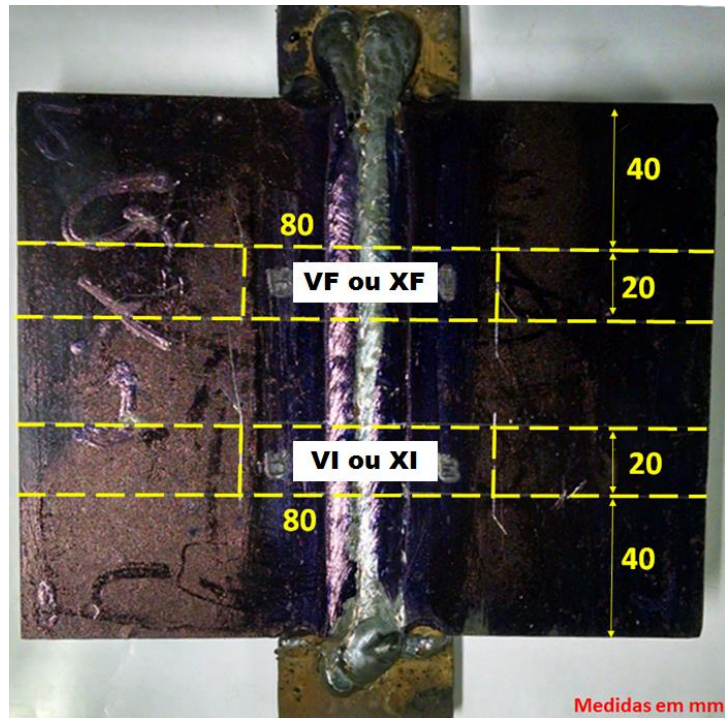


FIGURA 4.1 – Posição de retirada das amostras.

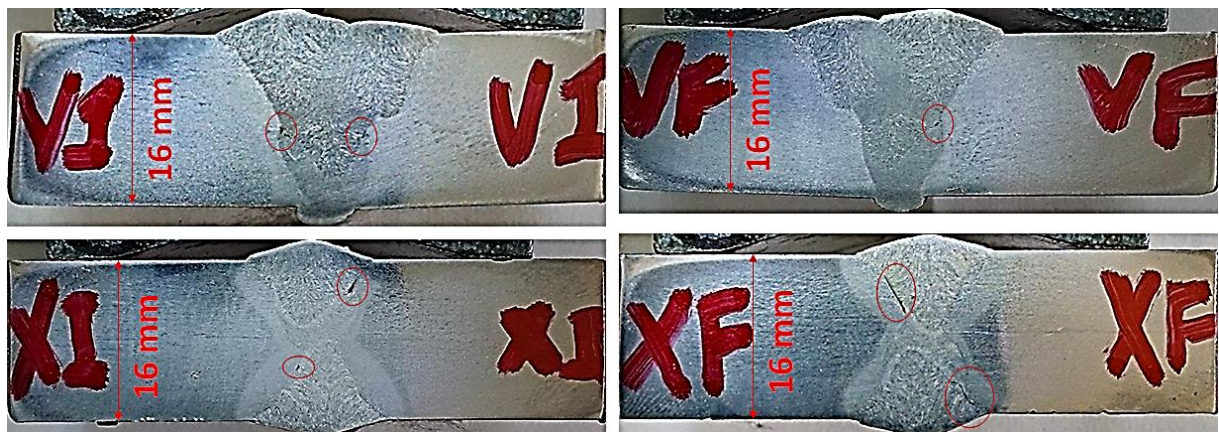


FIGURA 4.2 - Macrografias das juntas em “V” e “X” soldadas com os parâmetros da TAB. 4.1.

TABELA 4.2 – Parâmetros de soldagem ajustados.

PARÂMETROS		JUNTA X			JUNTA V			
DESCRIÇÃO	INCERTEZA	1º PASSO RAIZ	2º PASSO ACABAMENTO	3º PASSO ACABAMENTO	1º PASSO RAIZ	2º PASSO REFORÇO	3º PASSO ACABAMENTO	4º PASSO ACABAMENTO
TENSÃO	±0,5 V	22,1	24,2	24,2	22,1	24,2	24,2	24,2
CORRENTE (A)	± 3 A	235	280	280	235	280	280	280
STICK OUT (mm)	± 0,1 mm	13	13	13	17	13	13	13
VELOCIDADE DE SOLDAGEM	± 0,3 mm/s	5	3,7	3	5	3	3,7	3,7
VAZÃO DE GÁS	± 0,5 l/min	18	18	18	18	18	18	18
AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO (mm)	± 0,3 mm	4	-	-	4	-	-	-
FREQUENCIA DE OSCILAÇÃO (Hz)	-	2	-	-	2	-	-	-
TEMPERATURA ENTRE PASSES	± 10 °C	170	300	300	170	300	300	300
APORTE TÉRMICO(kJ/mm)	-	0,93	1,65	2,03	0,93	2,03	1,65	1,65
OBSERVAÇÕES	1 - PARA SOLDAGEM DO PASSE DE RAIZ UTILIZAR ANTEPARO CERÂMICO (BACK) 2 - TÉCNICA DE SOLDAGEM EMPURRANDO 3 - $\eta = 90\%$							



Para a segunda etapa dos testes iniciais de soldagem, foram soldados mais dois corpos de prova (RV14 e RX14). Conforme pode ser observado nas macrografias da FIG. 4.3, as juntas soldadas não apresentaram descontinuidades.

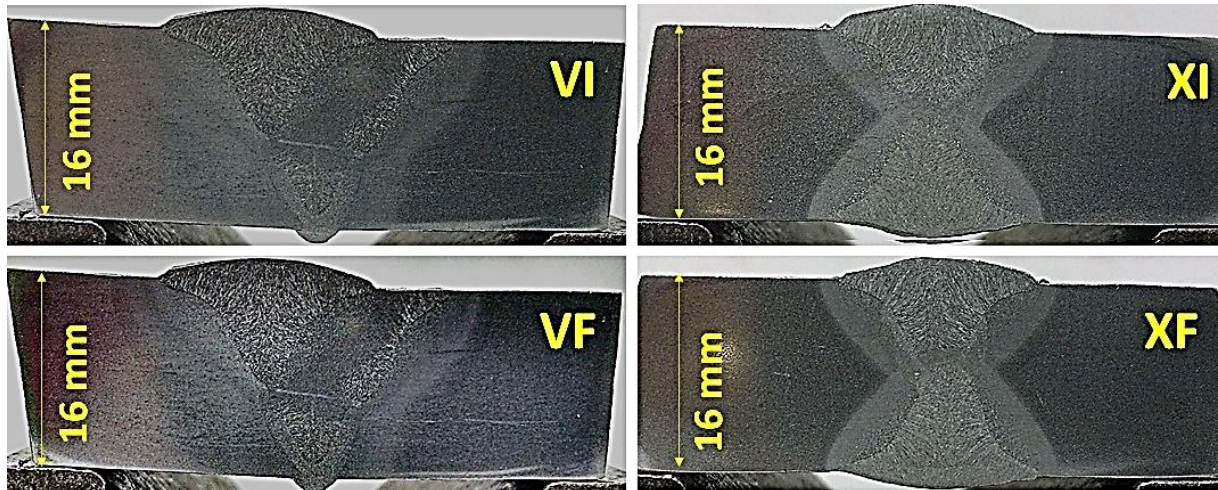


FIGURA 4.3 – Macrografias das juntas em “V” e “X” soldadas com os parâmetros da TAB. 4.2

Para comprovar a eficiência das alterações realizadas nos parâmetros de soldagem, foi calculado a taxa de diluição pela EQ. (3.1) para as macrografias de dois corpos de prova da primeira etapa dos testes (CV12 e CX12) e dos dois corpos de prova da segunda etapa dos testes (CV14 e CX14) (FIG. 4.4 FIGURA 4.4).

Para a junta em “V” a taxa de diluição aumentou de 30,4% para 36,6% e para a junta em “X” a taxa de diluição aumentou de 19,5% para 24% com as alterações nos parâmetros de soldagem. Portanto, os parâmetros de soldagem apresentados na TAB. 4.2 foram melhores para as soldagens experimentais de monitoramento das distorções deste trabalho.

Na terceira etapa dos testes iniciais, foram realizadas as soldagens de mais dois corpos de prova retangular (RV13 e RX13) para ajuste final do perfil do reforço do cordão de solda e o monitoramento das temperaturas e tempo de resfriamento conforme descrito na metodologia do capítulo anterior. A FIG. 4.5 apresenta o dimensionamento das juntas soldadas e a sequências de passes utilizadas para o enchimento das juntas em “X” e “V”.



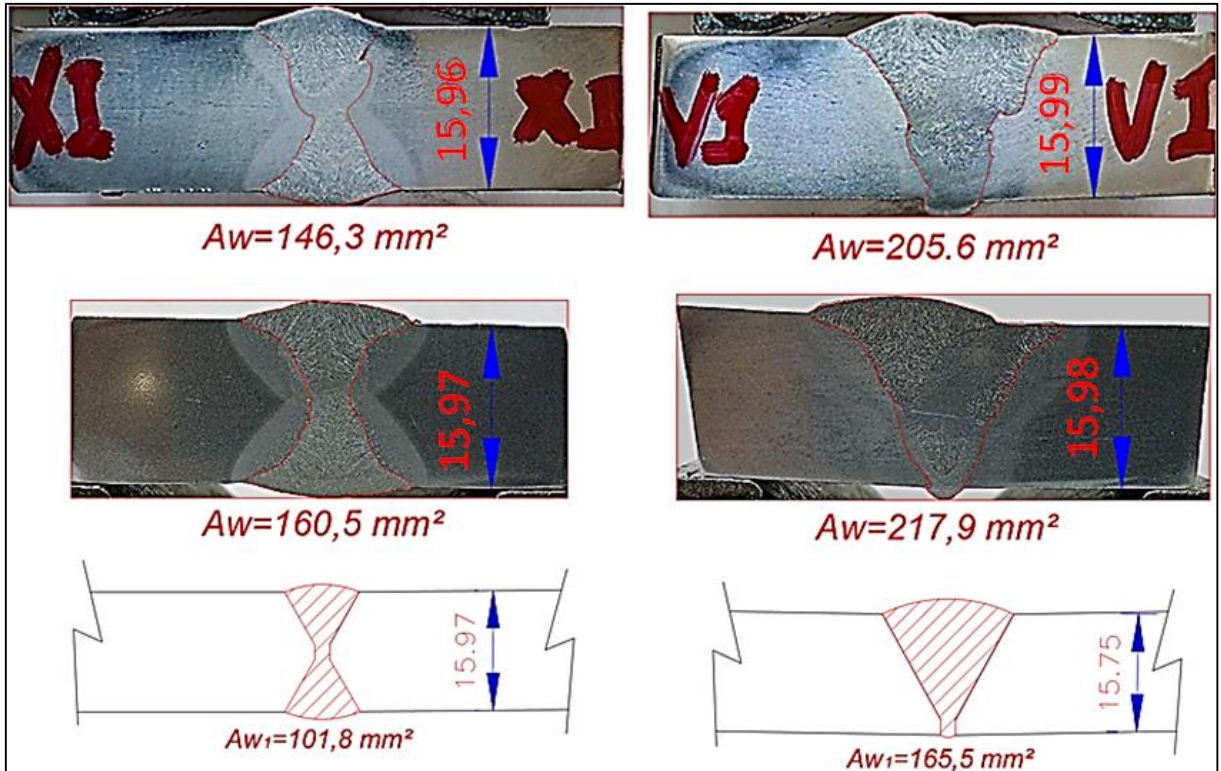


FIGURA 4.4 - Cálculo da área da secção transversal das juntas.

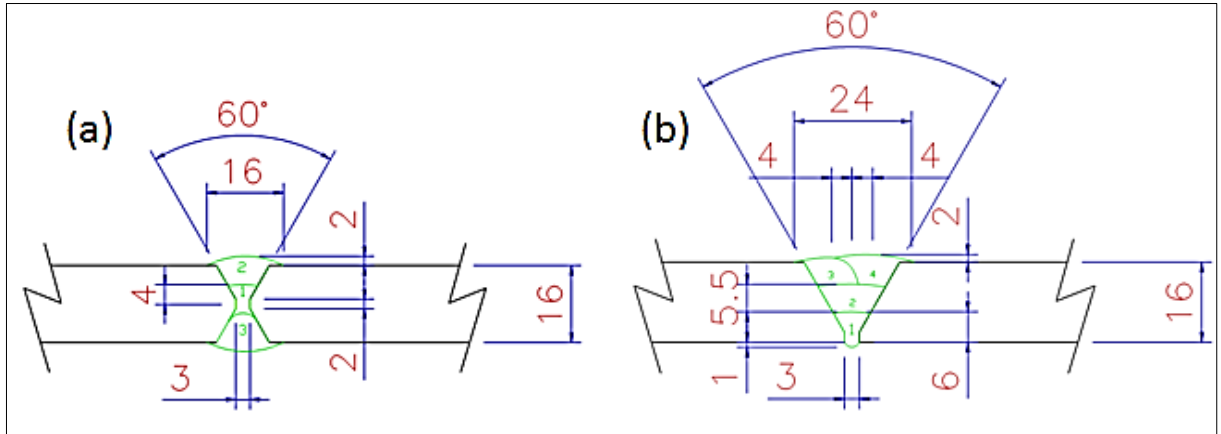


FIGURA 4.5 – Sequência de soldagem dos cordões de solda nas juntas em “X” e “V”.

Durante a soldagem da terceira etapa foi monitorada a temperatura ao final de cada passe de solda utilizando o termômetro de infravermelho, na linha de centro do cordão de solda e à 40 mm da linha de centro do cordão de solda. A maior temperatura verificada no centro do cordão foi de acima de 550° para junta em “V” e de  $400 \pm 10^\circ\text{C}$  para a junta em “X”.

Para a distância à 40 mm da linha de centro do cordão de solda as maiores temperaturas verificadas foram de  $230 \pm 10^\circ\text{C}$  e de  $205 \pm 10^\circ$  para as juntas em “V” e “X”, respectivamente,

conforme apresentado na TAB.4.3. Como a temperatura máxima de trabalho do sensor laser é de 50°C, as proteções térmicas foram necessárias para garantir o seu funcionamento durante a soldagem.

TABELA 4.3 – Monitoramento da temperatura logo após finalizado cada passe de solda.

TEMPERATURA ENTRE PASSES NO CENTRO DA SOLDA & À 40 mm DO CENTRO DA SOLDA (°C)								
		Após 1º passe	Após 2º passe	Após 3º passe	Após 4º passe	Após 15 min	Após 20 min	Após 30 min
CV	Centro da solda	180	400	435	>550	180	135	100
	40mm do centro da solda	130	190	210	230	160	110	95
CX (Lado A)	Centro da solda	175	330	-	-	105	-	-
	40 mm do centro da solda	125	180	-	-	95	-	-
CX (Lado B)	Centro da solda	400	-	-	-	95	-	-
	40 mm do centro da solda	205	-	-	-	90	-	-

Além do monitoramento da temperatura no centro do cordão de solda, também foi monitorado intervalo de tempo necessário para que cada passe de solda atingisse a temperatura de entrepasses especificada na EPS (300° C). Foi monitorado também o tempo de arco aberto e o tempo de resfriamento para que a temperatura da chapa ao final da filmagem seja sempre inferior que 110°C, conforme apresentado na TAB. 4.4. Para garantir a repetibilidade do tempo de intervalo entre passes, o mesmo foi inserido nos programas de soldagem.

TABELA 4.4 – Intervalos de tempo durante o processo de soldagem e resfriamento.

TEMPO DAS SEQUÊNCIAS DE SOLDAGEM				
SEQUÊNCIA	CV1	CV2	CX1 LADO A	CX1 LADO B
1º passe (s)	40	80	40	55
Intervalo entre passes (s)	30	15	30	-
2º passe (s)	67	134	55	-
Intervalo entre passes (s)	120	60	-	-
3º passe (s)	55	110	-	-
Intervalo entre passes (s)	160	80	-	-
4º passe (s)	55	110	-	-
Tempo total de soldagem (s)	527	589	125	55
<b>Tempo total soldagem (min)</b>	<b>8,8</b>	<b>9,8</b>	<b>2,1</b>	<b>0,9</b>
<b>Tempo de resfriamento (min)</b>	<b>21,2</b>	<b>20,2</b>	<b>12,9</b>	<b>14,1</b>
<b>Tempo total (min)</b>	<b>30,0</b>	<b>30,0</b>	<b>15,0</b>	<b>15,0</b>

#### 4.2 Testes experimentais de soldagem para monitoramento das distorções

Para os testes experimentais de soldagem para o monitoramento contínuo das distorções foram realizadas as soldagens de seis corpos de prova com uma junta e chanfro em “V” (CV11 a CV16), três corpos de prova com uma junta e chanfro em “X” (CX11 a CX13) e três corpos de prova com duas juntas e chanfro em V (CV21 a CV23). A FIG. 4.6 apresenta os corpos de prova após finalizada a soldagem.

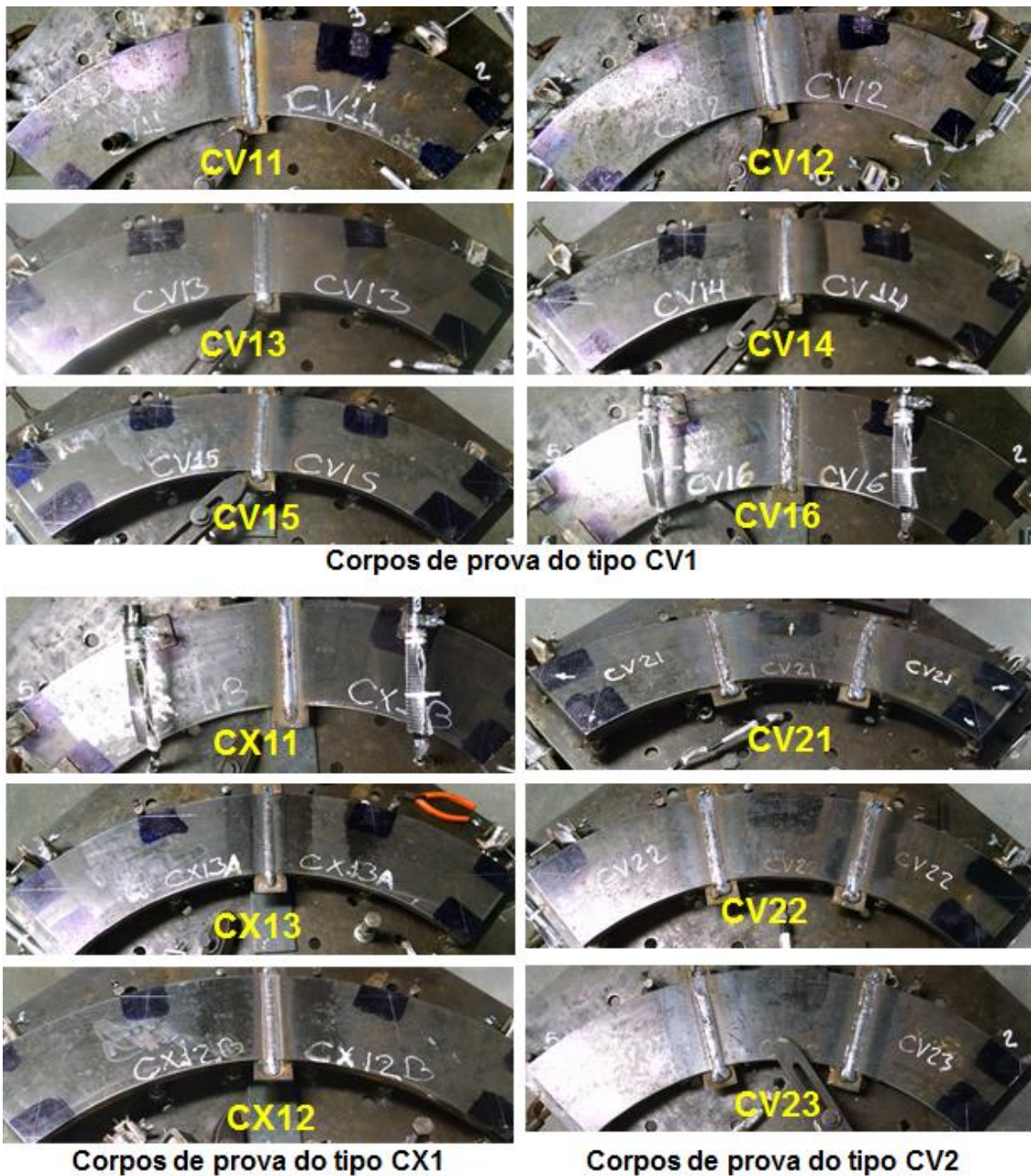


FIGURA 4.6 – Corpos de prova soldados.

Os programas de soldagem executados foram configurados com os parâmetros de soldagem apresentados na TAB. 4.2. As sequências de soldagem foram configuradas conforme FIG. 4.5 sempre no sentido do raio interno para o raio externo do anel segmentado. Para os corpos de prova com duas juntas, a sequência de soldagem foi realizada alternando os passes entre as duas juntas. Foi configurado ainda nos programas de soldagem os intervalos de tempo apresentados na TAB. 4.4, que garantiram uma temperatura de  $300^{\circ}\pm 10^{\circ}\text{C}$  entre passes.

Os valores obtidos do controle das dimensões externas dos corpos de prova e controle dimensional dos biseis e reforços de solda de cada corpo de prova estão apresentados nas TAB. 7.4 à TAB. 7.9 do apêndice 05. Para a soldagem do primeiro corpo de prova com uma junta e chanfro em “V” (CV11) foi selecionado um programa de soldagem configurado com os parâmetros de soldagem da TAB. 4.1, que apresenta menores aportes térmicos. Desta forma, espera-se menores amplitudes de distorções para este corpo de prova.

#### 4.2.1 Monitoramento das distorções de soldagem utilizando instrumentos de medição

O controle dimensional das distorções utilizando instrumentos de medição antes e após soldagem visa a reprodução dos métodos utilizados nas indústrias e laboratórios de soldagem. A medição realizada antes da soldagem permite desconsiderar as distorções já presentes nos corpos de prova provenientes dos processos de preparação e montagem. Os valores de distorções angulares obtidos para cada corpo de prova antes e após soldagem utilizando o inclinômetro digital com a peça apoiada sobre a mesa de desempenho estão apresentados nas TAB. 7.10 à TAB. 7.12 do Apêndice 06.

Os valores de distorções angulares obtidos para cada corpo de prova pelo monitoramento dos pontos sobre os corpos de prova, para posicionamento dos sensores a laser, antes e após soldagem utilizando a FPM e o relógio comparador acoplados ao braço robótico estão apresentados nas TAB. 7.13 à TAB. 7.15 do Apêndice 07. Os valores de distorções angulares obtidos para cada corpo de prova antes e após soldagem utilizando o inclinômetro digital com a peça apoiada sobre a mesa de trabalho estão apresentados nas TAB. 7.16 à TAB. 7.18 do Apêndice 08.

Os GRA. 4.1, GRA. 4.2 e GRA. 4.3 representam os valores médios das distorções angulares para cada corpo de prova calculados a partir das três medições realizadas com os diferentes

tipos de instrumentos de medição apresentados nas TAB. 7.19 à TAB. 7.21 do Apêndice 09. As barras vermelhas representam os valores de distorções ocorridos no lado esquerdo ( $-\theta x/2$ ) e as barras verdes as distorções ocorridas no lado direito ( $+\theta x/2$ ) do corpo de prova. A distorção total ( $\theta x$ ) é representada pelas barras azuis.

Para o cálculo do valor médio entre os corpos de prova do tipo CV1 não foi considerado o valor do CV11, pois conforme já relatado anteriormente, este corpo de prova foi soldado com parâmetros de soldagem que apresentam menores aportes térmicos que os demais. Conforme pode ser observado, a dispersão de apenas  $0,1^\circ$  entre os valores de distorção para os CV12 à CV16 é pequena, indicando a repetibilidade dos testes experimentais assim como a preparação e montagem dos corpos de prova. O valor médio entre os cinco corpos de prova do tipo CV1 está apresentado nas ultimas barras em destaque no GRA. 4.1.

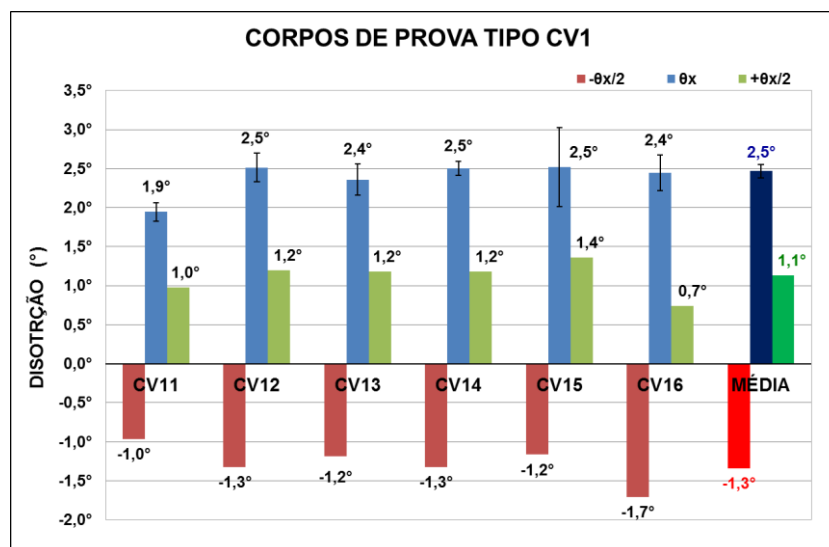


GRÁFICO 4.1- Valores médios de distorção angular para os corpos de prova tipo CV1 calculados a partir das três medições realizadas com diferentes tipos de instrumentos de medição.

Para verificar se o valor médio de distorção entre os CV12 a CV16 é significativamente diferente do valor de distorção do CV11, foi realizado um teste de hipótese de uma média com desvio-padrão desconhecido. Os cálculos estatísticos apresentados na TAB. 7.32 do Apêndice 13, permitem afirmar com 95% de confiabilidade que o valor médio da distorção angular verificado para o CV11 é diferente do valor médio de distorção verificado para os CV12 à CV16, este resultado confirma a influência dos parâmetros de soldagem apresentados nas TAB. 4.1 e TAB. 4.2 sobre a distorção angular (YANG, et al., 2014).



Conforme pode ser observado no GRA. 4.2, a diferença de 0,2° entre os valores de distorção dos corpos de prova CX11 à CX13 é pequena, indicando a repetibilidade dos testes experimentais assim como a preparação e montagem dos corpos de prova. Conforme apresentado na TAB. 4.2, na soldagem do chanfro do lado “A” foram utilizados dois passes de solda que apresentam menores aportes térmicos que o passe de solda utilizado para soldar o lado “B”. Os maiores valores de distorção para o lado “B” representado pela barras verdes no GRA. 4.2, confirmam novamente a influência dos parâmetros de soldagem sobre a distorção angular.

A distorção média final para os corpos de prova tipo CX1, é obtida pela diferença entre a distorção média ocorrida no lado “B” e a distorção média ocorrida no lado “A”, pois estas duas distorções apresentam sentidos opostos quando a peça é virada para soldagem em ambos os lados. Considerando os valores médios apresentados nas últimas barras em destaque no GRA. 4.2, o valor médio de distorção final  $\theta_x$  para o corpo de prova tipo CX1 é de 0,5°. Esse valor de distorção é o menor entre os três tipos de corpo de prova (CV1, CX1 e CV2).

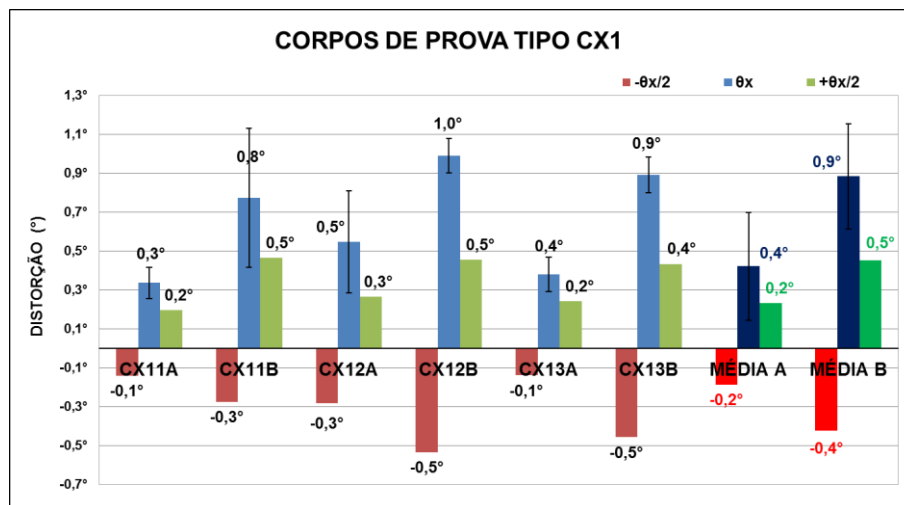


GRÁFICO 4.2- Valores médios de distorção angular para os corpos de prova tipo CX1 calculados a partir das três medições realizadas com diferentes tipos de instrumentos de medição.

Conforme pode ser observado, GRA. 4.3, a diferença de 0,1° entre os valores de distorção dos CV21 à CV23 também é pequena, indicando novamente a repetibilidade dos testes experimentais, assim como a preparação e montagem dos corpos de prova. O valor médio entre estes três corpos de prova está apresentado nas últimas barras em destaque no GRA. 4.3 e apresenta os maiores valores de distorção entre os três tipos de corpo de prova.

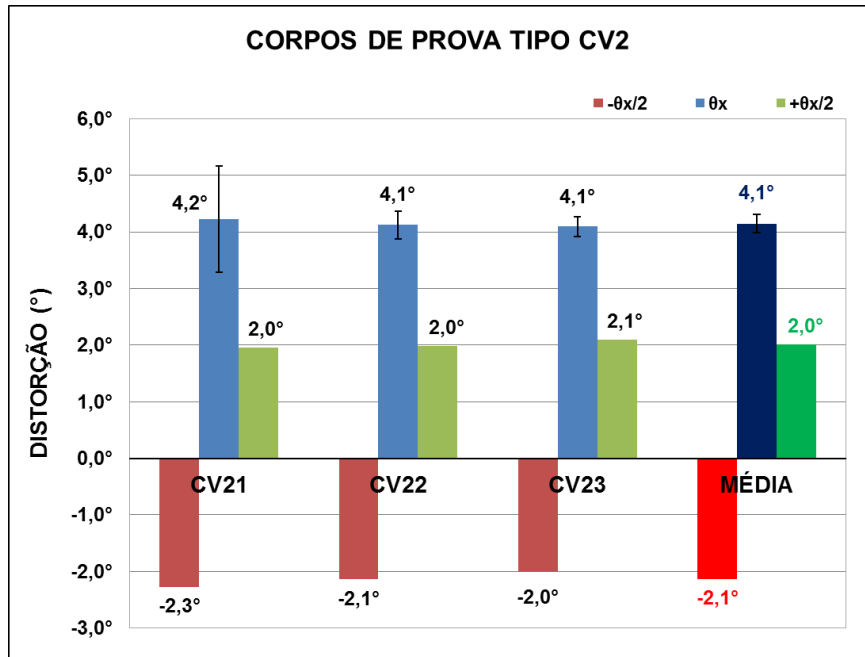


GRÁFICO 4.3- Valores médios de distorção angular para os corpos de prova tipo CV2 calculados a partir das três medições realizadas com diferentes tipos de instrumentos de medição.

#### 4.2.2 Monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para os corpos de prova tipo CV1

Os resultados detalhados serão apresentados apenas para o corpo de prova CV12, a fim de exemplificar a análise dos dados obtidos pelo sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser. O resumo e discussão dos resultados para os seis corpos de prova tipo CV1 serão sumarizados na sequência.

Na primeira etapa do monitoramento contínuo das distorções de soldagem foram identificados os valores de deslocamento de cada ponto projetado no painel do anteparo pelos sensores a laser. Esta identificação foi realizada nas imagens geradas pela discretização do vídeo, utilizando os frames correspondente aos intervalos de 0, 5, 10, 15, 20 e 30 minutos com auxílio do *software Auto CAD*, conforme descrito na metodologia. Os resultados estão apresentados nas TAB. 7.23 do Apêndice 10. O GRA. 4.4 permite visualizar em três dimensões, o deslocamento dos pontos refletidos no painel do anteparo em função do tempo.

Conhecendo a localização de cada ponto projetado no painel, é possível determinar retas que melhor se ajustam a estes conjuntos de pontos pela regressão linear. O ângulo de inclinação de cada reta obtida pela regressão linear corresponde ao valor da distorção angular do corpo de



prova, sendo a distorção total dada pela soma do módulo dos valores de distorção angular encontrado em cada lado do corpo de prova conforme EQ. (3.3). Os cálculos de regressão linear foram processados com o auxílio do *software Excel* e os resultados também estão apresentados na TAB. 7.23 do Apêndice 10.

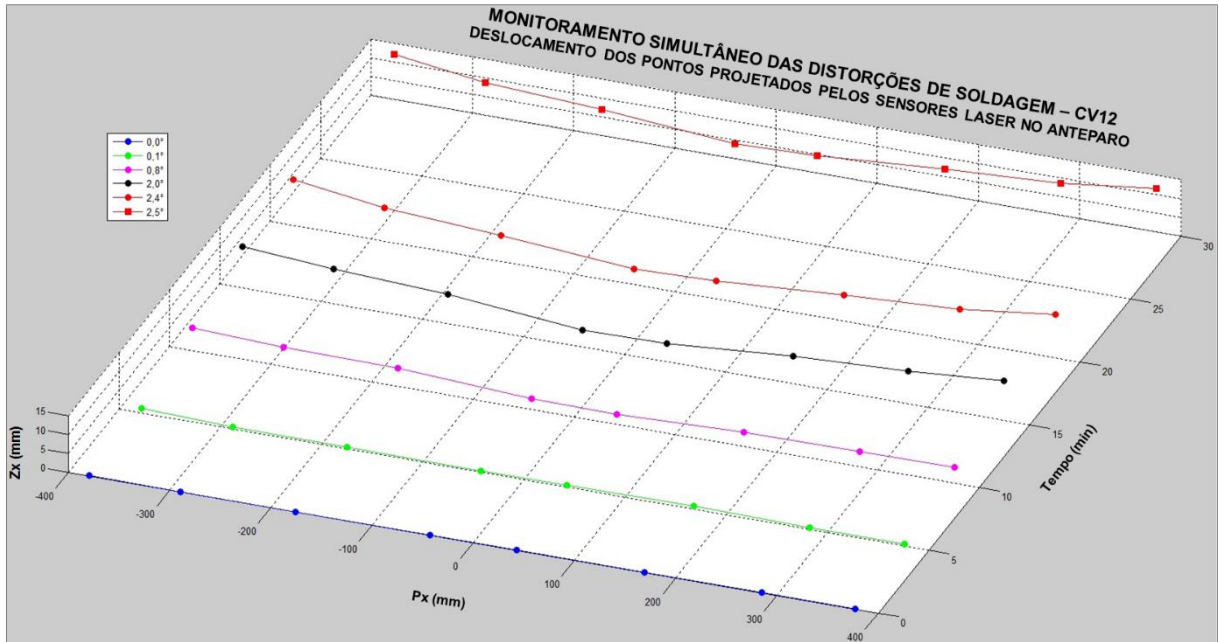


GRÁFICO 4.4- Representação em três dimensões dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo – CV12.

O GRA. 4.5 apresenta as retas e os coeficientes da regressão linear para cada intervalo de tempo. Cada reta possui um conjunto de quatro pontos que corresponde a quantidade de sensores a laser posicionados em cada lado do corpo de prova. O GRA. 4.5 apresenta ainda as duas retas obtidas pela regressão linear dos pontos de projeção teórica, calculados pela EQ. (3.12) e apresentados na TAB. 7.25 do Apêndice 11.

Como pode ser observado, GRA. 4.5, a altura dos pontos e a inclinação das retas da regressão linear da projeção teórica são semelhantes aos pontos e a reta da regressão linear da projeção real no instante de 30 minutos. Para o lado direito do corpo de prova os pontos da projeção teórica estão acima dos pontos refletidos no instante de 30 minutos. Já para o lado esquerdo do corpo de prova de prova, os pontos da projeção teórica estão abaixo dos pontos refletidos no instante de 30 minutos.

Com os valores de distorções angulares medidos pelo SMCDS para diferentes intervalos de tempo, foi elaborado o GRA. 4.6 que apresenta a relação das distorções de soldagem em função

do tempo. Os marcadores com formatos circulares representam a distorção total ( $\theta_x$ ) e os marcadores com formatos quadrados e triangulares representam as distorções do lado direito ( $+\theta_{x/2}$ ) e esquerdo ( $-\theta_{x/2}$ ), respectivamente, do corpo de prova conforme ilustrado nas FIG. 3.17 e FIG. 3.19. A linha vertical tracejada no tempo de 8,8 minutos, GRA. 4.6, indica o instante em que foi finalizado o último passe de solda. Para comparação, foi inserido neste gráfico os valores médios das distorções angulares medidos pelos instrumentos de medição.

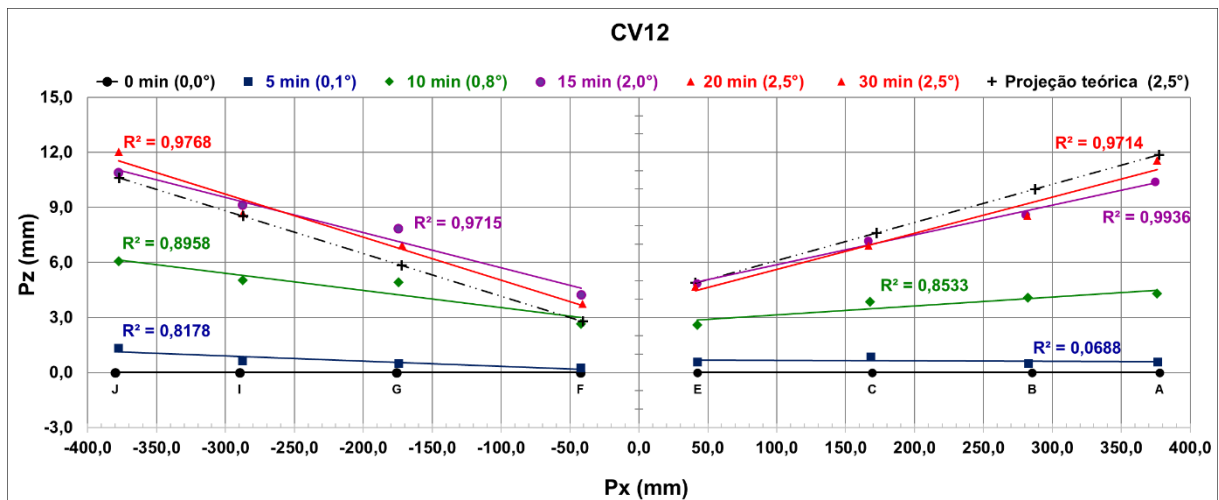


GRÁFICO 4.5- Representação das retas da regressão linear e projeção teórica - CV12.

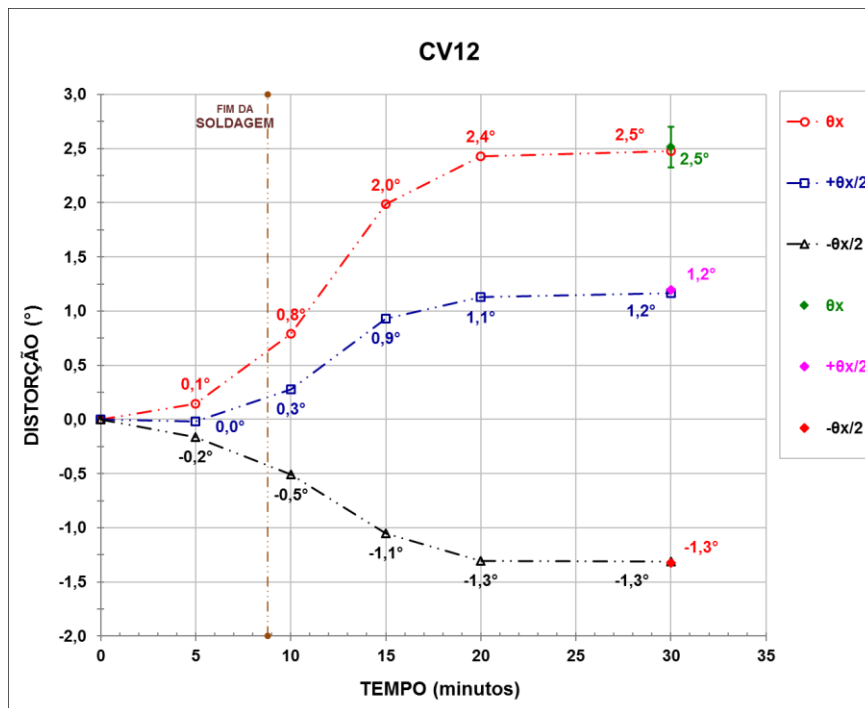


GRÁFICO 4.6- Evolução das distorções de soldagem monitorada com SMCDs versus valores médios das distorções angulares medidas pelos instrumentos de medição.

Analisando a evolução das distorções durante o processo de soldagem, observar-se no GRA. 4.6 que mais de 70% da distorção angular ocorreu após a extinção do arco, devido à deformação plástica localizada, que ocorre no final do processo de soldagem (MODENESI, et al., 2012). Para as juntas que apresentam baixo volume de solda, como as utilizadas neste experimento, a maior parte das deformações de soldagem realmente tendem a ocorrer durante o período de resfriamento do cordão de solda, pois o curto tempo de execução da soldagem não será suficiente para que as deformações plásticas ocorram antes da extinção do arco.

Para ambos os lados do corpo de prova, a distorção angular ocorreu de forma mais acentuada no intervalo entre 10 à 15 minutos. Após 12 minutos finalizado a soldagem, aproximadamente 20 minutos, do tempo total de teste, a distorção estabilizou-se, não havendo mais nenhuma alteração nos dez minutos finais de resfriamento do corpo de prova. Comparando os valores distorção total apresentados pelo SMCDs com os valores médios medidos pelos instrumento de medição, observa-se uma diferença pequena entre esses valores.

A TAB. 7.26 do Apêndice 12, resume os resultados de distorção angular em função do tempo para os corpos de prova do tipo CV1. Como pode ser observado na TAB. 7.26 do Apêndice 12, o CV15 apresentou valores negativos de distorção total não coerentes com as medições realizadas com os instrumentos de medição. Ao analisar a montagem do aparato experimental, identificou-se que os fios do sistema de alimentação elétrica estavam travados nos batentes de apoio da mesa de trabalho, não permitindo a livre movimentação dos sensores a laser. Assim os resultados deste teste não serão considerados.

O GRA. 4.7 apresenta a evolução das distorções de soldagem em função do tempo para os corpos de prova do tipo CV1. Os marcadores maiores e as linhas contínuas representam a distorção total ( $\theta_x$ ). Os marcadores menores e as linhas pontilhadas representam as distorções em cada lado do corpo de prova. A linha vertical tracejada no tempo de 8,8 minutos indica o instante em que foi finalizado o último passe de solda.

Conforme pode ser observado, GRA. 4.7, existe uma maior diferença nos valores de distorção no início do processo que tende a diminuir durante o resfriamento. Os valores de distorção total para os corpos de prova CV12, CV13, CV14 e CV16, oscilaram entre  $2,4^\circ$  e  $2,6^\circ$ , essa pequena variação confirma a correta preparação e montagem dos corpos de prova, assim, com a repetibilidade dos testes experimentais, já identificados na verificação realizada com os

instrumentos de medição. Pode-se observar ainda, que o SMCDS foi capaz de identificar a menor amplitude de distorção apresentada pelo CV11.

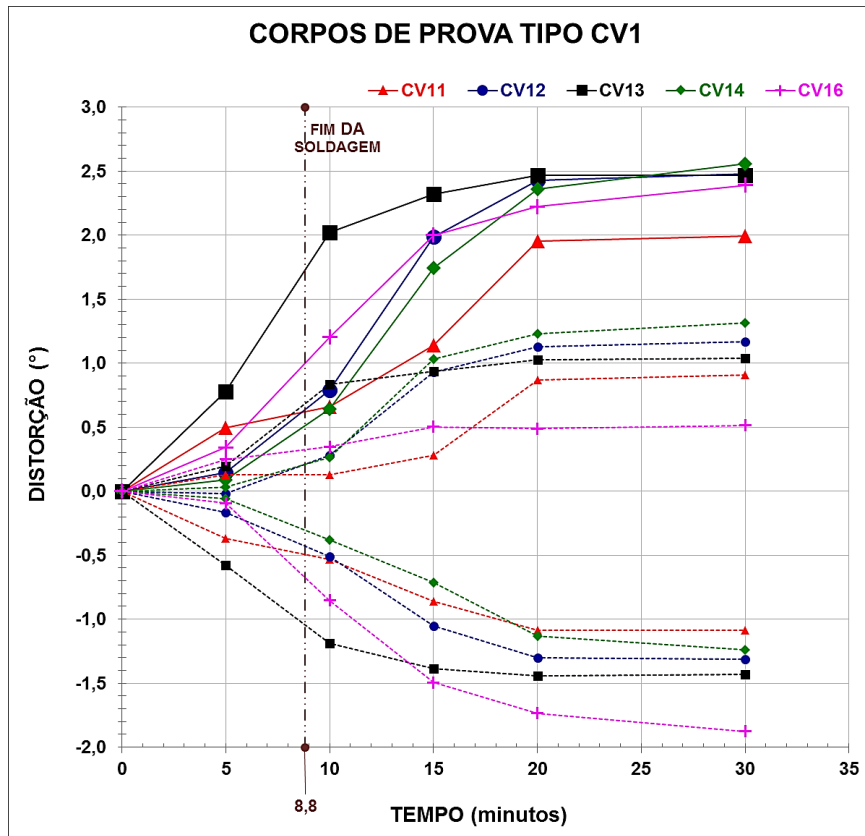


GRÁFICO 4.7- Evolução das distorções de soldagem em função do tempo monitorada com o SMCDS para os corpos de prova tipo CV1.

O monitoramento com o SMCDS, para o corpo de prova CV16, apresentou baixo valor de distorção para o lado direito e alto valor de distorção para o lado esquerdo, em relação aos demais corpos de prova e as medições realizadas com instrumentos de medição. Porém, o valor da distorção total foi coerente com os demais. Ao analisar o aparato experimental, ao final da soldagem, observou-se que o lado direito do corpo de prova estava preso por uma rebarba ao batente de encosto da mesa de trabalho, o que limitou a movimentação do corpo de prova neste lado. Essa restrição proporcionou uma maior movimentação para o lado esquerdo e menor para o lado direito do corpo de prova, mantendo assim o valor da distorção final.

Os cálculos estatísticos de comparação entre as medições realizadas com instrumentos de medição e o SMCDS para cada corpo de prova estão apresentados na TAB. 7.29 do Apêndice 13. Estes cálculos permitem afirmar com 95% de confiabilidade (CV11, CV12, CV14, CV16) e 99% de confiabilidade (CV13) que o valor final da distorção angular verificado pelo SMCDS

no instante de 30 minutos é igual ao valor da distorção angular verificado com instrumentos de medição.

O GRA. 4.8 apresenta a evolução média das distorções de soldagem em função do tempo entre os corpos de prova tipo CV1. Este gráfico apresenta também o valor médio das distorções verificados com os instrumentos de medição apresentados nas últimas barras em destaque do GRA. 4.1.

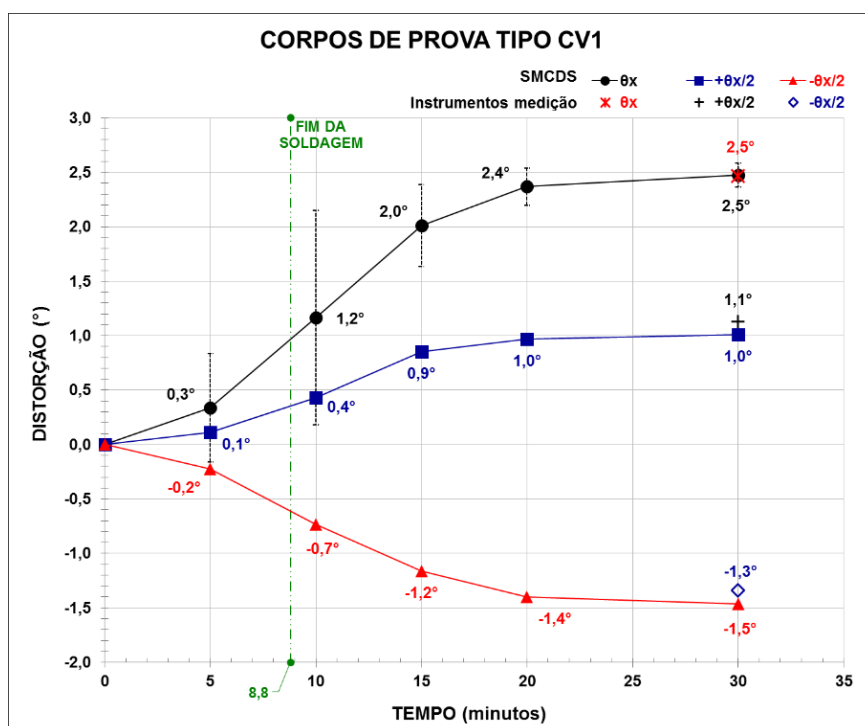


GRÁFICO 4.8 - Evolução das distorções médias de soldagem em função do tempo monitorada com SMCDs x valores de distorção medidos com instrumentos de medição para os corpos de prova tipo CV1.

Analisando a evolução média das distorções durante o processo de soldagem, GRA. 4.8, observa-se que as retas entre os intervalos de tempo de 5 e 15 minutos apresentam maior inclinação. Neste intervalo de tempo, o valor distorção angular total aumentou em  $1,7^\circ$  (de  $0,3^\circ$  a  $2,0^\circ$ ) o que representa 67% da distorção média total. É possível verificar também que mais de 60% da distorção angular total ocorreu após a extinção do arco, devido à deformação plástica localizada, que ocorre no final do processo de soldagem (MODENESI, et al., 2012).

Após 12 minutos finalizada a soldagem, aproximadamente 20 minutos, após iniciados os testes, a distorção praticamente estabilizou-se, havendo apenas 4% de alteração no valor de distorção total nos dez minutos finais de resfriamento dos corpos de prova.

Comparando os valores médios verificados com SMCDS com os valores médios verificados com os instrumentos de medição, não observa-se diferença entre os valores de distorção total verificado pelo dois métodos de medição. Observa-se ainda, que os valores de distorções verificados pelos dois metodos de medição em cada lado dos corpos de prova apresentaram variações máximas de  $0,2^\circ$ .

Os cálculos estatísticos apresentados na TAB. 7.34 do Apêndice 13, permitem afirmar com 95% de confiabilidade que o valor médio da distorção angular, calculado entre os corpos de prova tipo CV1, é igual tanto para os valores medidos com o SMCDS quanto para os valores medidos com os instrumentos de medição.

#### 4.2.3 Monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para os corpos de prova tipo CX1

Os resultados detalhados serão apresentados apenas para o corpo de prova CX11, afim de exemplificar a análise dos dados obtidos pelo sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser, o resumo e discussão dos resultados para os três corpos de prova tipo CX1 serão sumarizados na sequência.

Para os corpos de prova com uma junta em “X” (CX1) foram analisados os frames correspondentes aos intervalos de 0, 5, 10, 15 minutos para a soldagem do lado “A” e os frames de 0, 5 e 10 minutos para soldagem do lado “B”. Os valores de deslocamento de cada ponto projetado no painel do anteparo pelos sensores a laser e os resultados dos cálculos de regressão linear para determinar retas que melhor se ajustam a estes conjuntos de pontos, estão apresentados na TAB. 7.24 do Apêndice 10.

O GRA. 4.9 permite visualizar em três dimesões, o deslocamento dos pontos refletidos no painel do anteparo em função do tempo para a soldagem do lada “A” e “B” do corpo de prova.

O GRA. 4.10 apresenta as retas e os coeficientes da regresão linear para cada intervalo de tempo. Cada reta possui um conjunto de quatro pontos que corresponde a quantidade de sensores a laser posicionados em cada lado do corpo de prova. O GRA. 4.10 apresenta ainda as duas retas obtidas pela regressão linear dos pontos de projeção teórica, calculados pela EQ.

(3.12) e apresentados na TAB. 7.25 do Apêndice 11.

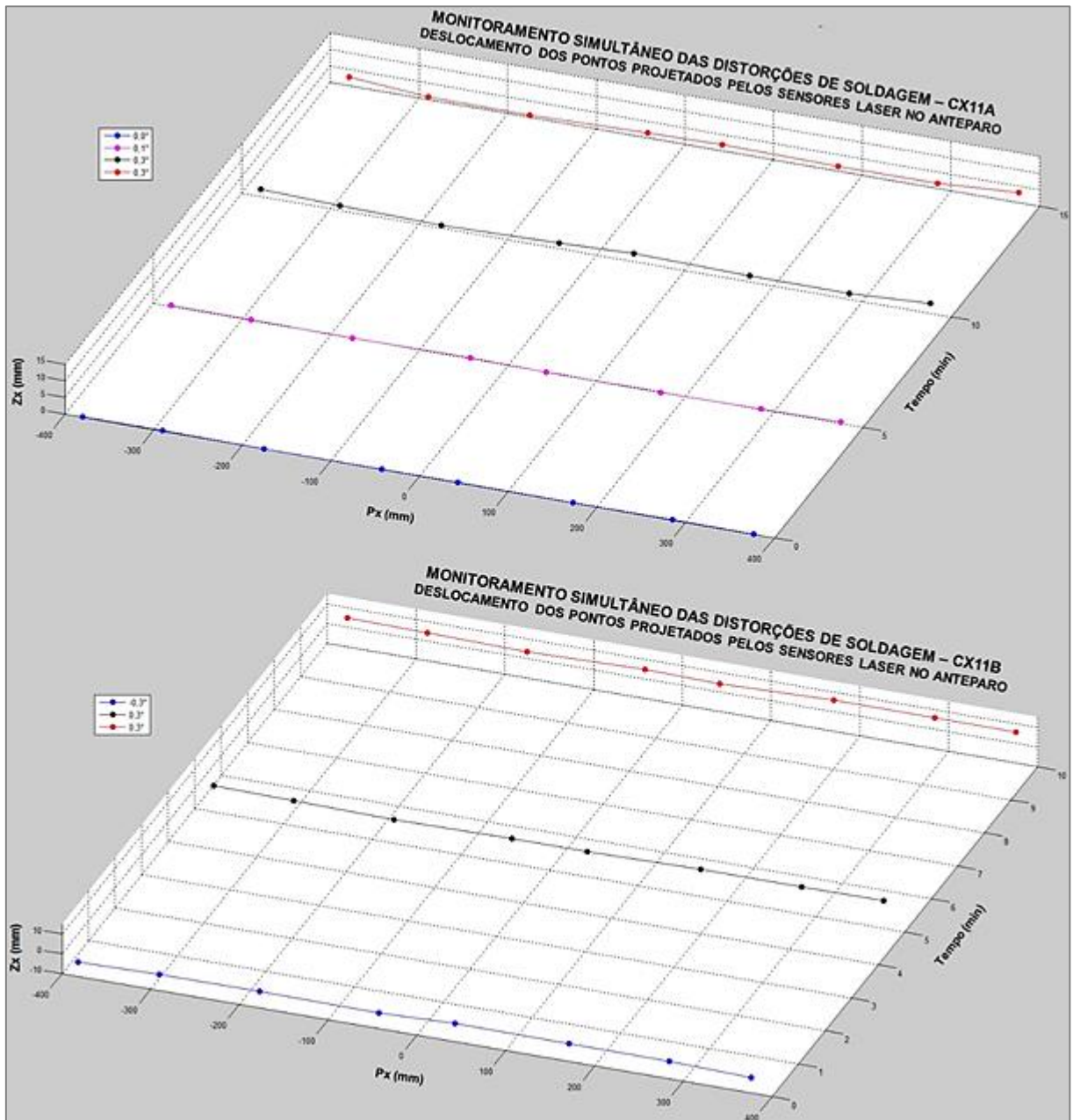


GRÁFICO 4.9- Representação em três dimensões dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo – CX1.

Como pode ser observado, GRA. 4.10, apesar da altura dos pontos da projeção teórica apresentarem diferenças em relação aos pontos da projeção real refletidos no instante de 15 e 10 minutos para o lado “A” e “B” do corpo-de-prova, respectivamente, a inclinação das retas da projeção teórica e projeção real apresentam inclinações similares.



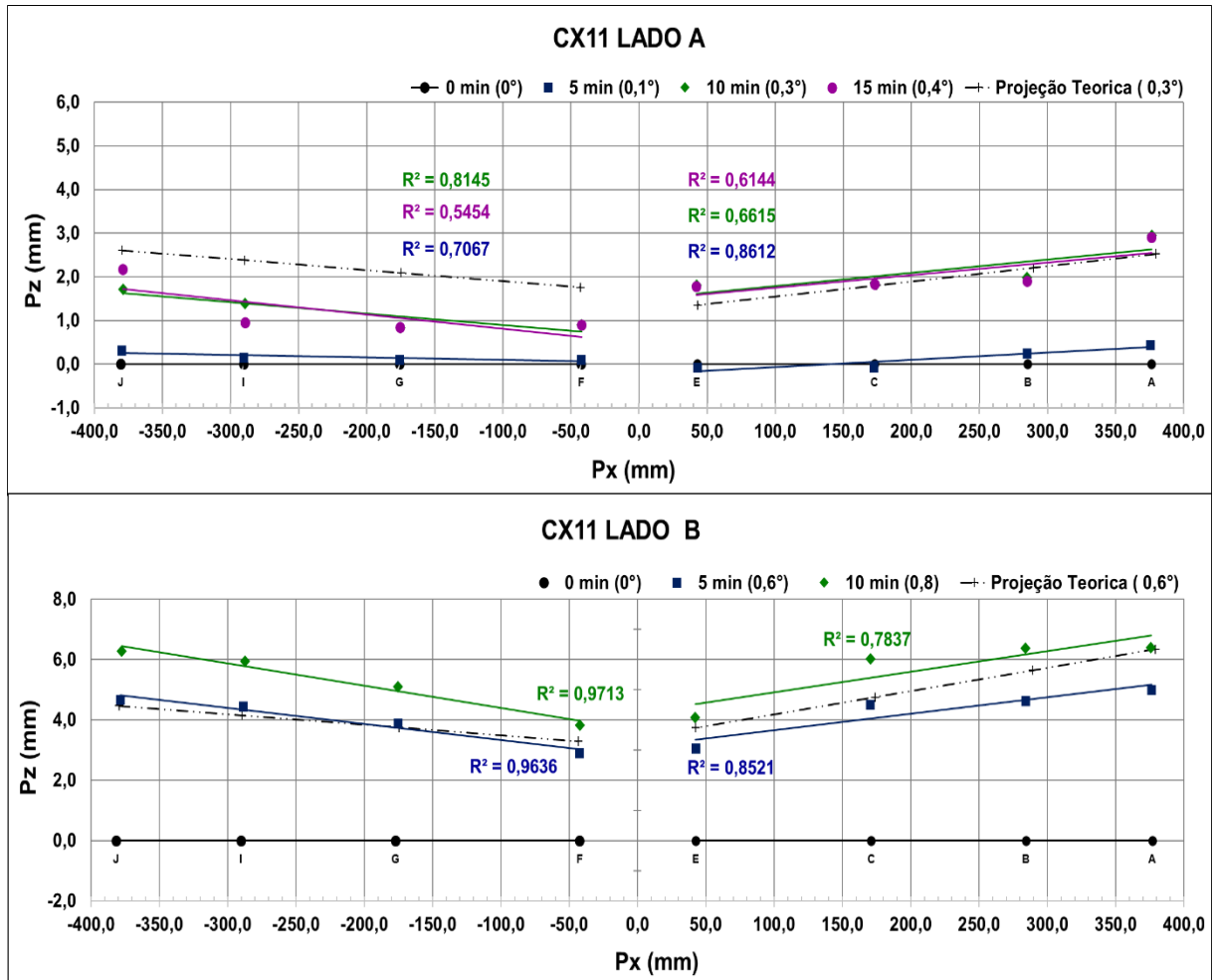


GRÁFICO 4.10- Representação das retas da regressão linear e projeção teórica –CX11.

O GRA. 4.11 apresenta a relação das distorções de soldagem em função do tempo. Os marcadores com formatos circulares representam a distorção total ( $\theta_x$ ) e os marcadores com formatos quadrados e triangulares representam as distorções do lado direito ( $+\theta_{x/2}$ ) e esquerdo ( $-\theta_{x/2}$ ), respectivamente, do corpo de prova conforme ilustrado nas FIG. 3.17 e FIG. 3.19. A linhas verticais tracejadas no tempo de 2,1 e 0,9 minutos indica o instante em que foi finalizado o último passe de solda para cada lado do corpo de prova. Para comparação foi inserido neste gráfico os valores médios das distorções medidos pelos instrumentos de medição.

Analisando a evolução das distorções durante o processo de soldagem, observar-se no GRA.4.11 que mais de 85% da distorção angular ocorreu após a extinção do arco, devido à deformação plástica localizada, que ocorre no final do processo de soldagem (MODENESI, et al., 2012). As distorções angulares ocorridas no lado “A” são menores que os valores de distorção ocorridas no lado “B” do corpo de prova, em função dos diferentes parâmetros de soldagem e quantidade de passes de solda utilizados. Comparando os valores distorção total

apresentados pelo SMCDS com os valores médio medidos pelos instrumento de medição observa-se variações de até 0,1°.

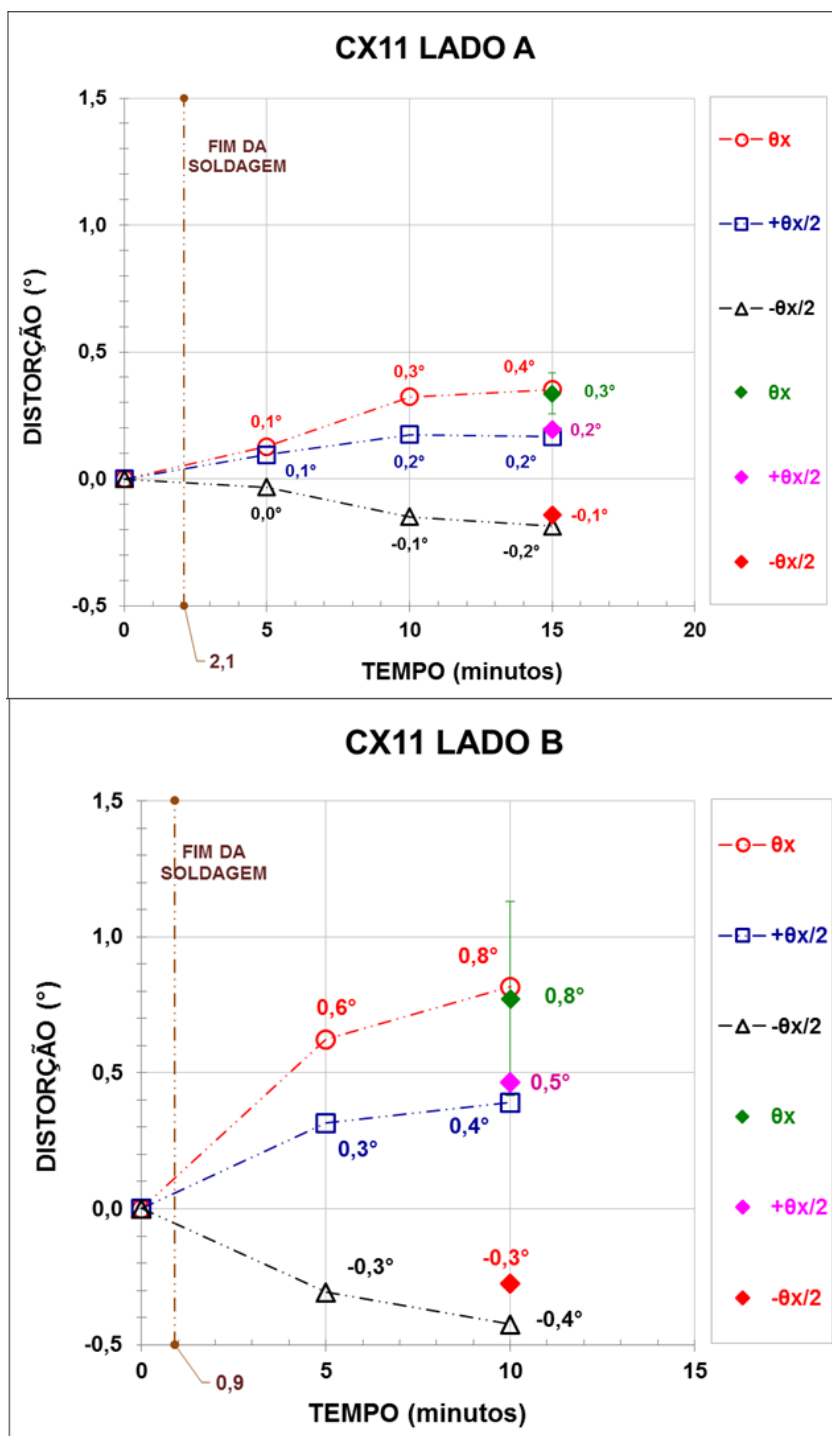


GRÁFICO 4.11- Evolução das distorções de soldagem em função do tempo medidos com SMCDS – CX11.

A TAB. 7.27 do Apêndice 12, apresenta o resumo dos resultados de distorção angular em função do tempo para os corpos de prova do tipo CX1. O GRA. 4.12 apresenta a evolução das distorções de soldagem em função do tempo para cada corpo de prova do tipo CX1.

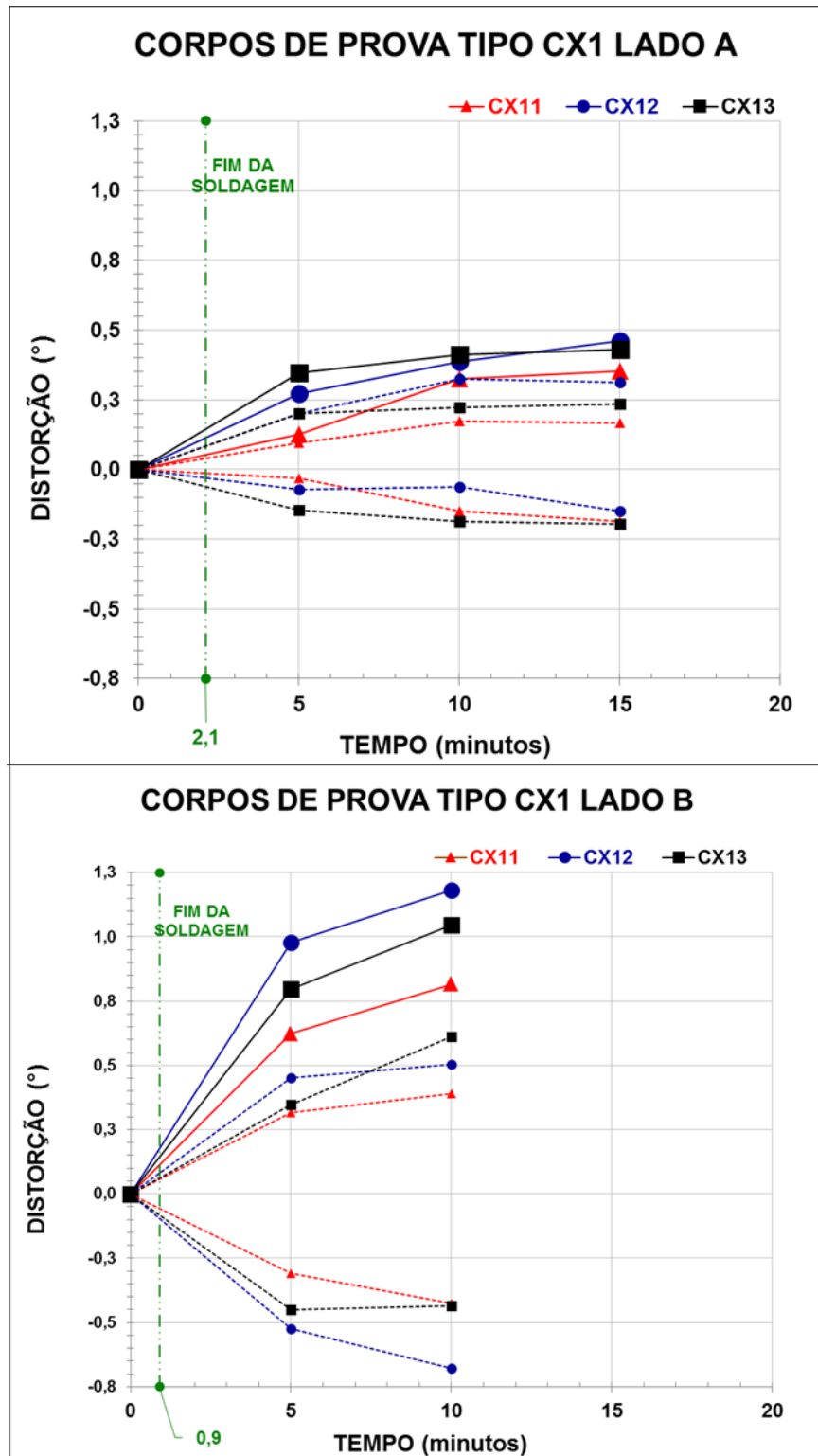


GRÁFICO 4.12- Evolução das distorções de soldagem em função do tempo medidos com SMCDS para os corpos de prova tipo CV1.

No GRA. 4.12 os marcadores maiores e as linhas contínuas representam a distorção total ( $\theta_x$ ). Os marcadores menores e as linhas pontilhadas representam as distorções em cada lado do

corpo de prova. As linhas verticais tracejadas nos tempos de 2,1 e 0,9 minutos indica o instante em que foi finalizado o último passe de solda para cada lado do corpo de prova. Conforme pode ser observado, os valores de distorção total entre os corpos de prova, oscilaram entre  $0,3^\circ$  e  $0,4^\circ$  para as soldagens do lado “A” e  $0,8^\circ$  a  $1,2^\circ$  para as soldagens do lado “B”. Conforme relatado acima, essa diferença no valor de distorção entre a soldagem do lado “A” e “B” pode ser explicada pelos diferentes parâmetros de soldagem e quantidade de passes de solda utilizados para soldar os dois lados.

Os cálculos estatísticos de comparação entre as medições realizadas com instrumentos de medição e o SMCDS para cada corpo de prova estão apresentados na TAB. 7.30 do Apêndice 13. Estes cálculos permitem afirmar com 95% de confiabilidade (CX11A e CX13A), 98% (CX13A) que o valor final da distorção angular verificado pelo SMCDS no instante de 15 minutos é igual ao valor médio da distorção angular verificado com instrumentos de medição para o lado “A” dos corpos de prova. Estes cálculos permitem também afirmar com 99% de confiabilidade (CX11B, CX12B, CX13B) que o valor final da distorção angular verificado pelo SMCDS no instante de 10 minutos é igual ao valor médio da distorção angular verificado com instrumentos de medição para o lado “B” dos corpos de prova.

O GRA. 4.13 apresenta a evolução média das distorções de soldagem em função do tempo entre os corpos de prova do tipo CX1. Este gráfico apresenta também o valor médio das distorções medidas com os instrumentos de medição apresentados nas últimas barras em destaque do GRA. 4.2. Apesar dos maiores erros apresentados na medição das distorções para a soldagem do lado “B”, o SMCDS foi capaz de identificar pequenas amplitudes de distorção apresentados para este tipo de corpo de prova.

Analisando a evolução média das distorções durante o processo de soldagem, GRA. 4.13, observa-se que a distorção para soldagem do lado “A” ocorreu de forma constante a uma taxa de aproximadamente  $0,2^\circ$  para cada 5 minutos. Para a soldagem do lado “B”, 80% do valor da distorção ocorreu nos primeiros 5 minutos da soldagem.

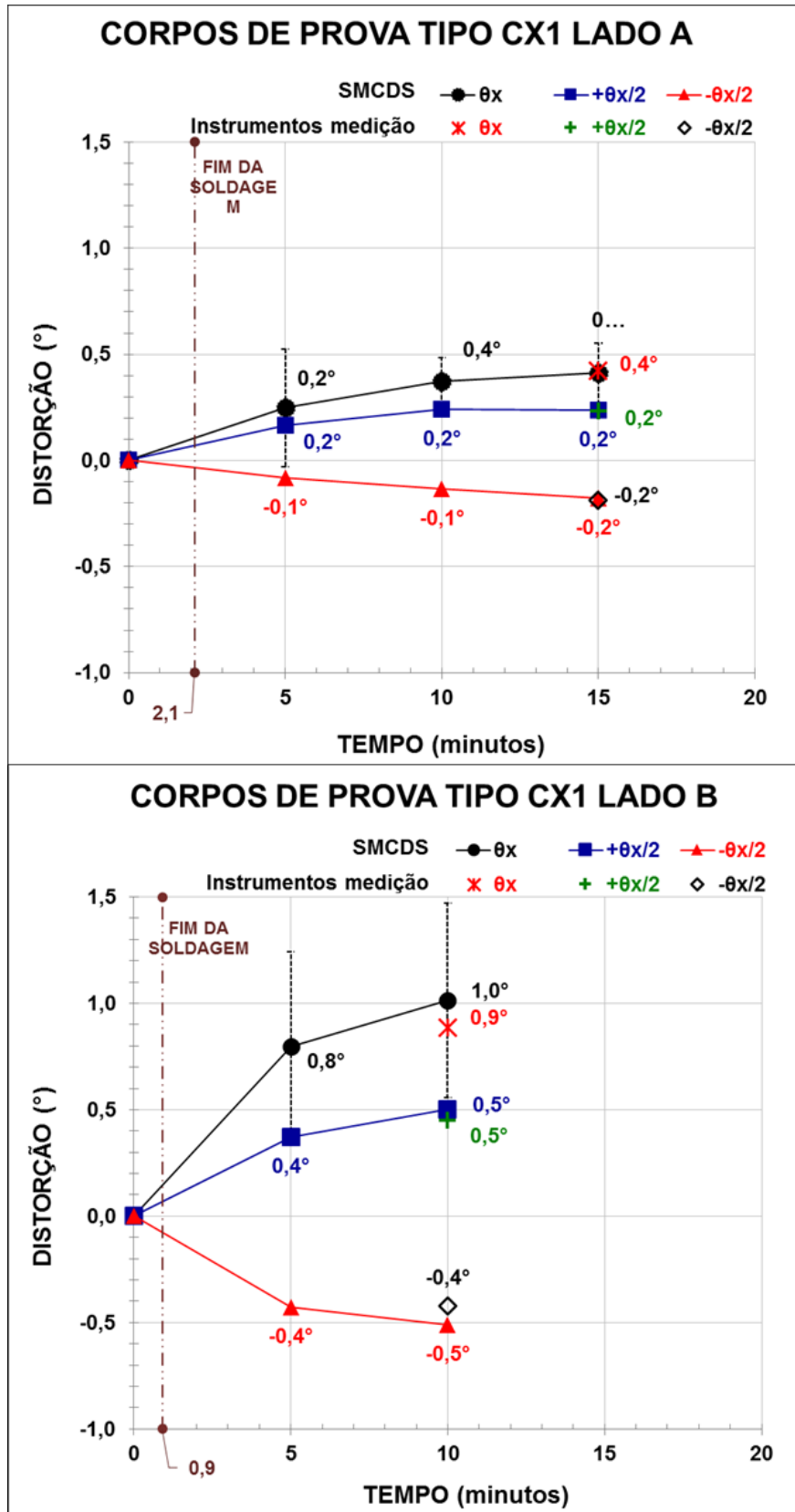


GRÁFICO 4.13 - Evolução das distorções médias de soldagem em função do tempo medidas com SMCDs x valores de distorção medidos com instrumentos de medição para os corpos de prova tipo CX1.

É possível verificar também, GRA. 4.13, que mais de 70% da distorção angular total ocorreu após a extinção do arco para ambos os lados, devido à deformação plástica localizada, que ocorre no final do processo de soldagem (MODENESI, et al., 2012). Por apresentar o menor tempo de arco aberto os corpos de prova do tipo CX1 foram aqueles que apresentaram a maior variação da distorção angular após a extinção do arco.

Considerando que as medições de distorção realizadas com os instrumentos de medição foi com a peça na temperatura ambiente, pode-se afirmar que houve estabilização da distorção angular após o tempo de 15 minutos para o lado “A” e de 10 minutos para o lado “B”.

Comparando os valores médios medidos com o SMCDS com os valores médios medidos com os instrumentos de medição, verifica-se uma diferença pequena entre esses valores tanto para a distorção total quanto para as distorções em cada lado do corpo de prova. Os valores verificados para soldagem do lado “A” não apresentam variações em relação as medições realizadas com instrumentos de medição e para a soldagem do lado B apresentou variações máximas de 0,1° entre dois metodos de medição.

Os cálculos estatísticos apresentados na TAB. 7.33 do Apêndice 13, permitem afirmar com 95% de confiabilidade que o valor médio da distorção angular, calculado entre os corpos de prova tipo CX1, é igual tanto para os valores medidos com o SMCDS quanto para os valores medidos com os instrumentos de medição.

#### 4.2.4 Monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para os corpos de prova tipo CV2

Os resultados detalhados serão apresentados apenas para o corpo de prova CV21, afim de exemplificar a análise dos dados obtidos pelo sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser, o resumo e discussão dos resultados para os três corpos de prova tipo CV2 serão sumarizados na sequência.

Para os corpos de prova com duas junta em “V” (CV2) foram analisados os frames correspondentes aos intervalos de 0, 5, 10, 15, 20 e 30 minutos. Os valores de deslocamento de cada ponto projetado no painel do anteparo pelos sensores a laser e os resultados dos cálculos de regressão linear para determinar retas que melhor se ajustam a estes conjuntos de pontos,

estão apresentados na TAB. 7.22 do Apêndice 10. O GRA. 4.14 permite visualizar em três dimensões, o deslocamento de cada ponto refletido no painel do anteparo em função do tempo.

O GRA. 4.15 apresenta as retas e os coeficientes da regressão linear para cada intervalo de tempo. Cada reta possui um conjunto de três pontos que corresponde a quantidade de sensores a laser posicionados em cada lado do corpo de prova. O GRA. 4.15 apresenta ainda as duas retas obtidas pela regressão linear dos pontos de projeção teórica, calculados pela EQ. (3.12) e apresentados na TAB. 7.25 do Apêndice 11.

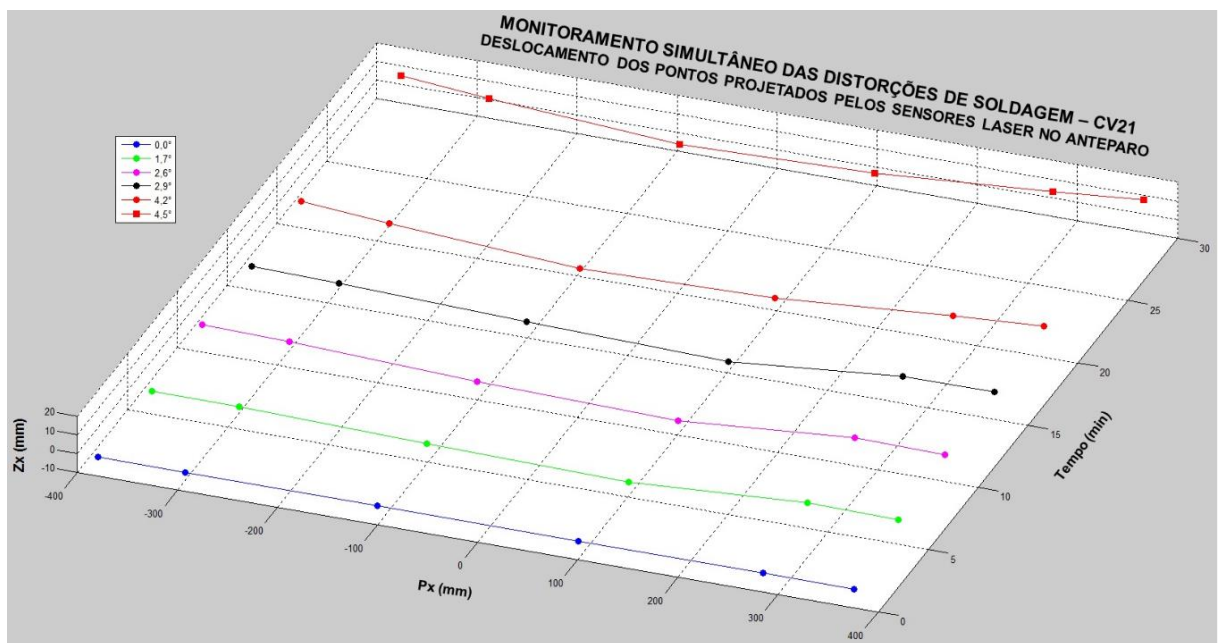


GRÁFICO 4.14- Representação em 3 dimensões dos deslocamentos dos pontos refletidos no anteparo – CV21.

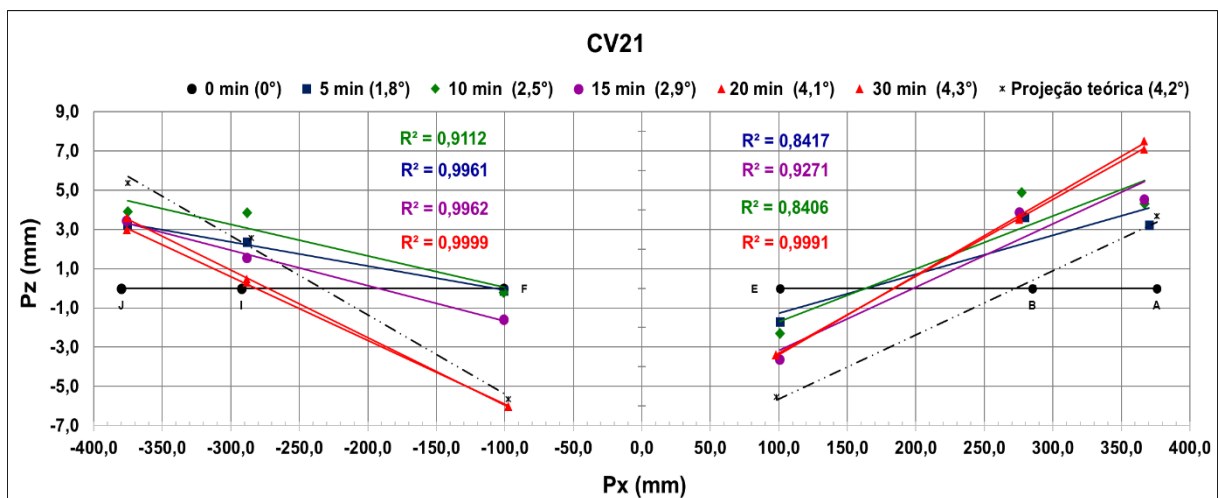


GRÁFICO 4.15- Representação das retas da regressão linear e projeção teórica – CV21.



Como pode ser observado, GRA. 4.15, apesar da altura dos pontos da projeção teórica apresentarem diferenças em relação aos pontos da projeção real refletidos no instante de 30 minutos, a inclinação das retas da projeção teórica e projeção real apresentam inclinações similares.

Para o lado direito do corpo de prova os pontos da projeção teórica estão abaixo dos pontos refletidos no instante de 30 minutos. Já para o lado esquerdo do corpo de prova de prova os pontos da projeção teórica estão acima dos pontos refletidos no instante de 30 minutos.

O GRA. 4.16 apresenta a relação das distorções de soldagem em função do tempo. Os marcadores com formatos circulares representam a distorção total ( $\theta_x$ ) e os marcadores com formatos quadrados e triangulares representam as distorções do lado direito ( $+\theta_{x/2}$ ) e esquerdo ( $-\theta_{x/2}$ ), respectivamente, do corpo de prova conforme ilustrado nas FIG. 3.17 e FIG. 3.19. A linha vertical tracejada no tempo de 9,8 minutos indica o instante em que foi finalizado o último passe de solda. Para comparação foi inserido neste gráfico os valores médios das distorções angulares medidos pelos instrumentos de medição.

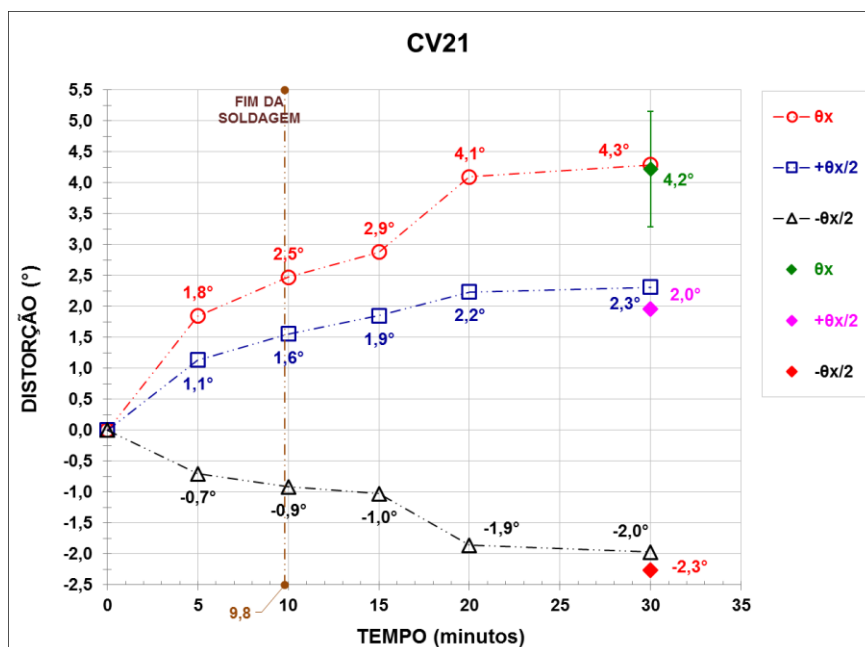


GRÁFICO 4.16- Evolução das distorções de soldagem monitorada pelo SMCDS versus valores médios das distorções angulares medidas pelos instrumentos de medição – CV21.

Analisando a evolução das distorções durante o processo de soldagem, observar-se no GRA. 4.16 que mais de 58% da distorção angular ocorreu após a extinção do arco, devido à

deformação plástica localizada, que ocorre no final do processo de soldagem (MODENESI, et al., 2012). Para o lado esquerdo do corpo de prova, a distorção ocorreu de forma mais constante, já no lado direito do corpo de prova a distorção angular foi mais acentuada no intervalo entre 15 e 20 minutos.

Após 15 minutos finalizado a soldagem, aproximadamente 20 minutos, do tempo total de teste, a distorção estabilizou-se, não havendo alteração significativa nos cinco minutos finais de resfriamento do corpo de prova. Comparando os valores distorção total apresentados pelo SMCDS com os valores médios medidos pelos instrumento de medição observa-se uma diferença pequena entre esses valores.

A TAB. 7.28 do Apêndice 12, apresenta o resumo dos resultados para os demais corpos de prova do tipo CV2. O corpo de prova CV22 apresentou valores muito altos de distorção total não coerentes com as medições realizadas utilizando instrumentos de medição. Ao analisar a montagem do aparato experimental identificou-se que novamente os fios do sistema de alimentação elétrica estavam travados nos batentes de apoio da mesa de trabalho não permitindo a livre movimentação dos sensores a laser. Assim os resultados deste teste não serão considerados.

O GRA. 4.17 apresenta a evolução das distorções de soldagem em função do tempo apresentados para cada corpo de prova do tipo CV2. Os marcadores maiores e as linhas contínuas representam a distorção total ( $\theta_x$ ). Os marcadores menores e as linhas pontilhadas representam as distorções em cada lado do corpo de prova. A linha vertical tracejada no tempo de 9,8 minutos indica o instante em que foi finalizado o último passe de solda. Os valores de distorção total para os corpos de prova CV21 e CV23, oscilaram entre 4,1° e 4,3°.

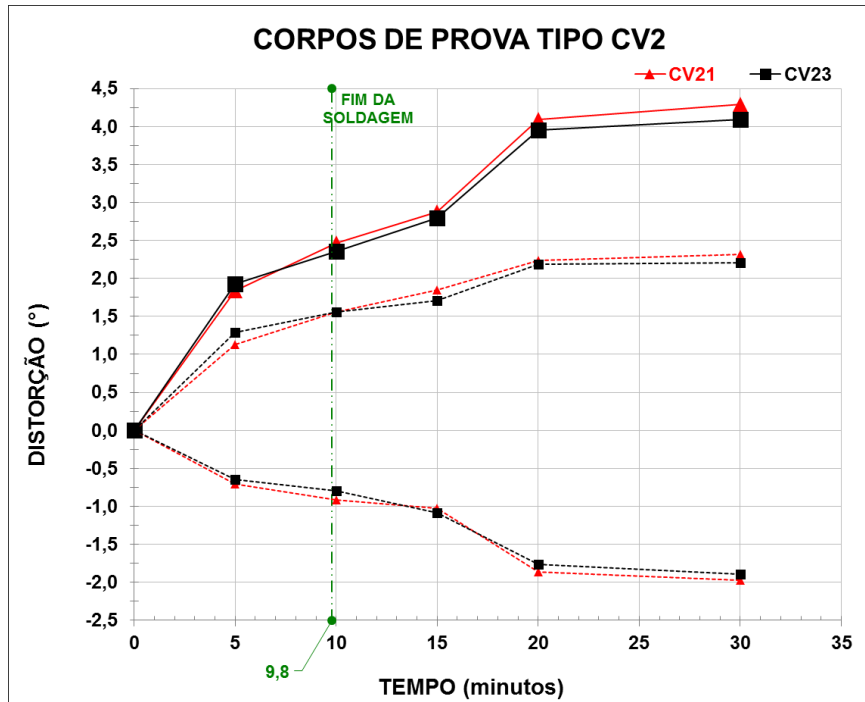


GRÁFICO 4.17- Evolução das distorções de soldagem em função do tempo monitorada com SMCDs para os corpos de prova tipo CV2.

Os cálculos estatísticos de comparação entre as medições realizadas com instrumentos de medição e o SMCDs para cada corpo de prova estão apresentados na TAB. 7.31 do Apêndice 13. Estes cálculos permitem afirmar com 98% de confiabilidade (CV21) e 99% de confiabilidade (CV22) que o valor final da distorção angular verificado pelo SMCDs no instante de 30 minutos é igual ao valor médio da distorção angular verificado com instrumentos de medição.

O GRA. 4.18 apresenta a evolução média das distorções de soldagem em função do tempo apresentados entre os corpos de prova do tipo CV2. Este gráfico apresenta também o valor médio das distorções medidas com os instrumentos de medição apresentados nas últimas barras em destaque do GRA. 4.3.

Analisando a evolução média das distorções durante o processo de soldagem no GRA. 4.18, observa-se que a reta entre os intervalos de tempo de 0 e 5 minutos apresenta maior inclinação, neste intervalo de tempo, o valor da distorção angular total aumentou em  $1,9^\circ$  o que representa 45% da distorção média total.

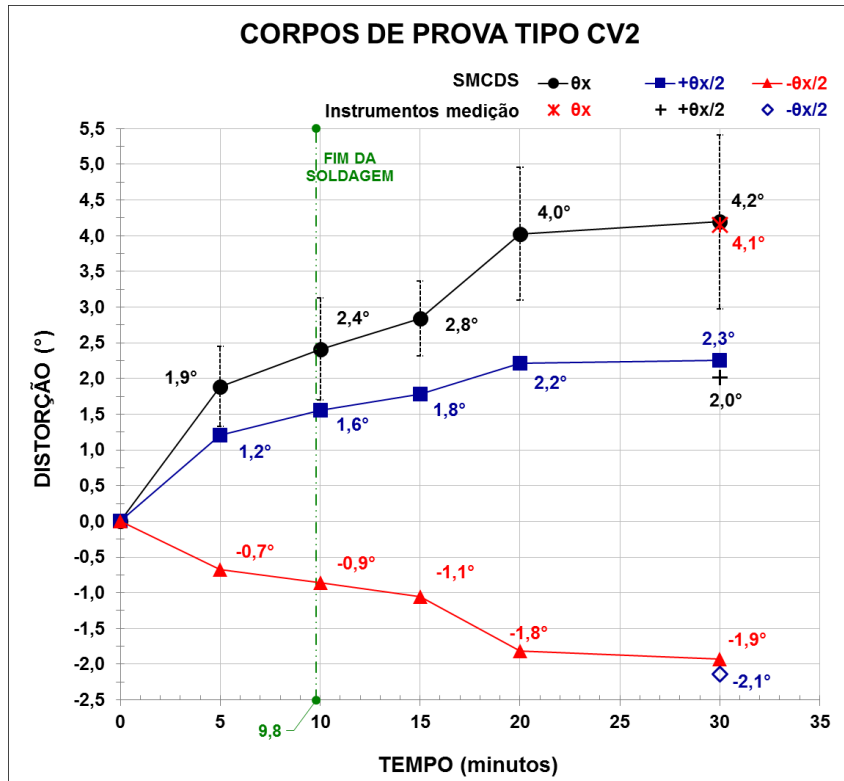


GRÁFICO 4.18 - Evolução das distorções médias de soldagem em função do tempo medidas com SMCDS x valores de distorção medidos com instrumentos de medição para os corpos de prova tipo CV2.

É possível verificar também que 43% da distorção angular total ocorreu após da extinção do arco, devido à deformação plástica localizada, que ocorre no final do processo de soldagem (MODENESI, et al., 2012). Por apresentar o maior tempo de arco aberto os corpos de prova do tipo CV2 foram aqueles que apresentam a menor variação de distorção angular após a extinção do arco.

Visto que este tipo de corpo de prova apresenta maior tempo de soldagem em relação aos outros a quantidade de distorção que ocorre após a extinção do arco reduziu. Após 15 minutos finalizada a soldagem, aproximadamente 20 minutos, do tempo total de teste, a distorção praticamente estabilizou-se, havendo apenas 2% de alteração no valor de distorção total nos cinco minutos finais de resfriamento dos corpos de prova.

Comparando os valores médios medidos com o SMCDS com os valores médios medidos com os instrumentos de medição, verifica-se variações máximas de 0,3° para as distorções em cada lado dos corpos de prova, e de 0,1° para a distorção total. Pode-se observar ainda que a distorção angular verificada pelo dois sistemas de medição apresenta maiores valores para o lado direito dos corpos de prova.

Os cálculos estatísticos apresentados na TAB. 7.35 do Apêndice 13, permitem afirmar com 95% de confiabilidade que o valor médio da distorção angular, calculado entre os corpos de prova tipo CV2, é igual tanto para os valores medidos com o SMCDS quanto para os valores medidos com os instrumentos de medição.

#### 4.2.5 Análise das distorções de soldagem para os três tipos de corpos de prova

Conforme já relatado anteriormente, grande parte das deformações de soldagem ocorreram após extinto o arco elétrico, devido à deformação plástica localizada, que ocorre no final do processo de soldagem (MODENESI, et al., 2012). Para as juntas que apresentam baixo volume de solda, como as utilizadas neste experimento, a maior parte das deformações de soldagem realmente tendem a ocorrer durante o período de resfriamento do cordão de solda, pois o curto tempo de execução da soldagem não será suficiente para que as deformações plásticas ocorram antes da extinção do arco.

Para os corpos de prova do tipo CX1 o tempo máximo de arco aberto foi de 2,1 minutos, com 85% do valor da distorção angular ocorrendo após extinção do arco elétrico. Para os corpos de prova do tipo CV1 o tempo de arco aberto foi de 8,8 minutos, com 70% do valor da distorção angular ocorrendo após extinção do arco elétrico. Para os corpos de prova do tipo CV2 o tempo de arco aberto foi de 9,8 minutos, com 43% do valor da distorção angular ocorrendo após extinção do arco elétrico.

O GRA. 4.19 sumariza os resultados das distorções totais de soldagem em função do tempo verificadas com o SMCDS e com os instrumentos de medição para os três tipos de corpo de prova. Conforme pode ser observado mais uma vez, os valores de distorção verificados pelo SMCDS são muito semelhantes aos valores de distorção verificado pelos instrumentos de medição para os três os tipos de corpos de prova, apresentando variações máximas de  $0,1^\circ$ , apenas para a soldagem do lado “B” dos corpos de prova do tipo CX1. Estes resultados indicam uma boa viabilidade para a aplicação da metodologia de monitoramento das distorções utilizando sensores a laser nos processos de soldagem em laboratórios e na construção de equipamentos soldados no chão de fábrica.

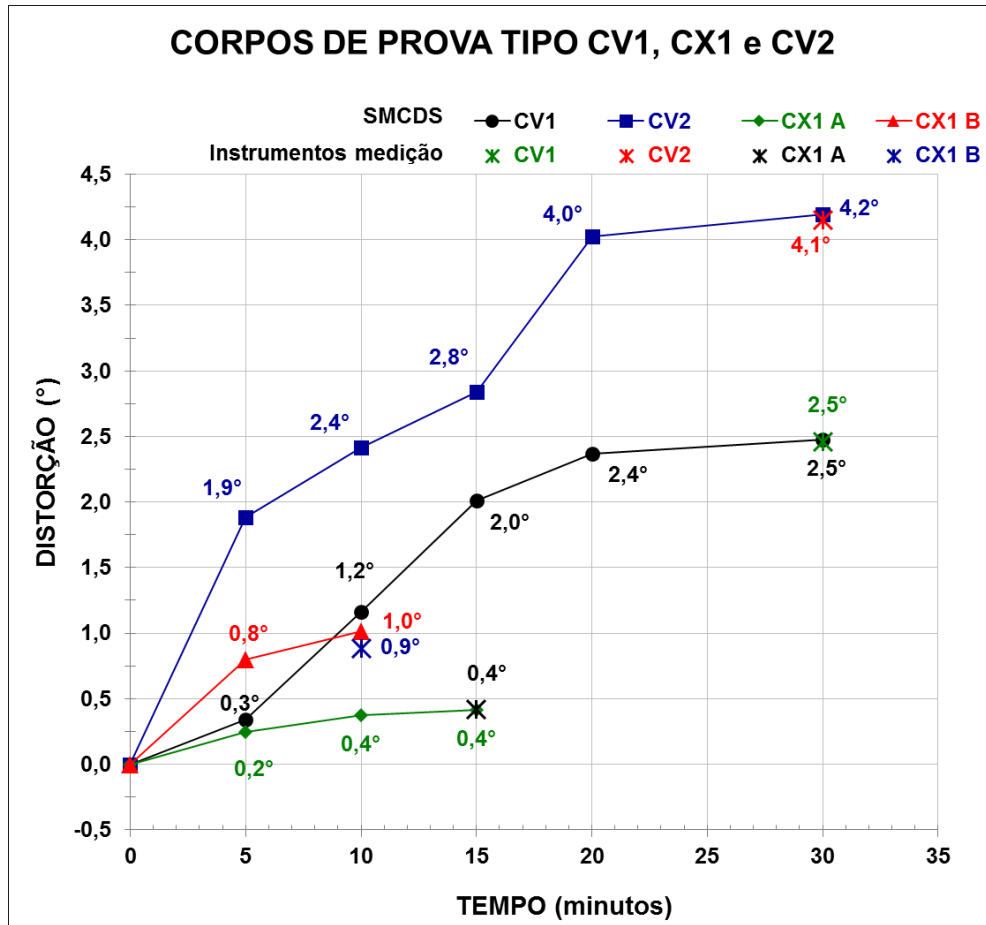


GRÁFICO 4.19- Comparação das distorções de soldagem para os três tipos de corpos de prova.

O GRA. 4.19 permite verificar de forma clara a influência do tipo de chanfro, quantidade de juntas e volume de solda nos valores de distorção de uma peça. Comparando o valor de distorção média para os três tipos de corpo de prova (CV1, CX1 e CV2), observa-se que as juntas que apresentaram maior área da secção transversal também apresentaram maiores valores de distorções. Observa-se ainda que os corpos de prova que apresentaram maior número de juntas também apresentaram maiores valores de distorções.

Os corpos de prova do tipo CV2 apresentam um volume de solda 2 vezes maior que os corpos de prova do tipo CV1 (FIG. 7.8 do Apêndice 3), porém a diferença nos valores de distorção angular entre estes dois tipos de corpos de prova foi de apenas 1,68 vezes. Essa diferença proporcionalidade pode ser explicada pelas diferentes sequências de soldagem utilizadas para estes dois tipos de corpos de prova, onde os corpos de prova do tipo CV2 (duas juntas) foram soldados alternando os passes de solda entre as duas juntas. Este resultado é coerente com a afirmação de Soares (2006) de que “a sequência de soldagem tem um efeito considerável na distorção por solda, reduzindo-a e até eliminando-a.”

Os corpos de prova do tipo CX1 ( uma junta simétrica em “X”) apresentam valores de distorção angular 5 vezes menores que os corpos de prova do tipo CV1 ( uma junta em “V”) e 8 vezes menores que os corpos de prova do tipo CV2 ( duas junta em “V”). Essa grande diferença pode ser explicada pelo menor volume de solda da junta simétrica com chanfro em “X”, e principalmente pela soldagem que é realizada nos dois lados do corpo de prova garantido a similaridade na quantidade de material depositado entre as faces superior e inferior da chapa que afeta grandemente a distorção angular (OKUMURA, et al., 1982).

Os cálculos estatísticos apresentados na TAB. 7.36 do Apêndice 13, permitem afirmar com 99% de confiabilidade que o valores médios da distorção angular, calculados para os corpos de prova do tipo CV1 é diferente dos corpos de prova tipo CX1 e CV2. Estes resultados confirmam a influencia do tipo e quantidade de juntas nos valores de distorção angular de soldagem, pois estas duas variaveis alteram basicamente o volume de solda depositado que é diretamente proporcional aos valores de distorções (OKUMURA, et al., 1982).



## 5 CONCLUSÕES

O trabalho conduzido com o objetivo avaliar o monitoramento contínuo das distorções de soldagem na fabricação de anéis segmentados utilizando sensores a laser permite concluir que:

1. O tipo de chanfro, a quantidade de solda depositada e os parâmetros de soldagem realmente influenciam nos valores de distorção de uma peça. Foi possível confirmar que os valores de distorção são diretamente proporcionais aos valores de aporte térmico e o volume de solda depositado.
2. Comparando as três formas construtivas para fabricação de anéis segmentados pode-se afirmar que a melhor opção é aquela que apresenta a menor quantidade de juntas soldadas com geometria da junta em “X”.
3. Para os testes experimentais realizados neste trabalho, é possível afirmar que pelo menos de 43% da distorção de soldagem ocorre após a extinção do arco durante o resfriamento peça, e que abaixo da temperatura de 110°C praticamente não houveram variações significativas nos valores de distorção.
4. Os testes experimentais utilizando o SMCDS confirmam que é possível monitorar com precisão e exatidão a evolução das distorções durante todo o processo de soldagem, mesmo para peças de pequenas dimensões com geometrias mais complexas e juntas de penetração total.
5. Pelos resultados apresentados pode-se afirmar que a aplicação da metodologia de monitoramento das distorções utilizando sensores a laser é viável para utilizar no chão de fábrica e laboratórios de soldagem, porém faz-se necessário otimizar o processamento dos dados obtidos pela filmagem, permitindo um monitoramento instantâneo durante o processo de soldagem.
6. A informação sobre a evolução das distorções durante o processo de soldagem além de ser útil na redução dos custos de fabricação através do monitoramento contínuo, pode

também auxiliar na calibração experimental de modelos numérico-computacional, ou até mesmo, para uma possível retroalimentação da trajetória de um robô identificando deformações para realizar correções na sequência de soldagem garantindo menores distorções.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Os resultados obtidos nesse trabalho permitem sugerir como trabalhos futuros:

Realizar a simulação computacional de soldagem dos três tipos de corpos de prova para comparação com os dados experimentais obtidos neste trabalho.

Desenvolver um algoritmo para processamento e análise dos dados obtidos pela filmagem, permitindo um monitoramento instantâneo durante o processo de soldagem.

Estudo da evolução das distorções de soldagem utilizando o sistema de monitoramento contínuo com sensores a laser para outros tipos de juntas, geometria e espessuras de chapas.

Estudo da evolução das distorções de soldagem utilizando o sistema de monitoramento contínuo com sensores a laser para diferentes tipos de materiais.

Desenvolver um projeto de suporte para os sensores a laser de fácil fixação na peça com características mecânicas e térmicas que garantam maior estabilidade do sistema mesmo em altas temperaturas e possíveis cargas externas que possam surgir durante o monitoramento da distorção de soldagem no chão de fábrica.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELING, A.; LANG, M. H.; LERMEN, R. T. Análise da distorção em chapas de aço AISI 304 soldadas através do processo TIG. In: SEMANA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA E ECONOMIA FAHOR, 4<sup>o.</sup>, 2014, Horizontina - RS.

AMANTE, Diogo do Amaral Macedo. Imperfeições de fabricação na construção naval e offshore. 2006. 80f. Monografia (Bacharel em Engenharia Naval) : Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

AMARAL, D.; ESTEFEN, S. Distorções de fabricação na construção naval e offshore. CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3., 2005, Salvador-BA.

ARAÚJO, Douglas Bezerra de. Estudo de distorções em soldagem com técnicas numéricas e de otimização. 2012. 240 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) : Escola de Engenharia Mecânica, Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

ASM Handbook. Residual Stresses and Distortion. In:\_\_\_\_\_ Welding, Brazing, and Soldering. Ohio : Ed. ASM International, 1993. Vol. 6, p. 2468-2666.

AWS Welding Handbook. Residual Stress and Distortion. In:\_\_\_\_\_Welding Handbook; Welding Science and Technology. Maimi : American Welding Society, 2001. Vol.1, p. 397-358.

BEREZA, E. M.; MANEIRA, F.; PIOVESANA, T. S. Máquina de medição tridimensional didática - MMTD - Tipo pórtico. 2007. 151 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) : Centro Universitário Positivo, Curitiba, 2007.

CABRAL, T. S., et al. Influência dos procedimentos e modo de transferência no processo MAG na redução de deformações em painéis de estruturas navais. Soldagem e Inspeção. São Paulo, v. 18, n. 04, p.339-348, Out./Dez. 2013.

CHENG, C. M., et al. Distortion Analysis of Single V-groove Butt Welding. Journal of Materials Science & Technology,. Taiwan, v.21, n.5, p. 738-742, Set./2005.

CORAINI, R.; KOBAYASHI, Y. Soldagem GMAW-P robotizada de alumínio: Influência do tipo de chanfro, tecimento e sentido de laminação na distorção angular. In: SEMINÁRIO DA PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA - UNESP, 4., 2010, Bauru-SP.

FERRAZ, A. S.; D'ANTONIO, L. C. Teodolitos e níveis ópticos - Verificação e ajuste. Departamento de Engenharia Civil, UFV. Viçosa : Disponível em: <<https://www.ufpe.br/latop/images/pdf/verif.pdf>>. Acesso em: 01/06/2015.

FRANÇA, J. L.; VASCONCELLOS, A. C. Manual para Normalização de Publicações Técnico- Científicas. 8. ed. Belo Horizonte : Ed. UFMG, 2007. p. 255.

KENNEDY, G. A. Welding Heat Effects. In:\_\_\_\_Welding Technology. Indianapolis : Ed. The Bobbs-Merrill, 1979. cap. 4, p. 96-111.

KOU, S. Weld Residual Stresses, Distortion, and Fatigue. In:\_\_\_\_ Welding Metallurgy. 2. ed. New Jersey : Ed. John Wiley & Sons, 2003. cap. 5, p. 122-141.

LIANG, W.; DENG, D.; MURAKAWA, H. Measurement of inherent deformations in typical weld Joints using inverse analysis (Part 2). 2005. Disponível em: <[http://www.researchgate.net/profile/Dean\\_Deng/publication/237725392\\_Prediction\\_of\\_Welding\\_Distortion\\_of\\_Large\\_Structures/links/00b4952668ef4ad71a000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Dean_Deng/publication/237725392_Prediction_of_Welding_Distortion_of_Large_Structures/links/00b4952668ef4ad71a000000.pdf)>. Acesso em: 17/03/2014.

LOCATELLI, Fábio Renck. Modelagem do campo de temperaturas e distorções de uma junta do tipo T soldada pelo processo GMWA. 2014. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) : Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem fundamentos e tecnologia. 3 ed. Belo Horizonte : Ed. UFMG, 2013. p. 362.

MIRANDA, L. H. Efeito da refrigeração forçada da poça de fusão nas distorções angulares em cordões de solda sobre chapa de aço carbono. 2006. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) : Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

MIRANDA, L. H.; BRACARENSE, A. Q. Redução das distorções angulares em cordões de solda sobre chapa de aço de baixo carbono com a utilização da refrigeração forçada da poça de fusão. Tecnologia em Metalurgia e Materiais. São Paulo, v. 4, n. 2, p. 17-20, Out./Dez. 2007.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. Introdução à Metalurgia da soldagem. Belo Horizonte : 2012. Disponível em:<<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>. Acesso em: 22/05/2014.

MOTOMAN YASKAWA COMPANY. 1998. Motoman MRC Controller: Operator's Manual for Arc Welding. Ohio : Motoman, 1998. p. 560.

MURUGAN, V. V.; GUNARAJ, V. Effects of process parameters on angular distortion of gas metal arc welded structural steel plates. *Welding journal*. v. 11, p. 165s-171s, Nov./2005.

OKUMURA, T.; C, TANICUCHI. 1982. *Engenharia de Soldagem e Aplicações*. São Paulo : Ed. LTC, 1982. p. 461.

ROGANA, W. G.; BRACARENSE, A Q. Projeto de um simulador dinâmico de carregamento para minimização de distorções e tensões térmicas e residuais geradas em cordões de solda. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 15., 1999, Aguas de Lindóia - SP.

SOARES, Hélio Coelho Guimarães. Estudo de sequências de soldagem para redução e eliminação de distorções. 2006. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) : Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

TAVARES, M. Estatística aplicada à Administração Pública. Florianópolis : Sistema Universidade Aberta do Brasil, 2011. p. 202.

VOITH HYDRO POWER. Imagem de uma turbina Kaplan. Disponível em:<<http://voith.com/en/products-services/hydro-power/turbines/kaplan-turbines-560.html>>. Acesso em: 17/06/2015.

WANG, J., et al. Prediction and measurement of welding distortion of a spherical structure assembled from multi thin plates. *Materials and Design*. 2011. p. 4729-4737, Jun./2011.

YANG, Y. P., et al. 2014. The effects of material strength and heat input on in plane shrinkage and out of plane distortion were studied by welding and measuring 44 small scale panels in the laboratory. *Welding Journal*. v. 92, p. 421-430, Nov./2014.

ZILKHA, E. Utilização do GeoGebra na construção de instrumentos - Teodolito. INSTITUTO NACIONAL DE MATEMÁTICA PURA E APLICADA. Rido de Janeiro : 2014. Disponível em:<[http://www.impa.br/opencms/pt/ensino/downloads/PROFMAT/trabalho\\_conclusao\\_curs\\_o/2014/esther\\_zilkha.pdf](http://www.impa.br/opencms/pt/ensino/downloads/PROFMAT/trabalho_conclusao_curs_o/2014/esther_zilkha.pdf)>. Acesso em: 02/06/2015.

## 7 APÊNDICES

Apêndice 01 – Desenhos de conjunto e detalhamento do sistema de monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser

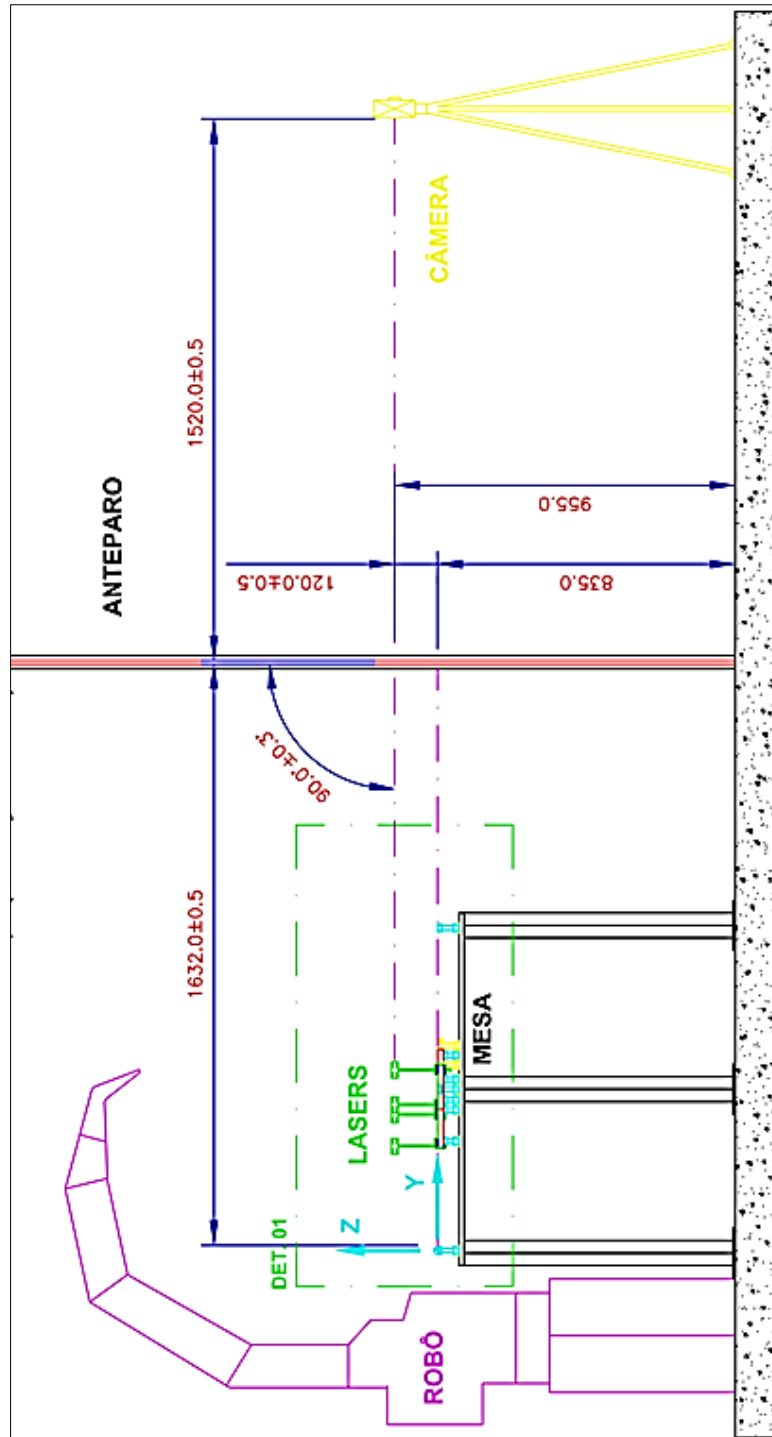


FIGURA 7.1 - Vista frontal do SMCDS.

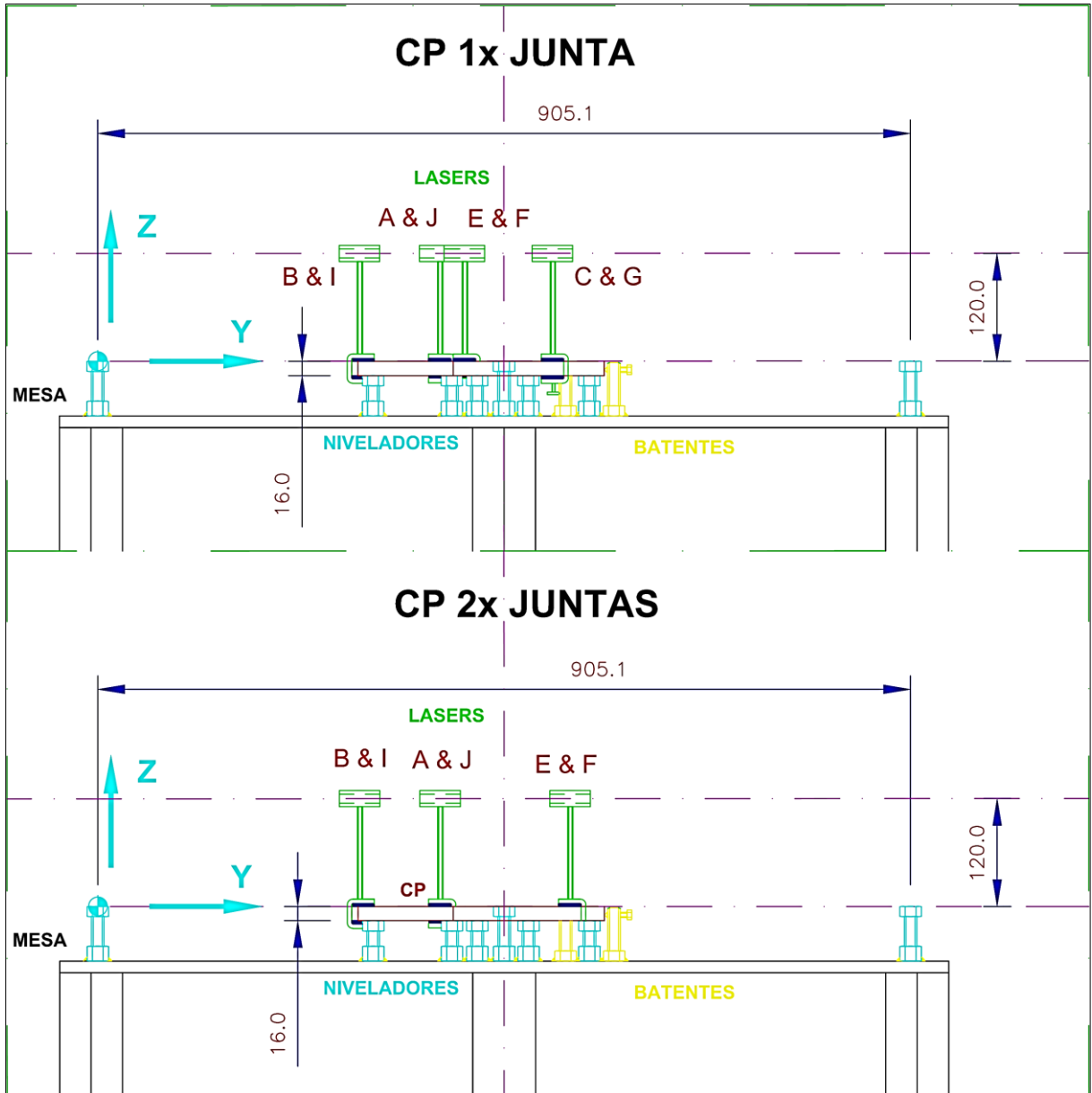


FIGURA 7.2 - Detalhe 1 da vista frontal.



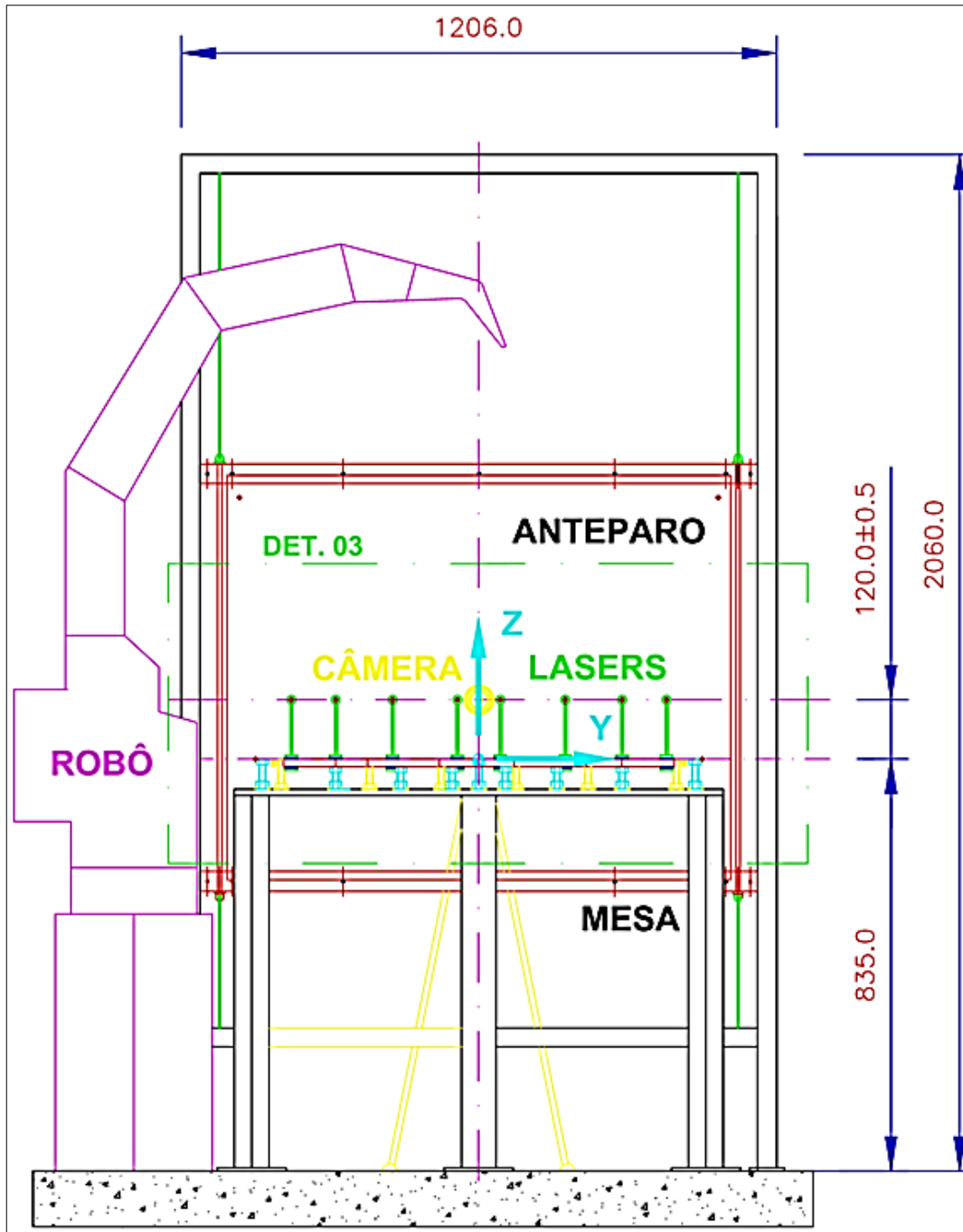


FIGURA 7.3 - Vista lateral direita do SMCDs.

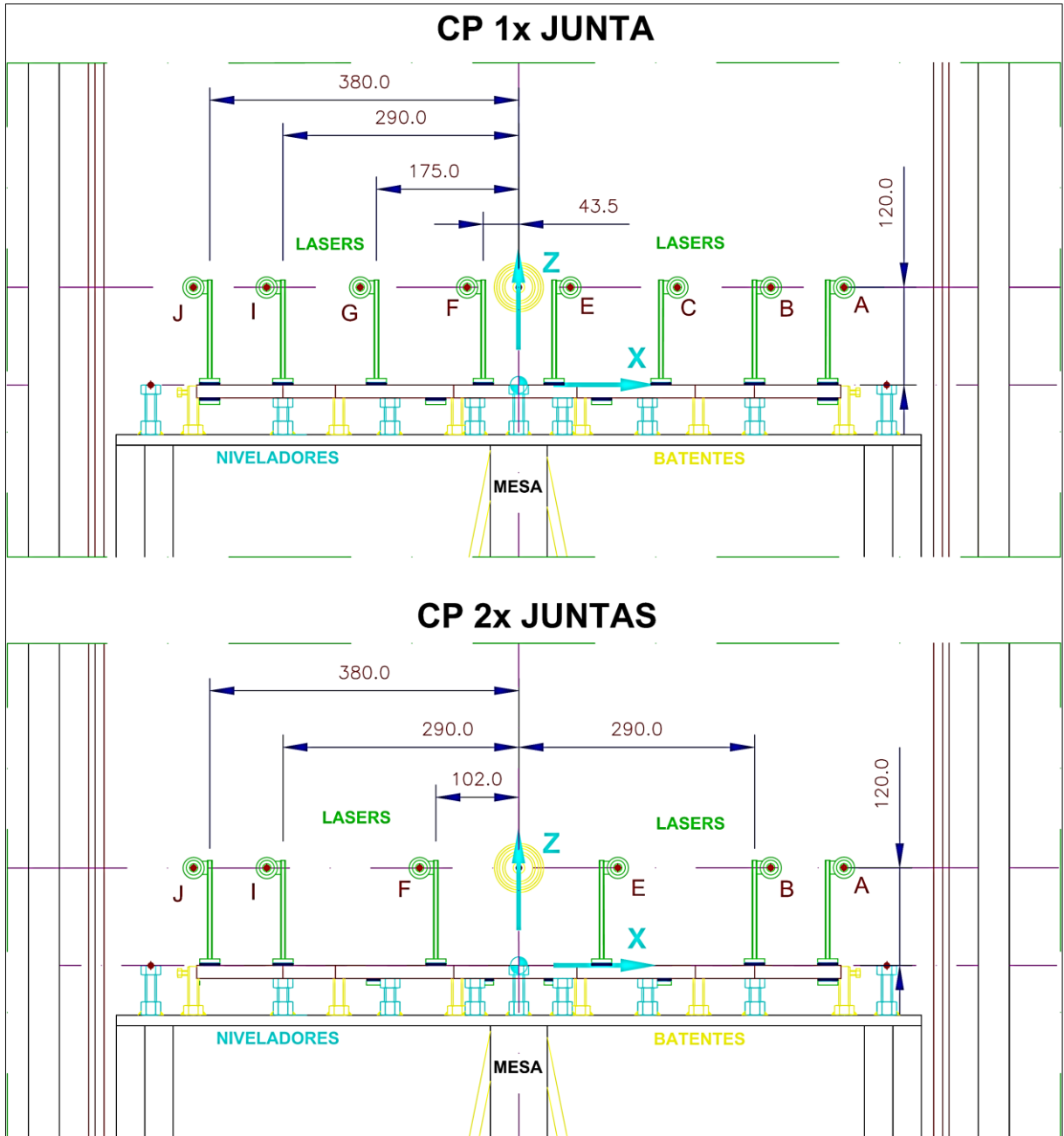


FIGURA 7.4 - Detalhe 3 da vista lateral direita.

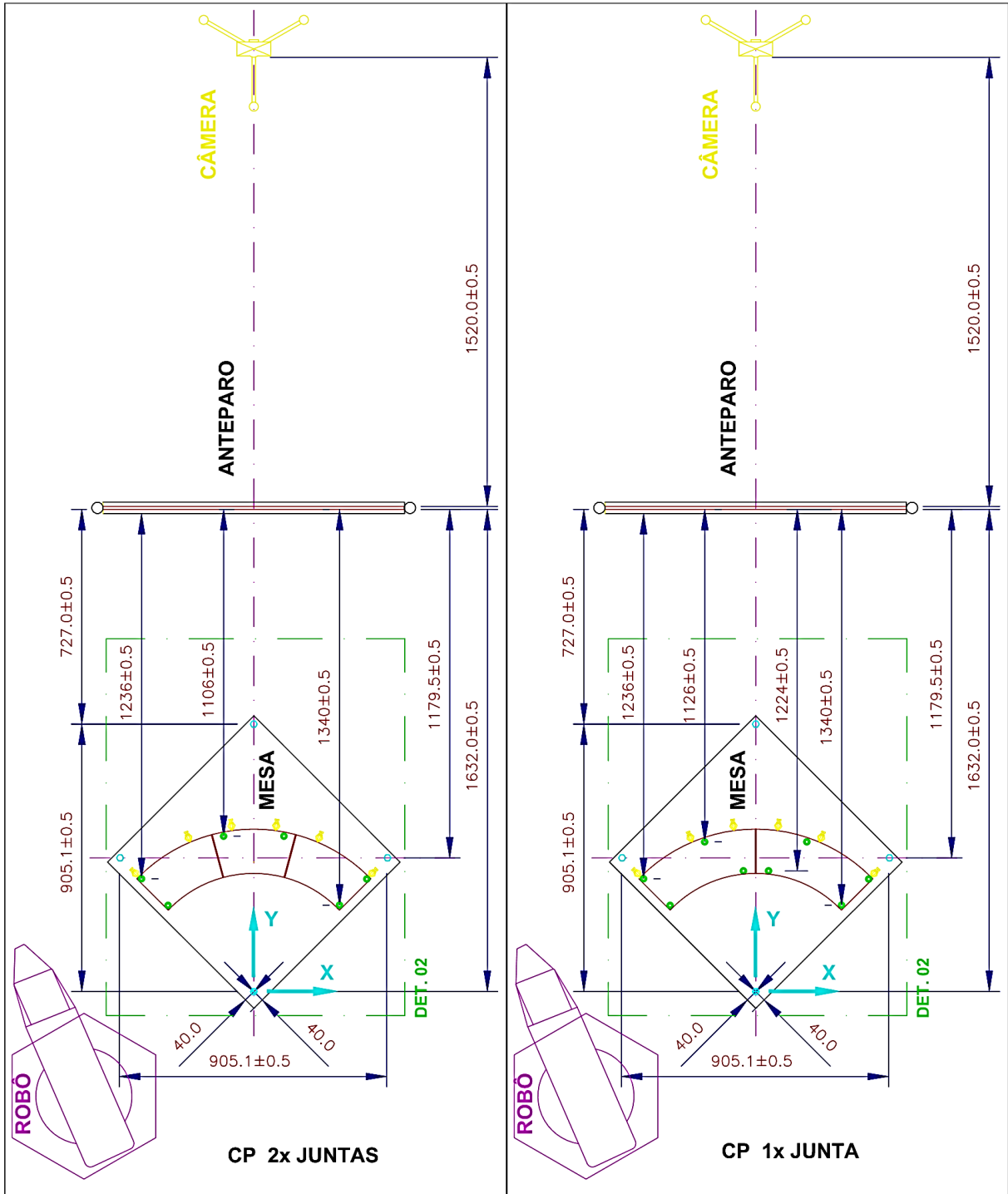


FIGURA 7.5 - Vista de planta do SMCDs.

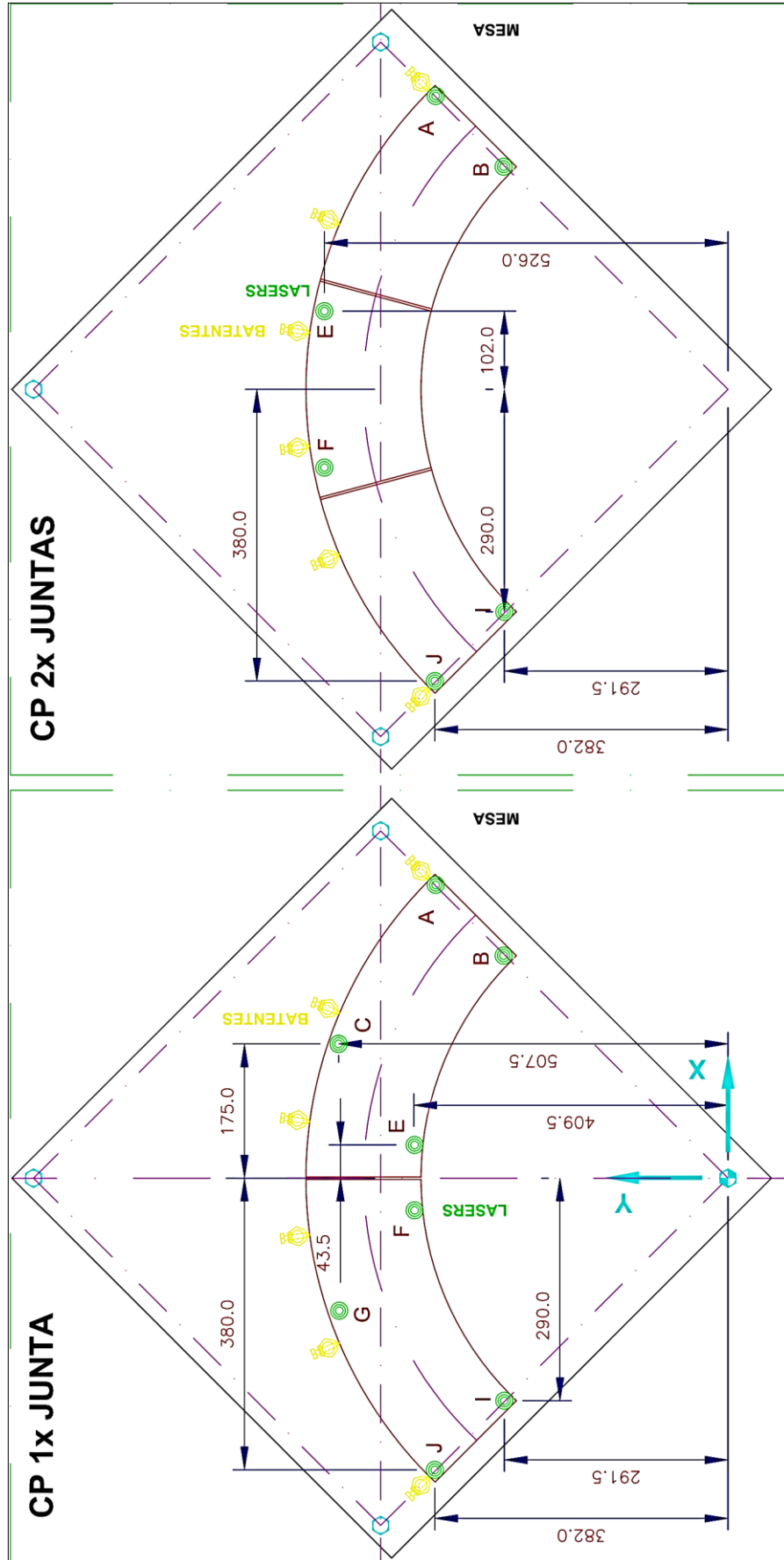


FIGURA 7.6 - Detalhe 2 da vista de planta.

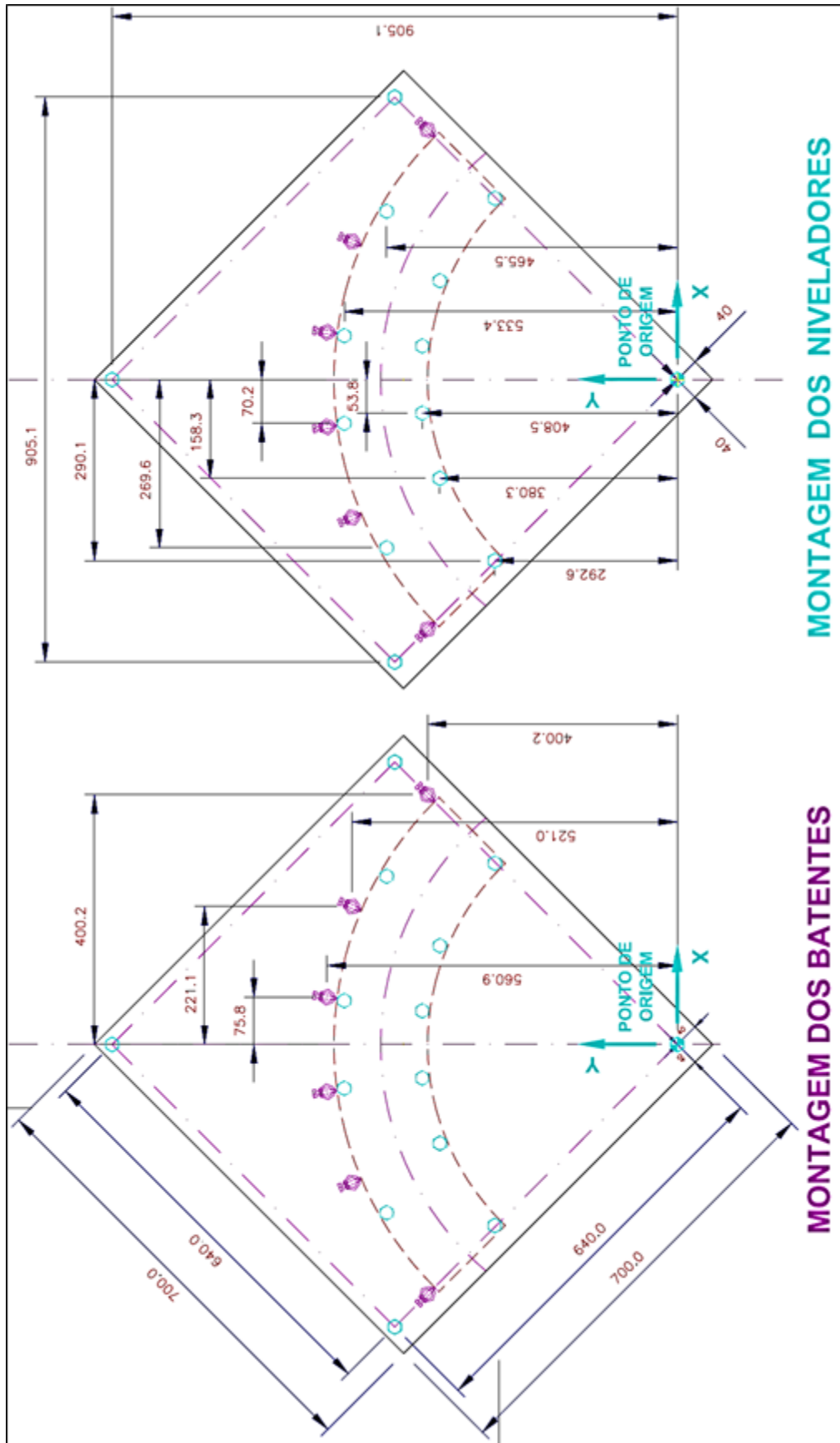


FIGURA 7.7 - Detalhe de montagem dos batentes e niveladores sobre mesa de trabalho.

## Apêndice 02 – Tabelas de valores da calibração da coordenada de usuário

TABELA 7.1 - Tabela de aferição de deslocamento do braço manipulador nos eixos “X” & “Y” (mm).

X \ Y	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450
0	0,0	49,5	100,0	150,0	199,5	249,5	300,0	350,5	400,5	450,0
50	0,0	50,0	100,5	150,5	200,5	250,5	300,5	350,5	400,0	450,0
100	-0,5	50,5	100,5	150,5	200,0	250,5	300,0	350,5	400,5	450,5
150	0,0	50,0	100,0	150,0	200,5	249,5	300,0	350,5	400,5	450,5
200	0,0	50,5	100,0	150,5	200,5	250,5	300,0	350,5	400,5	450,5
250	0,0	50,5	99,5	150,5	200,5	250,5	299,5	350,0	400,5	450,0
300	0,5	49,5	99,5	149,5	200,5	250,5	299,5	350,0	400,0	450,5
350	0,0	50,5	99,5	149,5	200,5	250,5	300,0	350,0	400,5	450,5
400	0,0	49,5	100,0	150,0	200,0	250,5	300,5	350,0	400,5	450,5
450	0,0	50,5	100,0	150,0	199,5	250,0	300,5	349,5	400,5	450,0
500	0,5	50,5	100,5	150,5	200,5	250,5	300,5	349,5	400,5	450,0
550	0,0	50,0	100,0	150,5	200,5	250,0	300,0	300,0	400,5	450,5
600	0,0	50,5	99,5	150,0	200,0	250,0	300,5	350,5	400,5	450,5
<b>Mínimo</b>		<b>-0,50</b>			<b>Máximo</b>			<b>0,50</b>		

TABELA 7.2 - Tabela de aferição da planicidade durante a movimentação do braço manipulador (mm).

X \ Y	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450		
0	0,00	0,03	0,08	0,12	0,03	0,08	0,12	0,28	0,41	0,42		
50	0,00	-0,03	0,22	0,20	0,00	0,22	0,16	0,27	0,35	0,34		
100	-0,05	-0,03	0,00	0,13	0,08	0,08	0,13	0,33	0,39	0,27		
150	-0,02	-0,06	0,08	0,23	0,26	0,14	0,23	0,43	0,41	0,39		
200	0,00	0,05	0,26	0,17	0,18	0,31	0,35	0,42	0,34	0,42		
250	-0,04	-0,03	0,18	0,13	0,08	0,33	0,39	0,40	0,33	0,37		
300	0,00	-0,04	0,08	0,12	0,12	0,31	0,41	0,37	0,37	0,39		
350	0,00	0,03	0,12	0,12	0,07	0,40	0,40	0,40	0,38	0,40		
400	0,10	0,00	0,08	0,31	0,11	0,41	0,43	0,33	0,39	0,36		
450	-0,04	-0,05	0,14	0,12	0,08	0,43	0,40	0,31	0,41	0,42		
500	0,21	0,03	0,08	0,22	0,19	0,42	0,43	0,40	0,40	0,34		
550	0,30	0,26	0,19	0,26	0,40	0,41	0,38	0,40	0,41	0,38		
600	0,29	0,27	0,20	0,28	0,37	0,40	0,38	0,42	0,42	0,39		
<b>Mínimo</b>		<b>-0,06</b>			<b>Máximo</b>			<b>0,43</b>			<b>Amplitude</b>	<b>0,49</b>

TABELA 7.3 - Tabela de aferição de deslocamento do braço manipulador no eixo Z (mm).

<b>Z</b> <b>X x Y</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>2,00</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>	<b>5,00</b>	<b>6,00</b>	<b>7,00</b>	<b>8,00</b>	<b>9,00</b>	<b>10,00</b>	<b>11,00</b>	<b>12,00</b>
<b>0 x 0</b>	0,00	0,98	2,01	3,02	4,00	4,99	6,00	6,97	8,00	9,03	9,99	11,01	12,04
<b>0 x 600</b>	0,01	0,99	2,01	3,04	3,97	4,98	6,01	6,99	8,00	9,04	10,01	10,98	12,00
<b>450 x 0</b>	-0,01	1,00	1,98	3,01	3,99	4,97	6,01	6,98	7,98	9,03	10,04	11,03	12,02
<b>250 x 300</b>	0,00	0,99	2,00	2,99	4,00	5,00	6,01	7,00	8,02	9,05	10,01	11,04	12,03
<b>450 x 600</b>	0,02	1,02	1,99	3,00	4,01	5,01	6,03	7,01	8,03	9,02	10,03	11,05	12,04
<b>Mínimo</b>		<b>-0,03</b>				<b>Máximo</b>		<b>0,05</b>					

Apêndice 03 – Desenhos de fabricação dos corpos de prova

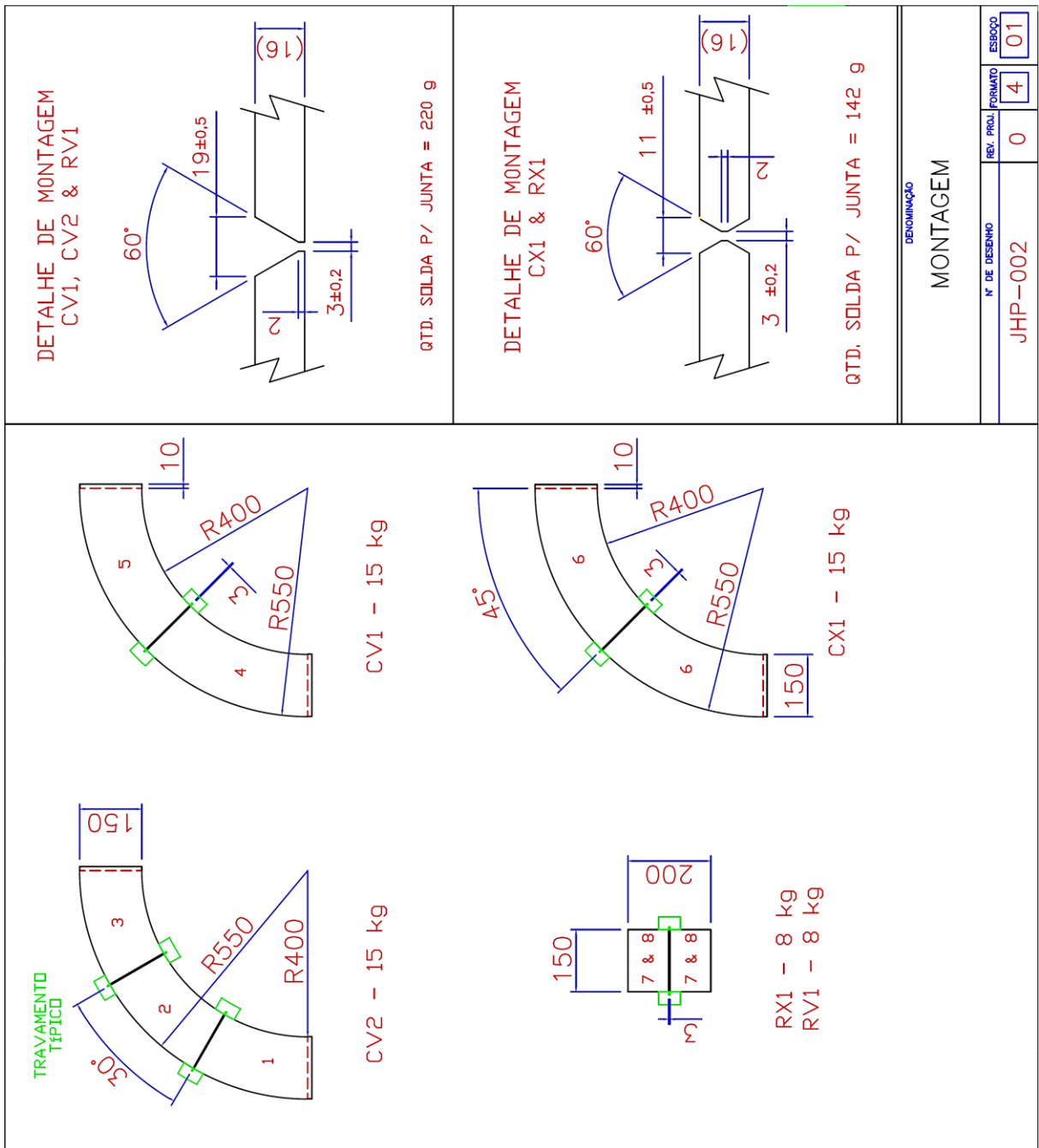


FIGURA 7.8 - Desenho de montagem dos corpos de prova.



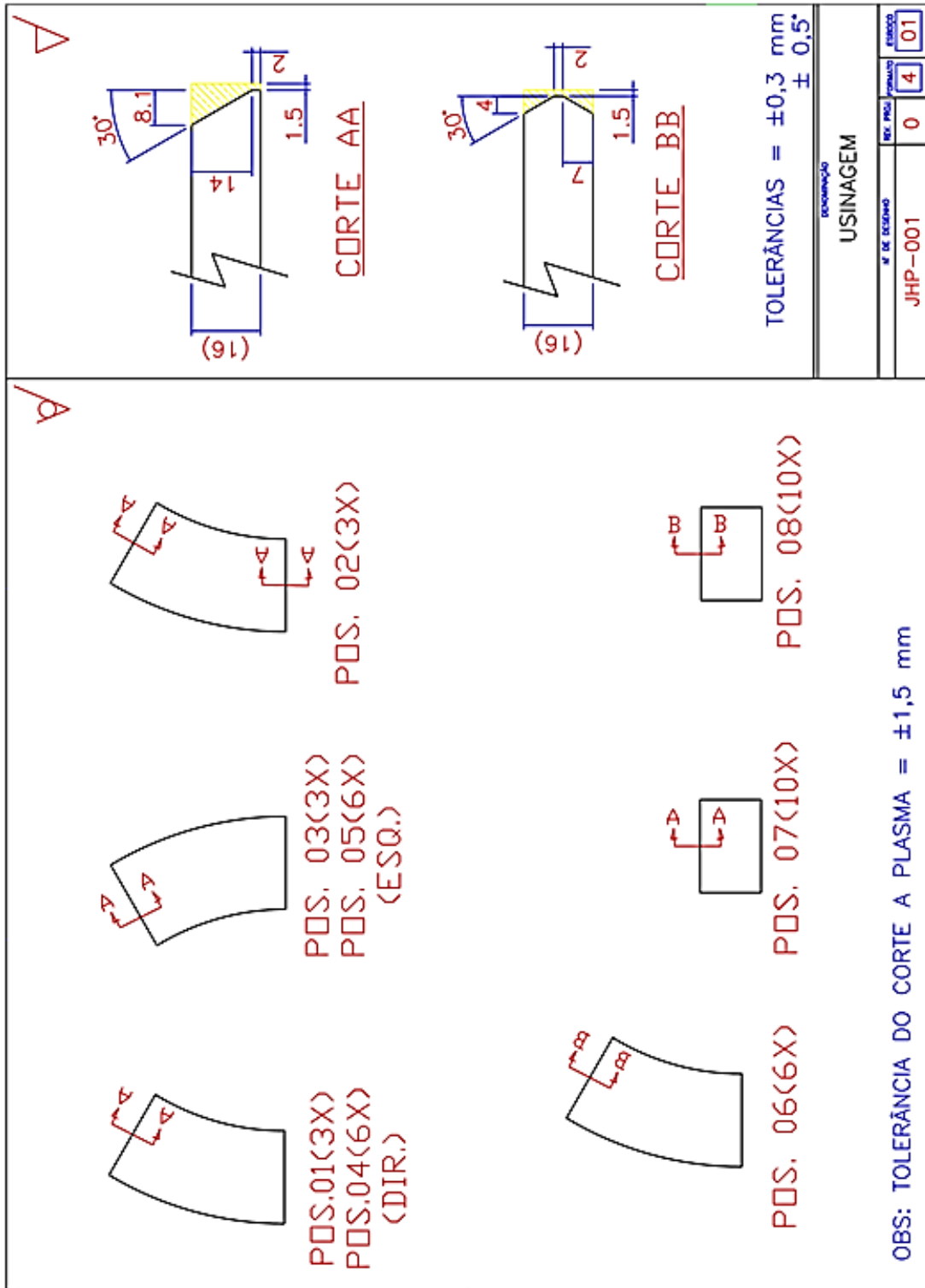


FIGURA 7.9 - Desenho de preparação e usinagem dos corpos de prova.

## Apêndice 04 - Roteiro para execução do procedimento experimental

00 - Posicionar o CP sobre a mesa de desempenho nivelada e realizar o controle da distorção angular inicial utilizando o inclinômetro digital (FIG. 7.10).



FIGURA 7.10 – Medição do corpo de prova sobre a mesa de desempenho.

- 01- Montar a FPM no braço manipulador e executar o programa de verificação dos pontos de referência da mesa de trabalho (JON-00-P).
- 02- Montar o back cerâmico na raiz.
- 03- Posicionar o CP sobre a mesa e alinhar pelo bisel.
- 04- Executar o programa de marcação dos pontos de referência no CP (JON-PC-01 ou 02).

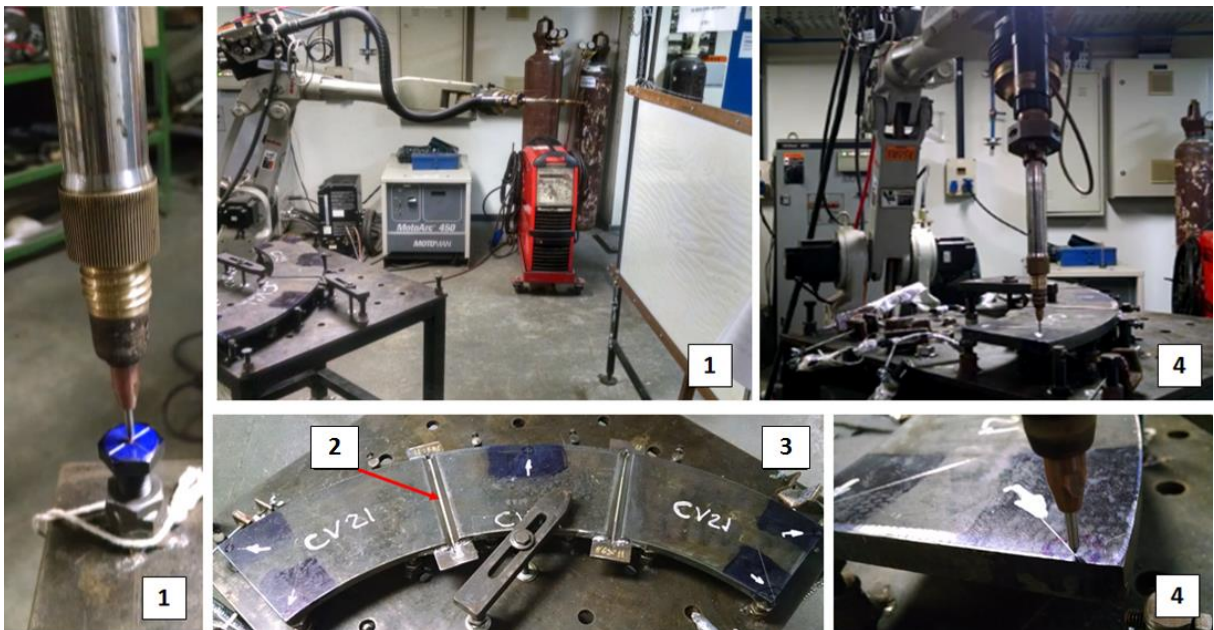


FIGURA 7.11 - Etapas 1 à 4 do procedimento experimental.

- 05- Verificar e registrar a tolerância da abertura da raiz (gabarito passa não passa).
- 06- Verificar e registrar a largura do bisel (paquímetro).
- 07- Verificar e registrar as dimensões dos raios interno 400 mm e externo 550 mm (trena).
- 08- Verificar e registrar a distorção inicial de cada peça do CP (inclinômetro digital).

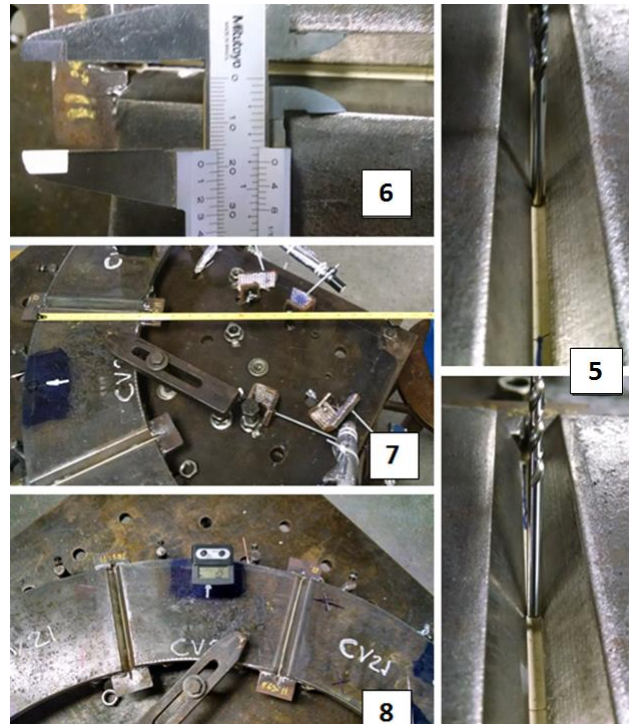


FIGURA 7.12 - Etapas 5 à 8 do procedimento experimental.

- 09- Desmontar a FPM e montar o relógio comparador no braço manipulador.
- 10- Executar o programa de medição de altura dos pontos de referência da mesa (JON-00-R).
- 11- Executar o programa de controle de planicidade com relógio comparador (programa JON-RC-01 ou 02).

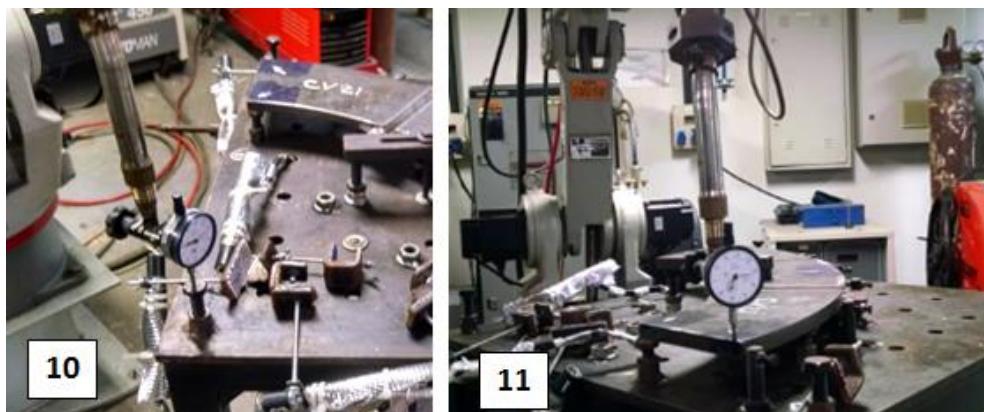


FIGURA 7.13 - Etapas 10 e 11 do procedimento experimental.



- 12- Posicionar os sensores a laser, conforme marcação realizada no CP (item 4), e alinhar os feixes de luminosos com pontos de referências no painel do anteparo.
- 13- Posicionar os anteparos de proteção térmica dos sensores a laser.
- 14- Marcar a posição inicial dos pontos luminosos e a identificação do CP no painel.
- 15- Desmontar o relógio comparador e montar o bico de contato.
- 16- Montar os dois anteparos negros para proteção da filmagem.
- 17- Posicionar a câmera conforme marcação no painel do anteparo e no piso, ajustar o foco (zoom 1.2x) e iniciar o vídeo.

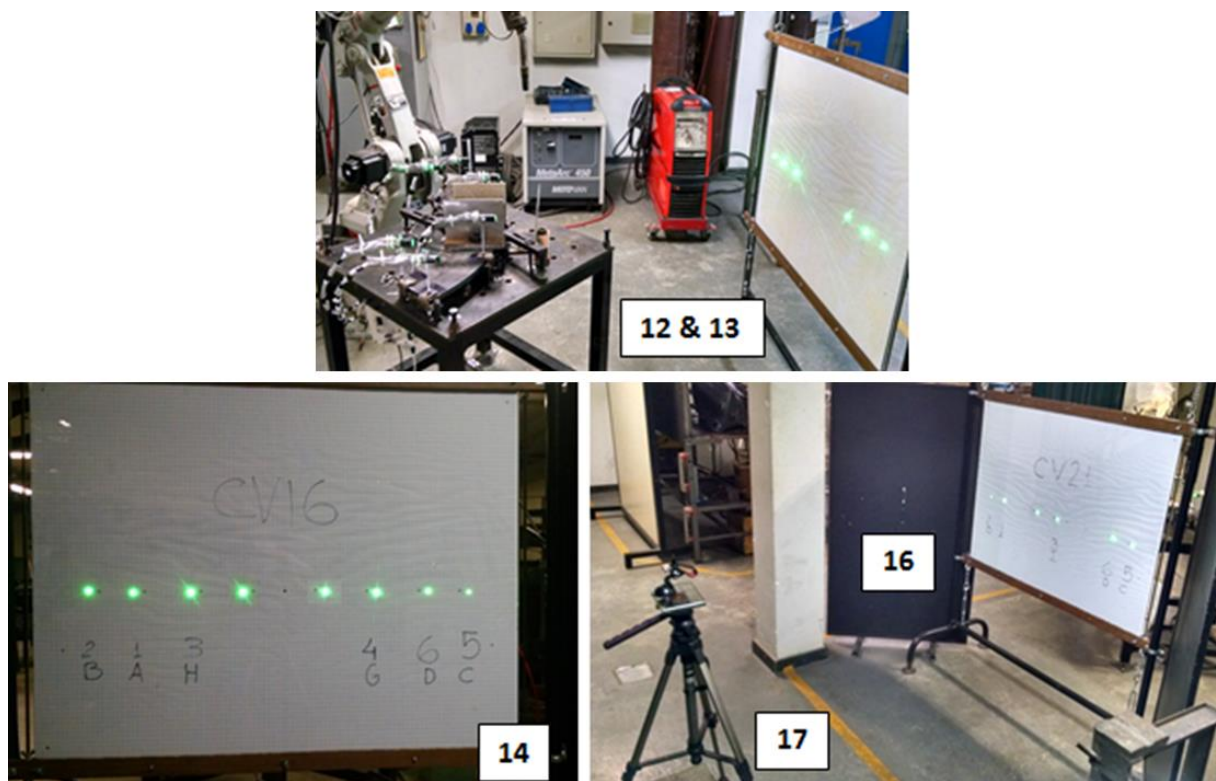


FIGURA 7.14 - Etapas 12 à 17 do procedimento experimental.

- 18- Executar os programas de soldagem (JON-V1, JON-X1 ou JON-V2). Realizar limpeza entre passes por escovamento manual.
- 19- Após a finalizada a soldagem, aguardar o tempo de resfriamento. Desligar a filmagem e desmontar os sensores laser e as proteções.
- 20- Marcar a posição final dos pontos luminosos no anteparo.
- 21- Verificar e registrar a largura e altura do reforço de solda (paquímetro).
- 22- Verificar e registrar os raios interno 400 mm e externo 550 mm (trena).

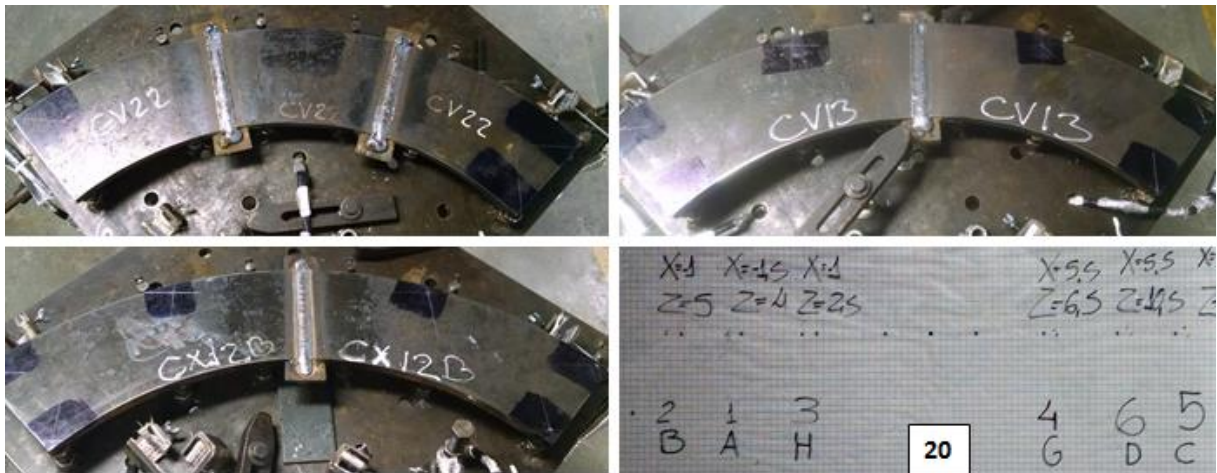


FIGURA 7.15 - Etapas 18 à 20 do procedimento experimental.

- 23- Montar a FPM, verificar e registrar o deslocamento dos pontos demarcados sobre a superfície da peça, executando novamente o programa de marcação (JON-PC-01 ou 02).
- 24- Desmontar a FPM e montar o relógio comparador.

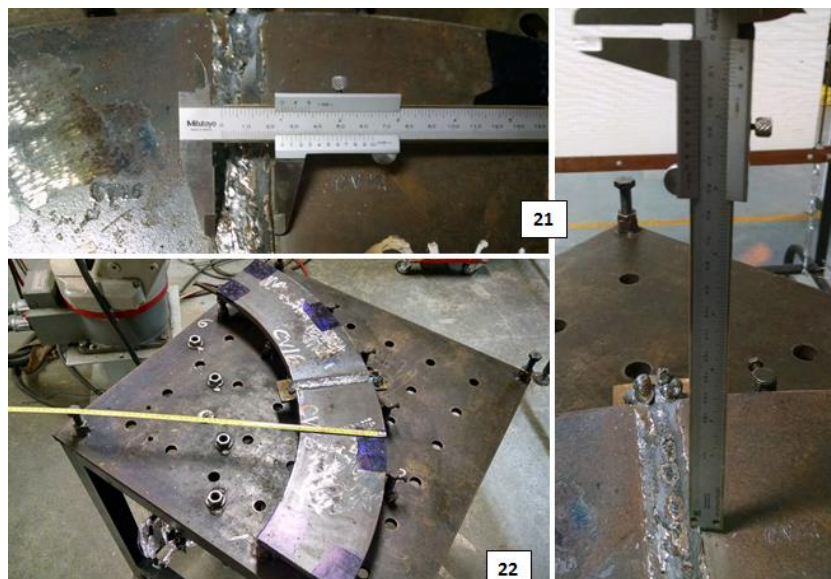


FIGURA 7.16 - Etapas 21e 22 do procedimento experimental.

- 25- Executar novamente programa de controle de planicidade (programa JON-RC-01 ou JON-RC-02).
- 26- Verificar e registrar a distorção angular no sentido do eixo "X" e "Y" (inclinômetro digital).
- 27- Posicionar o CP sobre a mesa desempenho nivelada e repetir o controle de distorção angular utilizando o inclinômetro digital.

## Apêndice 05 – Tabelas de valores para o controle das dimensões externas dos corpos de prova e controle dimensional dos biseis e reforços de solda

As TAB. 7.4 TABELA 7.4 à TAB. 7.6 apresentam os valores dos controles dimensionais dos raios interno e externo medidos com trena antes e após soldagem para os corpos de prova tipo CX1, CV2 e CV1.

TABELA 7.4 – Controle dimensional dos raios interno e externo para corpos de prova tipo CX1.

Pontos	CX11			CX12			CX13			
	Pré solda	Pós solda	≠	Pré solda	Pós solda	≠	Pré solda	Pós solda	≠	
Raio externo ( mm)	01	556,0	555,5	-0,5	551,0	550,0	-1,0	550,0	549,5	-0,5
	02	554,0	552,5	-1,5	547,5	546,0	-1,5	549,0	549,0	0,0
	03	549,0	549,0	0,0	545,5	545,0	-0,5	547,0	546,5	-0,5
	04	551,0	550,0	-1,0	544,5	543,5	-1,0	546,0	545,5	-0,5
	05	554,0	553,5	-0,5	547,0	546,0	-1,0	546,0	545,0	-1,0
	MÉDIA	<b>552,8</b>	<b>552,1</b>	<b>-0,7</b>	<b>547,1</b>	<b>546,1</b>	<b>-1,0</b>	<b>547,6</b>	<b>547,1</b>	<b>-0,5</b>
Erro	±3,4	±3,3	±0,7	±3,1	±3,0	±0,4	±2,3	±2,5	±0,4	
Raio interno (mm)	06	406,0	406,0	0,0	401,0	400,0	-1,0	400,5	400,0	-0,5
	07	402,5	402,0	-0,5	397,5	397,0	-0,5	398,0	397,5	-0,5
	08	399,0	398,0	-1,0	395,0	394,5	-0,5	396,0	395,5	-0,5
	09	400,5	400,0	-0,5	396,5	395,0	-1,5	396,0	396,0	0,0
	10	403,0	402,5	-0,5	395,0	394,0	-1,0	396,5	395,0	-1,5
	MÉDIA	<b>402,2</b>	<b>401,7</b>	<b>-0,5</b>	<b>397,0</b>	<b>396,1</b>	<b>-0,9</b>	<b>397,4</b>	<b>396,8</b>	<b>-0,6</b>
Erro	±3,3	±3,7	±0,4	±3,1	±3,1	±0,5	±2,4	±2,5	±0,7	

TABELA 7.5 – Controle dimensional dos raios interno e externo para corpos de prova tipo CV2.

Pontos	CV21			CV22			CV23			
	Pré solda	Pós solda	≠	Pré solda	Pós solda	≠	Pré solda	Pós solda	≠	
Raio externo ( mm)	01	555,0	554,0	-1,0	555,0	554,0	-1,0	555,0	554,0	-1,0
	02	549,0	549,0	0,0	549,0	549,0	0,0	549,0	549,0	0,0
	03	550,0	549,0	-1,0	550,0	549,0	-1,0	550,0	549,0	-1,0
	04	550,0	550,0	0,0	550,0	550,0	0,0	550,0	550,0	0,0
	05	552,5	552,0	-0,5	552,5	552,0	-0,5	552,5	552,0	-0,5
	MÉDIA	<b>551,3</b>	<b>550,8</b>	<b>-0,5</b>	<b>551,3</b>	<b>550,8</b>	<b>-0,5</b>	<b>551,3</b>	<b>550,8</b>	<b>-0,5</b>
Erro	±3,0	±2,7	±0,6	±3,0	±2,7	±0,6	±3,0	±2,7	±0,6	
Raio interno (mm)	06	404,5	403,0	-1,5	404,5	403,0	-1,5	404,5	403,0	-1,5
	07	397,5	397,0	-0,5	397,5	397,0	-0,5	397,5	397,0	-0,5
	08	399,0	399,0	0,0	399,0	399,0	0,0	399,0	399,0	0,0
	09	400,0	400,0	0,0	400,0	400,0	0,0	400,0	400,0	0,0
	10	401,5	401,0	-0,5	401,5	401,0	-0,5	401,5	401,0	-0,5
	MÉDIA	<b>400,5</b>	<b>400,0</b>	<b>-0,5</b>	<b>400,5</b>	<b>400,0</b>	<b>-0,5</b>	<b>400,5</b>	<b>400,0</b>	<b>-0,5</b>
Erro	±3,3	±2,8	±0,8	±3,3	±2,8	±0,8	±3,3	±2,8	±0,8	

TABELA 7.6 – Controle dimensional dos raios interno e externo para corpos de prova tipo CV1.

Pontos	CV11			CV12			CV13			CV14			CV15			CV16		
	Pré solda	Pós solda	#	Pós solda	Pré solda	#	Pré solda	Pós solda	#	Pós solda	Pré solda	#	Pré solda	Pós solda	#	Pós solda	Pré solda	#
01	551,5	551,0	-0,5	550,0	550,0	0,0	551,0	550,0	-1,0	547,0	547,0	0,0	547,5	546,0	-1,5	550,0	548,5	-1,5
02	549,0	548,0	-1,0	547,5	546,0	-1,5	549,0	548,0	-1,0	546,5	546,0	-0,5	546,5	545,0	-1,5	546,0	545,0	-1,0
03	549,0	548,5	-0,5	544,5	543,5	-1,0	549,0	549,0	0,0	545,5	545,0	-0,5	545,0	544,5	-0,5	544,0	543,5	-0,5
04	551,5	551,0	-0,5	546,5	545,0	-1,5	552,5	552,0	-0,5	549,0	548,5	-0,5	548,5	548,0	-0,5	545,0	543,5	-1,5
05	553,5	552,5	-1,0	550,0	549,0	-1,0	553,0	552,5	-0,5	553,0	552,5	-0,5	552,5	551,5	-1,0	550,0	549,5	-0,5
<b>Média</b>	<b>550,9</b>	<b>550,2</b>	<b>-0,7</b>	<b>547,7</b>	<b>546,7</b>	<b>-1,0</b>	<b>550,9</b>	<b>550,3</b>	<b>-0,6</b>	<b>548,2</b>	<b>547,8</b>	<b>-0,4</b>	<b>548,0</b>	<b>547,0</b>	<b>-1,0</b>	<b>547,0</b>	<b>546,0</b>	<b>-1,0</b>
<b>Erro</b>	<b>±2,4</b>	<b>±2,3</b>	<b>±0,3</b>	<b>±2,9</b>	<b>±3,4</b>	<b>±0,8</b>	<b>±2,3</b>	<b>±2,4</b>	<b>±0,5</b>	<b>±3,7</b>	<b>±3,6</b>	<b>±0,3</b>	<b>±3,5</b>	<b>±3,5</b>	<b>±0,6</b>	<b>±3,5</b>	<b>±3,5</b>	<b>±0,6</b>
06	401,0	400,5	-0,5	399,5	399,0	-0,5	400,0	400,0	0,0	397,5	396,0	-1,5	397,5	396,0	-1,5	401,5	400,0	-1,5
07	398,0	397,0	-1,0	397,5	396,5	-1,0	398,0	397,0	-1,0	394,0	393,5	-0,5	395,0	393,5	-1,5	396,0	395,0	-1,0
08	397,5	397,0	-0,5	397,0	396,0	-1,0	397,5	396,5	-1,0	394,5	394,0	-0,5	394,5	394,0	-0,5	395,5	394,0	-1,5
09	400,0	399,5	-0,5	396,5	395,5	-1,0	402,0	401,5	-0,5	398,5	398,0	-0,5	397,5	397,0	-0,5	396,5	395,0	-1,5
10	404,0	403,5	-0,5	399,0	398,0	-1,0	405,0	404,0	-1,0	401,0	400,0	-1,0	402,0	401,0	-1,0	401,0	400,0	-1,0
<b>Média</b>	<b>400,1</b>	<b>399,5</b>	<b>-0,6</b>	<b>397,9</b>	<b>397,0</b>	<b>-0,9</b>	<b>400,5</b>	<b>399,8</b>	<b>-0,7</b>	<b>397,1</b>	<b>396,3</b>	<b>-0,8</b>	<b>397,3</b>	<b>396,3</b>	<b>-1,0</b>	<b>398,1</b>	<b>396,8</b>	<b>-1,3</b>
<b>Erro</b>	<b>±3,2</b>	<b>±3,4</b>	<b>±0,3</b>	<b>±1,6</b>	<b>±1,8</b>	<b>±0,3</b>	<b>±3,8</b>	<b>±3,9</b>	<b>±0,6</b>	<b>±3,6</b>	<b>±3,4</b>	<b>±0,6</b>	<b>±3,7</b>	<b>±3,7</b>	<b>±0,6</b>	<b>±3,6</b>	<b>±3,7</b>	<b>±0,3</b>
<b>Raio externo (mm)</b>																		
<b>Raio interno (mm)</b>																		

As TAB. 7.7 à TAB. 7.9 apresentam os valores dos controles dimensionais dos biseis e reforços de soldas para os corpos de prova tipo CX1, CV2 e CV1.

TABELA 7.7 – Controle dimensional dos biseis e reforços de solda para corpos de prova tipo CX1.

CP	Pontos	b (mm)	lb (mm)	lb1 (mm)	d (mm)	lr (mm)	lr1 (mm)	ar (mm)	ar1 (mm)
CX11	I	15,8	11,0	11,1	ok	17,1	17,0	1,5	1,5
	M	15,8	1,1,1	11,0	ok	17,9	17,9	2,1	2,0
	F	15,8	11,2	10,9	ok	17,5	17,2	1,8	1,6
	MÉDIA	<b>15,8</b>	<b>11,1</b>	<b>11,0</b>	-	<b>17,5</b>	<b>17,4</b>	<b>1,8</b>	<b>1,7</b>
	ERRO	<b>0,0</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	-	<b>1,0</b>	<b>1,2</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>
CX12	I	15,9	11,0	11,3	ok	16,0	17,3	4,0	2,3
	M	15,8	11,1	11,4	ok	17,1	16,4	3,2	2,7
	F	15,9	11,0	11,2	ok	16,3	16,7	2,8	3,0
	MÉDIA	<b>15,9</b>	<b>11,0</b>	<b>11,3</b>	-	<b>16,5</b>	<b>16,8</b>	<b>3,3</b>	<b>2,7</b>
	ERRO	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	-	<b>1,4</b>	<b>1,1</b>	<b>1,5</b>	<b>0,9</b>
CX13	I	15,8	11,0	11,4	ok	18,0	17,4	3,0	2,2
	M	15,7	11,2	11,5	ok	18,3	16,9	2,4	3,0
	F	15,8	11,2	11,3	ok	17,4	17,8	2,1	1,9
	MÉDIA	<b>15,8</b>	<b>11,1</b>	<b>11,4</b>	-	<b>17,9</b>	<b>17,4</b>	<b>2,5</b>	<b>2,4</b>
	ERRO	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	-	<b>1,1</b>	<b>1,1</b>	<b>1,1</b>	<b>1,4</b>

TABELA 7.8 – Controle dimensional dos biseis e reforços de solda para corpos de prova tipo CV2.

CP	Pontos	b (mm)	lb (mm)	lb1 (mm)	d (mm)	lr (mm)	lr1 (mm)	ar (mm)	ar1 (mm)
CV21	I	15,7	19,1	18,9	ok	25,5	25,0	4,0	3,8
	M	15,9	19,0	18,9	ok	24,0	24,1	3,4	2,6
	F	15,7	19,2	18,8	ok	24,3	23,8	3,1	3,4
	MÉDIA	<b>15,8</b>	<b>19,1</b>	<b>18,9</b>	-	<b>24,6</b>	<b>24,3</b>	<b>3,5</b>	<b>3,3</b>
	ERRO	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	-	<b>2,0</b>	<b>1,6</b>	<b>1,1</b>	<b>1,5</b>
CV22	I	15,9	19,0	19,2	ok	24,9	25,0	3,0	2,8
	M	15,9	19,1	19,3	ok	24,2	24,1	2,5	3,4
	F	15,9	19,0	19,1	ok	24,4	24,0	3,2	2,6
	MÉDIA	<b>15,9</b>	<b>19,0</b>	<b>19,2</b>	-	<b>24,5</b>	<b>24,4</b>	<b>2,9</b>	<b>2,9</b>
	ERRO	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	-	<b>0,9</b>	<b>1,4</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>
CV23	I	15,7	18,7	19,0	ok	25,0	25,0	3,0	2,5
	M	15,9	18,8	18,9	ok	24,6	24,1	3,6	2,2
	F	15,8	18,7	18,8	ok	23,9	24,8	2,7	3,6
	MÉDIA	<b>15,8</b>	<b>18,7</b>	<b>18,9</b>	-	<b>24,5</b>	<b>24,6</b>	<b>3,1</b>	<b>2,8</b>
	ERRO	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	-	<b>1,4</b>	<b>1,2</b>	<b>1,1</b>	<b>1,8</b>



TABELA 7.9 – Controle dimensional dos biseis e reforços de solda para corpos de prova tipo CV1.

CP	Pontos	b (mm)	lb (mm)	lb1 (mm)	d (mm)	lr (mm)	lr1 (mm)	ar (mm)	ar1 (mm)
CV11	I	16,0	19,2	-	ok	22,1	-	2,5	-
	M	15,8	19,1	-	ok	22,6	-	2,4	-
	F	15,9	19,2	-	ok	22,3	-	2,1	-
	MÉDIA	<b>15,9</b>	<b>19,2</b>	-	-	<b>22,3</b>	-	<b>2,3</b>	-
	ERRO	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	-	-	<b>0,6</b>	-	<b>0,5</b>	-
CV12	I	15,9	19,1	-	ok	24,0	-	2,4	-
	M	15,8	19,1	-	ok	24,1	-	2,2	-
	F	15,9	19,2	-	ok	24,0	-	2,6	-
	MÉDIA	<b>15,9</b>	<b>19,1</b>	-	-	<b>24,0</b>	-	<b>2,4</b>	-
	ERRO	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	-	-	<b>0,1</b>	-	<b>0,5</b>	-
CV13	I	15,8	18,7	-	ok	25,0	-	2,5	-
	M	15,8	18,8	-	ok	24,9	-	2,4	-
	F	15,8	18,8	-	ok	24,6	-	2,8	-
	MÉDIA	<b>15,8</b>	<b>18,8</b>	-	-	<b>24,8</b>	-	<b>2,6</b>	-
	ERRO	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	-	-	<b>0,5</b>	-	<b>0,5</b>	-
CV14	I	16,0	18,9	-	ok	24,5	-	3,0	-
	M	16,0	19,0	-	ok	25,0	-	2,4	-
	F	15,9	19,0	-	ok	24,2	-	2,6	-
	MÉDIA	<b>16,0</b>	<b>19,0</b>	-	-	<b>24,6</b>	-	<b>2,7</b>	-
	ERRO	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	-	-	<b>1,0</b>	-	<b>0,8</b>	-
CV15	I	15,7	18,7	-	ok	24,5	-	2,5	-
	M	15,8	18,7	-	ok	24,9	-	2,7	-
	F	15,8	18,9	-	ok	24,1	-	2,0	-
	MÉDIA	<b>15,8</b>	<b>18,8</b>	-	-	<b>24,5</b>	-	<b>2,4</b>	-
	ERRO	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	-	-	<b>1,0</b>	-	<b>0,9</b>	-
CV16	I	15,7	19,2	-	ok	25,0	-	3,0	-
	M	15,8	19,1	-	ok	24,0	-	2,6	-
	F	15,9	19,1	-	ok	24,5	-	2,3	-
	MÉDIA	<b>15,8</b>	<b>19,1</b>	-	-	<b>24,5</b>	-	<b>2,6</b>	-
	ERRO	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	-	-	<b>1,2</b>	-	<b>0,9</b>	-

**Apêndice 06 – Tabelas de valores para o controle dimensional das distorções antes e após soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova apoiados sobre a mesa de desempenho**

As TAB. 7.10 à TAB. 7.12 apresentam os valores das distorções medidas com inclinômetro digital para os corpos de prova tipo CV1, CX1 e CV2 apoiados sobre a mesa de desempenho. Afim de eliminar das medições as variações iniciais já presentes nos corpos de prova, foram realizadas medições antes e após a soldagem, sendo a distorção final a diferença entre esses valores.

TABELA 7.10 – Controle dimensional das distorções de soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova tipo CV1 apoiados sobre a mesa de desempenho.

	Pontos	$-\theta x/2$	$\theta y$	Pontos	$+\theta x/2$	$\theta y$		Pontos	$-\theta x/2$	$\theta y$	Pontos	$+\theta x/2$	$\theta y$
	CV11	3	-0,2°	0,2°	1	0,3°		0,1°	CV14	3	0,0°	0,1°	1
-1,1°			0,3°	1,2°		0,2°	-1,5°	0,2°			1,1°	0,1°	
<b>-0,9°</b>			<b>0,1°</b>	<b>0,9°</b>		<b>0,1°</b>	<b>-1,5°</b>	<b>0,1°</b>			<b>1,0°</b>	<b>0,1°</b>	
4		0,0°	0,1°	2	0,2°	-0,1°	4	0,0°		0,1°	2	0,2°	0,0°
		-1,0°	0,2°		1,2°	0,0°		-1,4°		0,1°		1,3°	0,1°
		<b>-1,0°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,0°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-1,4°</b>		<b>0,0°</b>		<b>1,1°</b>	<b>0,1°</b>
Média	-1,0°	0,1°	Média	1,0°	0,1°	Média	-1,5°	0,1°	Média	1,1°	0,1°		
S	0,1°	0,0°	S	0,1°	0,0°	S	0,1°	0,1°	S	0,1°	0,0°		
		$\theta x$		$1,9^\circ$				$\theta x$		$2,5^\circ$			
CV12	3	-0,2°	0,2°	1	0,1°	0,1°	CV15	3	0,0°	0,1°	1	0,1°	0,0°
		-1,5°	0,2°		1,5°	0,1°			-1,5°	0,3°		1,3°	0,1°
		<b>-1,3°</b>	<b>0,0°</b>		<b>1,4°</b>	<b>0,0°</b>			<b>-1,5°</b>	<b>0,2°</b>		<b>1,2°</b>	<b>0,1°</b>
	4	0,0°	0,1°	2	0,2°	-0,1°		4	0,0°	0,0°	2	0,2°	0,0°
		-1,4°	0,2°		1,3°	0,0°			-1,6°	0,3°		1,4°	0,3°
		<b>-1,4°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,1°</b>	<b>0,1°</b>			<b>-1,6°</b>	<b>0,3°</b>		<b>1,2°</b>	<b>0,3°</b>
Média	-1,4°	0,1°	Média	1,3°	0,1°	Média	-1,6°	0,3°	Média	1,2°	0,2°		
S	0,1°	0,1°	S	0,2°	0,1°	S	0,1°	0,1°	S	0,0°	0,1°		
		$\theta x$		$2,6^\circ$				$\theta x$		$2,8^\circ$			
CV13	3	-0,2°	0,2°	1	0,1°	0,0°	CV16	3	-0,2°	0,1°	1	0,0°	0,0°
		-1,5°	0,2°		1,3°	0,1°			-1,5°	0,2°		1,3°	0,1°
		<b>-1,3°</b>	<b>0,0°</b>		<b>1,2°</b>	<b>0,1°</b>			<b>-1,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,3°</b>	<b>0,1°</b>
	4	0,0°	0,1°	2	0,2°	0,0°		4	-0,3°	0,0°	2	0,1°	0,0°
		-1,3°	0,2°		1,3°	0,0°			-1,5°	0,1°		1,4°	0,1°
		<b>-1,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,1°</b>	<b>0,0°</b>			<b>-1,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,3°</b>	<b>0,1°</b>
Média	-1,3°	0,1°	Média	1,2°	0,1°	Média	-1,3°	0,1°	Média	1,3°	0,1°		
S	0,0°	0,1°	S	0,1°	0,1°	S	0,1°	0,0°	S	0,0°	0,0°		
		$\theta x$		$2,5^\circ$				$\theta x$		$2,6^\circ$			

TABELA 7.11 – Controle dimensional das distorções de soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova tipo CX1 apoiados sobre a mesa de desempenho.

	CX11 LADO A							CX11 LADO B					
	Pontos	- $\theta x/2$	$\theta y$	PONTOS	+ $\theta x/2$	$\theta y$		Pontos	- $\theta x/2$	$\theta y$	PONTOS	+ $\theta x/2$	$\theta y$
CX11 LADO A	3	0,0°	0,1°	1	0,1°	0,1°	3	0,1°	0,1°	1	-0,2°	0,1°	
		-0,1°	0,2°		0,4°	0,2°		-0,2°	0,2°		0,3°	0,2°	
		<b>-0,1°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-0,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,5°</b>	<b>0,1°</b>	
	4	0,0°	0,0°	2	0,0°	0,0°	4	0,2°	0,1°	2	-0,2°	0,0°	
		-0,1°	0,1°		0,2°	0,0°		-0,2°	0,1°		0,3°	0,1°	
		<b>-0,1°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,2°</b>	<b>0,0°</b>		<b>-0,4°</b>	<b>0,0°</b>		<b>0,5°</b>	<b>0,1°</b>	
Média	-0,1°	0,1°	MÉDIA	0,3°	0,1°	Média	-0,4°	0,1°	MÉDIA	0,5°	0,1°		
S	0,0°	0,0°	S	0,1°	0,1°	S	0,1°	0,1°	S	0,0°	0,0°		
		<b><math>\theta x</math></b>		<b>0,4°</b>			<b><math>\theta x</math></b>			<b>0,9°</b>			
	CX12 LADO A							CX12 LADO B					
	Pontos	- $\theta x/2$	$\theta y$	PONTOS	+ $\theta x/2$	$\theta y$		Pontos	- $\theta x/2$	$\theta y$	PONTOS	+ $\theta x/2$	$\theta y$
CX12 LADO A	3	-0,2°	0,2°	1	0,1°	0,1°	3	0,2°	0,2°	1	-0,1°	0,1°	
		-0,4°	0,3°		0,3°	0,0°		-0,5°	0,2°		0,2°	0,2°	
		<b>-0,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,2°</b>	<b>-0,1°</b>		<b>-0,7°</b>	<b>0,0°</b>		<b>0,3°</b>	<b>0,1°</b>	
	4	0,0°	0,1°	2	0,1°	-0,1°	4	0,3°	0,1°	2	-0,2°	-0,1°	
		-0,3°	0,2°		0,3°	0,0°		-0,3°	0,2°		0,1°	0,0°	
		<b>-0,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-0,6°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,3°</b>	<b>0,1°</b>	
Média	-0,3°	0,1°	MÉDIA	0,2°	0,0°	Média	-0,7°	0,1°	MÉDIA	0,3°	0,1°		
S	0,1°	0,0°	S	0,0°	0,1°	S	0,1°	0,1°	S	0,0°	0,0°		
		<b><math>\theta x</math></b>		<b>0,5°</b>			<b><math>\theta x</math></b>			<b>1,0°</b>			
	CX13 LADO A							CX13 LADO B					
	Pontos	- $\theta x/2$	$\theta y$	PONTOS	+ $\theta x/2$	$\theta y$		Pontos	- $\theta x/2$	$\theta y$	PONTOS	+ $\theta x/2$	$\theta y$
CX13 LADO A	3	-0,2°	0,2°	1	0,1°	0,0°	3	0,2°	0,2°	1	-0,1°	0,1°	
		-0,4°	0,3°		0,3°	0,1°		-0,3°	0,3°		0,3°	0,2°	
		<b>-0,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-0,5°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,4°</b>	<b>0,1°</b>	
	4	0,1°	0,1°	2	0,2°	0,0°	4	0,2°	0,1°	2	-0,2°	0,0°	
		-0,1°	0,2°		0,3°	0,0°		-0,2°	0,1°		0,2°	0,0°	
		<b>-0,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,1°</b>	<b>0,0°</b>		<b>-0,4°</b>	<b>0,0°</b>		<b>0,4°</b>	<b>0,0°</b>	
Média	-0,2°	0,1°	MÉDIA	0,2°	0,1°	Média	-0,5°	0,1°	MÉDIA	0,4°	0,1°		
S	0,0°	0,0°	S	0,1°	0,1°	S	0,1°	0,1°	S	0,0°	0,1°		
		<b><math>\theta x</math></b>		<b>0,4°</b>			<b><math>\theta x</math></b>			<b>0,9°</b>			

TABELA 7.12 – Controle dimensional das distorções de soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova tipo CV2 apoiados sobre a mesa de desempenho.

	CV21		CV22		CV23	
	Pontos	- $\theta_x/2$	$\theta_y$	Pontos	+ $\theta_x/2$	$\theta_y$
CV21	5	0,0°	0,0°	-	-	-
		0,0°	0,0°		0,2°	0,0°
	3	-2,3°	-0,4°	1	2,3°	-0,3°
		<b>-2,3°</b>	<b>-0,4°</b>		<b>2,1°</b>	<b>-0,3°</b>
	4	-0,1°	0,0°	2	0,0°	-0,1°
		-2,5°	-0,3°		2,2°	-0,4°
		<b>-2,4°</b>	<b>-0,3°</b>		<b>2,2°</b>	<b>-0,3°</b>
	Média	-2,4 °	-0,4 °	Média	2,2 °	-0,3 °
	S	0,1 °	0,1 °	S	0,1 °	0,0 °
		<b><math>\theta_x</math></b>			<b>4,5 °</b>	
CV22	5	0,0°	0,0°	-	0,0°	0,0°
		-0,1°	0,0°		0,1°	0,0°
	3	-2,3°	-0,4°	1	2,1°	-0,1°
		<b>-2,2°</b>	<b>-0,4°</b>		<b>2,0°</b>	<b>-0,1°</b>
	4	-0,2°	0,0°	2	0,0°	-0,1°
		-2,4°	-0,2°		1,9°	-0,2°
		<b>-2,2°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>1,9°</b>	<b>-0,1°</b>
	Média	-2,2 °	-0,3 °	Média	2,0 °	-0,1 °
	S	0,0 °	0,1 °	S	0,1 °	0,0 °
		<b><math>\theta_x</math></b>			<b>4,2 °</b>	
CV23	5	0,0°	0,0°	-	0,0°	0,0°
		-0,1°	0,0°		0,3°	0,0°
	3	-2,3°	-0,3°	1	2,4°	-0,4°
		<b>-2,2°</b>	<b>-0,3°</b>		<b>2,1°</b>	<b>-0,4°</b>
	4	-0,1°	0,0°	2	0,2°	-0,1°
		-2,0°	-0,3°		2,3°	-0,4°
		<b>-1,9°</b>	<b>-0,3°</b>		<b>2,1°</b>	<b>-0,3°</b>
	Média	-2,1 °	-0,3 °	Média	2,1 °	-0,4 °
	S	0,2 °	0,0 °	S	0,0 °	0,1 °
		<b><math>\theta_x</math></b>			<b>4,2 °</b>	

**Apêndice 07 – Tabelas de valores do monitoramento dos pontos sobre os corpos de prova antes a após soldagem utilizando a FPM e o relógio comparador acoplados ao braço robótico com os corpos de prova apoiados sobre a mesa de trabalho**

As TAB. 7.13 à TAB. 7.15 apresentam os valores das coordenadas tridimensionais dos pontos de referência apresentados na FIG. 3.19, medidos com a FPM e o relógio comparador acoplados ao braço manipulador para os corpos de prova tipo CV2, CV1 e CX1 apoiados sobre a mesa de trabalho. Foram realizadas medições antes e após a soldagem afim de eliminar das medições as variações iniciais já presentes nos corpos de prova antes da soldagem. Estas tabelas também apresentam os resultados dos valores dos ângulos de distorções calculados pela relação trigonométrica entre a diferença de altura e a distância entre dois pontos conforme EQ. (3.4).

TABELA 7.13 – Monitoramento dos pontos de referência utilizando o relógio comparador e a FPM acoplados ao braço robótico para os corpos de prova tipo CV2.

	CV21				CV22				CV23										
	Pontos	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Pontos	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)	Pontos	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)							
CV21	J	-378,5	379,0	3,58	A	379,0	384,0	3,92	J	-378,5	379,8	2,03	A	379,0	384,0	1,32			
		-376,6	378,3	14,75		-1,3	-0,2	11,07		-376,9	379,0	12,41		-1,3	-0,4	9,62	-377,7	383,6	10,94
		<b>1,9</b>	<b>-0,7</b>	<b>11,17</b>		<b>-1,3</b>	<b>-0,2</b>	<b>11,07</b>		<b>1,6</b>	<b>-0,8</b>	<b>10,38</b>		<b>-1,3</b>	<b>-0,4</b>	<b>9,62</b>	<b>-1,3</b>	<b>-0,4</b>	<b>9,62</b>
	I	-290,0	288,0	3,06	B	290,0	293,0	3,41	I	-290,0	288,0	3,36	B	290,0	293,0	2,93			
		-287,4	287,3	11,49		-1,8	-0,3	8,10		-288,5	287,3	9,93		-1,4	-0,2	3,68	-288,6	292,8	6,61
		<b>2,6</b>	<b>-0,7</b>	<b>8,43</b>		<b>-1,8</b>	<b>-0,3</b>	<b>8,10</b>		<b>1,5</b>	<b>-0,7</b>	<b>6,57</b>		<b>-1,4</b>	<b>-0,2</b>	<b>3,68</b>	<b>-1,4</b>	<b>-0,2</b>	<b>3,68</b>
	G	-	-	3,10	C	-	-	3,21	G	-	-	3,69	C	-	-	4,98			
		-	-	4,89		-	-	3,81		-	-	5,20		-	-	5,41	-	-	5,41
		-	-	<b>1,79</b>		-	-	<b>0,60</b>		-	-	<b>1,51</b>		-	-	<b>0,43</b>	-	-	<b>0,43</b>
	H	-	-	3,20	D	-	-	3,67	H	-	-	4,03	D	-	-	4,20			
-		-	5,65	-		-	4,95	-		-	5,96	-		-	4,99	-	-	4,99	
-		-	<b>2,45</b>	-		-	<b>1,28</b>	-		-	<b>1,93</b>	-		-	<b>0,79</b>	-	-	<b>0,79</b>	
F	-102,1	526,7	2,00	E	102,1	526,0	2,00	F	-102,1	526,0	2,00	E	102,1	526,5	2,00				
	-99,9	526,0	2,40		100,6	525,7	2,27		-100,6	526,2	2,27		100,8	526,1	2,27				
	<b>2,3</b>	<b>-0,7</b>	<b>0,40</b>		<b>-1,6</b>	<b>-0,3</b>	<b>0,27</b>		<b>1,6</b>	<b>0,2</b>	<b>0,27</b>		<b>-1,3</b>	<b>-0,4</b>	<b>0,27</b>				
<b>ÂNGULO DE DISTORÇÃO</b>																			
$-\theta x/2$	-0,3°	-2,5°	<b>-2,2°</b>	$+\theta x/2$	0,4°	2,6°	<b>2,2°</b>	$-\theta x/2$	0,0°	-2,1°	<b>-2,1°</b>	$+\theta x/2$	-0,1°	1,8°	<b>1,9°</b>				
$\theta y$	0,0°	-0,3°	<b>-0,3°</b>	$\theta y$	-0,2°	-0,5°	<b>-0,3°</b>	$\theta y$	-0,2°	-0,3°	<b>-0,2°</b>	$\theta y$	0,4°	0,2°	<b>-0,2°</b>				
			<b><math>\theta x</math></b>				<b>4,4°</b>				<b><math>\theta x</math></b>				<b>4,0°</b>				
CV23	J	-378,5	379,0	3,63	A	379,0	384,0	4,64	J	-378,5	379,0	3,63	A	379,0	384,0	4,64			
		-377,7	377,8	13,33		-2,1	1,4	10,03		-377,7	377,8	13,33		-2,1	1,4	10,03			
		<b>0,8</b>	<b>-1,2</b>	<b>9,70</b>		<b>-2,1</b>	<b>1,4</b>	<b>10,03</b>		<b>0,8</b>	<b>-1,2</b>	<b>9,70</b>		<b>-2,1</b>	<b>1,4</b>	<b>10,03</b>			
	I	-290,0	288,0	3,00	B	290,0	293,0	3,78	I	-290,0	288,0	3,00	B	290,0	293,0	3,78			
		-288,7	287,0	10,35		-1,8	0,5	7,46		-288,7	287,0	10,35		-1,8	0,5	7,46			
		<b>1,3</b>	<b>-1,0</b>	<b>7,35</b>		<b>-1,8</b>	<b>0,5</b>	<b>7,46</b>		<b>1,3</b>	<b>-1,0</b>	<b>7,35</b>		<b>-1,8</b>	<b>0,5</b>	<b>7,46</b>			
	G	-	-	2,93	C	-	-	3,45	G	-	-	2,93	C	-	-	3,45			
		-	-	4,46		-	-	4,89		-	-	4,46		-	-	4,89			
		-	-	<b>1,53</b>		-	-	<b>1,44</b>		-	-	<b>1,53</b>		-	-	<b>1,44</b>			
	H	-	-	2,82	D	-	-	3,32	H	-	-	2,82	D	-	-	3,32			
-		-	5,07	-		-	5,51	-		-	5,07	-		-	5,51				
-		-	<b>2,25</b>	-		-	<b>2,19</b>	-		-	<b>2,25</b>	-		-	<b>2,19</b>				
F	-102,1	526,5	2,00	E	102,1	526,2	2,00	F	-102,1	526,5	2,00	E	102,1	526,2	2,00				
	-101,1	525,4	2,27		100,2	525,3	2,13		-101,1	525,4	2,27		100,2	525,3	2,13				
	<b>1,1</b>	<b>-1,1</b>	<b>0,27</b>		<b>-2,0</b>	<b>0,9</b>	<b>0,13</b>		<b>1,1</b>	<b>-1,1</b>	<b>0,27</b>		<b>-2,0</b>	<b>0,9</b>	<b>0,13</b>				
<b>DISTORÇÃO ANGULAR</b>																			
$-\theta x/2$	-0,3°	-2,3°	<b>-2,0°</b>	$+\theta x/2$	0,5°	2,6°	<b>2,1°</b>	$-\theta x/2$	-0,3°	-2,3°	<b>-2,0°</b>	$+\theta x/2$	0,5°	2,6°	<b>2,1°</b>				
$\theta y$	0,1°	-0,3°	<b>-0,3°</b>	$\theta y$	0,1°	-0,3°	<b>-0,3°</b>	$\theta y$	0,1°	-0,3°	<b>-0,3°</b>	$\theta y$	0,1°	-0,3°	<b>-0,3°</b>				
			<b><math>\theta x</math></b>				<b>4,1°</b>				<b><math>\theta x</math></b>				<b>4,1°</b>				

TABELA 7.14 – Monitoramento dos pontos de referência utilizando o relógio comparador e a FPM acoplados ao braço robótico para os corpos de prova CV1.

	Pontos			Pontos	Pontos				Pontos			Pontos	Pontos			
	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)		X (mm)	Y(mm)	Z(mm)		X (mm)	Y(mm)	Z(mm)		X (mm)	Y(mm)	Z(mm)	
CV11	J	-378,5	379,0	1,25	A	379,0	384,0	3,20	I	-290,0	288,0	0,90	B	289,1	292,5	6,90
		-377,3	378,5	7,60		378,0	383,5	9,21		-288,7	287,6	6,90		289,1	292,3	7,80
		<b>1,2</b>	<b>-0,5</b>	<b>6,35</b>		<b>-1,0</b>	<b>-0,5</b>	<b>6,01</b>		<b>1,3</b>	<b>-0,4</b>	<b>6,00</b>		<b>-0,9</b>	<b>-0,5</b>	<b>4,90</b>
	I	-290,0	288,0	0,90	B	289,1	292,5	6,90	G	-174,5	505,5	1,81	C	174,5	507,5	2,15
		-288,7	287,6	6,90		289,1	292,3	7,80		-173,5	505,0	3,99		173,4	506,6	4,61
		<b>1,3</b>	<b>-0,4</b>	<b>6,00</b>		<b>-0,9</b>	<b>-0,5</b>	<b>4,90</b>		<b>1,0</b>	<b>-0,5</b>	<b>2,18</b>		<b>-1,1</b>	<b>-0,9</b>	<b>2,46</b>
	G	-174,5	505,5	1,81	C	174,5	507,5	2,15	H	-	-	1,56	D	-	-	2,60
		-173,5	505,0	3,99		173,4	506,6	4,61		-	-	3,41		-	-	4,70
		<b>1,0</b>	<b>-0,5</b>	<b>2,18</b>		<b>-1,1</b>	<b>-0,9</b>	<b>2,46</b>		<b>1,85</b>	<b>2,10</b>					
	H	-	-	1,56	D	-	-	2,60	F	-43,5	408,5	2,00	E	43,5	408,5	2,00
-		-	3,41	-		-	4,70	-42,3		408,0	2,22	-1,0		407,9	2,44	
<b>1,85</b>		<b>2,10</b>														
F	-43,5	408,5	2,00	E	43,5	408,5	2,00	DISTORÇÃO ANGULAR			DISTORÇÃO ANGULAR					
	-42,3	408,0	2,22		-1,0	407,9	2,44	- $\theta x/2$	0,1°	-0,9°	-1,0°	+ $\theta x/2$	0,2°	1,2°	0,9°	
	<b>1,2</b>	<b>-0,5</b>	<b>0,22</b>		<b>-1,0</b>	<b>-0,6</b>	<b>0,44</b>	$\theta y$	0,1°	0,3°	0,2°	$\theta y$	-0,2°	0,0°	0,2°	
			<b><math>\theta x</math></b>	<b>2,0°</b>						<b><math>\theta x</math></b>	<b>2,5°</b>					
CV13	J	-378,5	379,0	4,11	A	379,0	384,0	3,82	I	-290,0	288,0	3,50	B	289,1	292,7	7,10
		-377,5	378,6	10,98		377,9	383,6	10,87		-289,1	287,4	8,10		289,1	292,7	7,10
		<b>1,0</b>	<b>-0,4</b>	<b>6,87</b>		<b>-1,1</b>	<b>-0,4</b>	<b>7,05</b>		<b>0,9</b>	<b>-0,6</b>	<b>4,60</b>		<b>-0,9</b>	<b>-0,3</b>	<b>3,80</b>
	I	-290,0	288,0	3,50	B	289,1	292,7	7,10	G	-174,5	505,5	3,40	C	174,5	507,5	3,70
		-289,1	287,4	8,10		289,1	292,7	7,10		-173,3	505,1	6,20		173,7	507,1	5,80
		<b>0,9</b>	<b>-0,6</b>	<b>4,60</b>		<b>-0,9</b>	<b>-0,3</b>	<b>3,80</b>		<b>1,2</b>	<b>-0,4</b>	<b>2,80</b>		<b>-0,8</b>	<b>-0,4</b>	<b>2,10</b>
	G	-174,5	505,5	3,40	C	174,5	507,5	3,70	H	-	-	3,30	D	-	-	3,40
		-173,3	505,1	6,20		173,7	507,1	5,80		-	-	5,84		-	-	5,30
		<b>1,2</b>	<b>-0,4</b>	<b>2,80</b>		<b>-0,8</b>	<b>-0,4</b>	<b>2,10</b>		<b>2,54</b>	<b>1,90</b>					
	H	-	-	3,30	D	-	-	3,40	F	-43,5	408,5	2,00	E	43,5	408,5	2,00
-		-	5,84	-		-	5,30	-42,5		408,0	2,22	-0,9		408,1	2,22	
<b>2,54</b>		<b>1,90</b>														
F	-43,5	408,5	2,00	E	43,5	408,5	2,00	DISTORÇÃO ANGULAR			DISTORÇÃO ANGULAR					
	-42,5	408,0	2,22		-0,9	408,1	2,22	- $\theta x/2$	-0,4°	-1,5°	-1,1°	+ $\theta x/2$	0,3°	1,5°	1,2°	
	<b>1,0</b>	<b>-0,5</b>	<b>0,22</b>		<b>-0,9</b>	<b>-0,4</b>	<b>0,22</b>	$\theta y$	0,0°	0,2°	0,1°	$\theta y$	0,1°	0,2°	0,1°	
			<b><math>\theta x</math></b>	<b>2,3°</b>						<b><math>\theta x</math></b>	<b>2,5°</b>					
CV15	J	-378,5	379,0	4,51	A	379,0	384,0	3,21	I	-290,0	288,0	3,46	B	289,2	292,6	8,63
		-377,6	378,6	10,83		378,3	383,5	12,17		-289,3	287,7	9,50		289,2	292,6	8,63
		<b>0,9</b>	<b>-0,4</b>	<b>6,32</b>		<b>-0,7</b>	<b>-0,5</b>	<b>8,96</b>		<b>0,7</b>	<b>-0,3</b>	<b>6,04</b>		<b>-0,8</b>	<b>-0,4</b>	<b>5,23</b>
	I	-290,0	288,0	3,46	B	289,2	292,6	8,63	G	-174,5	505,5	3,22	C	174,5	507,5	3,42
		-289,3	287,7	9,50		289,2	292,6	8,63		-173,7	505,1	6,36		173,7	507,0	6,42
		<b>0,7</b>	<b>-0,3</b>	<b>6,04</b>		<b>-0,8</b>	<b>-0,4</b>	<b>5,23</b>		<b>0,8</b>	<b>-0,4</b>	<b>3,14</b>		<b>-0,8</b>	<b>-0,5</b>	<b>3,00</b>
	G	-174,5	505,5	3,22	C	174,5	507,5	3,42	H	-	-	3,18	D	-	-	3,28
		-173,7	505,1	6,36		173,7	507,0	6,42		-	-	5,83		-	-	6,05
		<b>0,8</b>	<b>-0,4</b>	<b>3,14</b>		<b>-0,8</b>	<b>-0,5</b>	<b>3,00</b>		<b>2,65</b>	<b>2,77</b>					
	H	-	-	3,18	D	-	-	3,28	F	-43,5	408,5	2,00	E	43,5	408,5	2,00
-		-	5,83	-		-	6,05	-42,7		408,1	2,44	-0,8		408,1	2,44	
<b>2,65</b>		<b>2,77</b>														
F	-43,5	408,5	2,00	E	43,5	408,5	2,00	DISTORÇÃO ANGULAR			DISTORÇÃO ANGULAR					
	-42,7	408,1	2,44		-0,8	408,1	2,44	- $\theta x/2$	-0,4°	-1,4°	-1,0°	+ $\theta x/2$	0,2°	1,7°	1,5°	
	<b>0,8</b>	<b>-0,4</b>	<b>0,44</b>		<b>-0,8</b>	<b>-0,4</b>	<b>0,44</b>	$\theta y$	0,0°	0,2°	0,2°	$\theta y$	0,1°	0,2°	0,1°	
			<b><math>\theta x</math></b>	<b>2,5°</b>						<b><math>\theta x</math></b>	<b>2,4°</b>					
CV16	J	-378,5	379,0	3,02	A	379,0	384,0	4,02	I	-290,0	288,0	3,06	B	290,3	292,4	4,70
		-377,1	378,6	14,95		379,0	383,6	6,76		-288,5	287,7	11,67		290,3	292,4	4,70
		<b>1,4</b>	<b>-0,4</b>	<b>11,93</b>		<b>0,0</b>	<b>-0,4</b>	<b>2,74</b>		<b>1,5</b>	<b>-0,3</b>	<b>8,61</b>		<b>0,3</b>	<b>-0,6</b>	<b>1,15</b>
	I	-290,0	288,0	3,06	B	290,3	292,4	4,70	G	-174,5	505,5	3,00	C	174,5	507,5	3,50
		-288,5	287,7	11,67		290,3	292,4	4,70		-173,1	505,2	8,34		174,5	507,2	4,12
		<b>1,5</b>	<b>-0,3</b>	<b>8,61</b>		<b>0,3</b>	<b>-0,6</b>	<b>1,15</b>		<b>1,4</b>	<b>-0,3</b>	<b>5,34</b>		<b>0,0</b>	<b>-0,3</b>	<b>0,62</b>
	G	-174,5	505,5	3,00	C	174,5	507,5	3,50	H	-	-	3,20	D	-	-	3,45
		-173,1	505,2	8,34		174,5	507,2	4,12		-	-	8,17		-	-	4,02
		<b>1,4</b>	<b>-0,3</b>	<b>5,34</b>		<b>0,0</b>	<b>-0,3</b>	<b>0,62</b>		<b>4,97</b>	<b>0,57</b>					
	H	-	-	3,20	D	-	-	3,45	F	-43,5	408,5	2,00	E	43,5	408,5	2,00
-		-	8,17	-		-	4,02	-42,1		408,2	2,44	0,1		408,1	2,22	
<b>4,97</b>		<b>0,57</b>														
F	-43,5	408,5	2,00	E	43,5	408,5	2,00	DISTORÇÃO ANGULAR			DISTORÇÃO ANGULAR					
	-42,1	408,2	2,44		0,1	408,1	2,22	- $\theta x/2$	-0,2°	-2,1°	-2,0°	+ $\theta x/2$	0,3°	0,8°	0,4°	
	<b>1,4</b>	<b>-0,3</b>	<b>0,44</b>		<b>0,1</b>	<b>-0,4</b>	<b>0,22</b>	$\theta y$	-0,1°	0,1°	0,2°	$\theta y$	0,0°	0,0°	0,0°	
			<b><math>\theta x</math></b>	<b>2,4°</b>						<b><math>\theta x</math></b>	<b>2,4°</b>					

TABELA 7.15 – Monitoramento dos pontos de referência utilizando o relógio comparador e a FPM acoplados ao braço robótico para os corpos de prova CX1.

	CX11 LADO A			CX11 LADO B			CX11 LADO A			CX11 LADO B						
	Pontos	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Pontos	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)	Pontos	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)				
CX11 LADO A	J	-378,5	379,0	3,12	A	379,0	384,0	5,02	J	-378,5	379,0	3,25	A	379,0	384,0	3,60
		-378,1	379,0	3,97		379,0	384,0	6,15		-378,5	379,0	3,17		378,9	384,0	5,32
		<b>0,4</b>	<b>0,0</b>	<b>0,85</b>		<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>1,13</b>		<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>-0,08</b>		<b>-0,1</b>	<b>0,0</b>	<b>1,72</b>
	I	-290,0	288,0	2,75	B	290,0	293,0	4,34	I	-290,0	288,0	2,98	B	290,0	293,0	3,94
		-289,5	288,0	2,93		290,2	293,0	4,65		-289,5	288,0	2,98		289,5	293,0	4,12
	G	-174,5	505,5	3,33	C	174,5	507,5	3,54	G	-290,0	288,0	3,38	C	174,5	507,5	3,15
		-174,0	505,5	3,57		174,5	507,5	4,87		-290,0	288,0	3,54		174,5	507,5	3,42
	H	-	-	3,02	D	-	-	3,40	H	-	-	3,51	D	-	-	3,45
		-	-	<b>0,08</b>		-	-	<b>1,16</b>		-	-	<b>-0,33</b>		-	-	<b>-0,13</b>
	F	-43,5	408,5	2,00	E	43,5	408,5	2,00	F	-43,5	408,5	4,13	E	43,5	408,5	3,85
-43,0		408,5	2,00	0,1		408,5	2,22	-43,3		408,5	3,00	43,3		408,5	3,00	
DISTORÇÃO ANGULAR																
$-\theta x/2$	-0,2°	-0,3°	-0,1°	$+\theta x/2$	0,5°	0,7°	0,2°	$-\theta x/2$	0,1°	0,0°	-0,2°	$+\theta x/2$	0,0°	0,4°	0,4°	
$\theta y$	0,1°	0,2°	0,1°	$\theta y$	0,1°	0,1°	0,1°	$\theta y$	-0,1°	0,2°	0,2°	$\theta y$	-0,1°	0,0°	0,2°	
$\theta_{xa}$ <span style="color: red;">0,3°</span> $\theta_{xb}$ <span style="color: red;">0,6°</span>																
CX12 LADO A	J	-378,5	379,0	3,85	A	379,0	384,0	4,22	J	-378,5	379,0	2,96	A	379,0	384,0	2,66
		-378,3	379,0	5,58		379,0	384,0	6,05		-378,3	379,0	3,91		379,0	384,0	4,02
		<b>0,2</b>	<b>0,0</b>	<b>1,73</b>		<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>1,83</b>		<b>0,2</b>	<b>0,0</b>	<b>0,95</b>		<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>1,36</b>
	I	-290,0	288,0	3,15	B	290,0	293,0	3,36	I	-290,0	288,0	2,83	B	290,0	293,0	3,10
		-290,0	288,0	4,41		289,1	293,0	5,75		-290,0	288,0	2,92		290,0	293,0	3,03
	G	-174,5	505,5	3,02	C	174,5	507,5	3,14	G	-174,5	505,5	3,40	C	174,5	507,5	3,80
		-174,5	505,5	3,79		174,5	507,5	3,95		-174,5	505,5	4,43		174,5	507,5	4,50
	H	-	-	2,98	D	-	-	3,12	H	-	-	3,49	D	-	-	3,90
		-	-	3,55		-	-	3,75		-	-	3,57		-	-	3,40
	F	-43,5	408,5	2,00	E	43,5	408,5	2,00	F	-43,5	408,5	3,83	E	43,5	408,5	3,73
-43,4		408,5	2,22	PA		-0,3	408,5	2,22		-43,4	408,5	2,00		E	43,5	408,5
DISTORÇÃO ANGULAR																
$-\theta x/2$	-0,6°	-0,9°	-0,3°	$+\theta x/2$	0,7°	1,0°	0,3°	$-\theta x/2$	0,1°	-0,3°	-0,5°	$+\theta x/2$	-0,2°	0,3°	0,5°	
$\theta y$	0,0°	0,1°	0,1°	$\theta y$	0,0°	0,1°	0,1°	$\theta y$	0,0°	0,4°	0,4°	$\theta y$	0,0°	0,5°	0,5°	
$\theta_{xa}$ <span style="color: red;">0,5°</span> $\theta_{xb}$ <span style="color: red;">1,0°</span>																
CX13 LADO A	J	-378,5	379,0	3,07	A	379,0	384,0	3,17	J	-378,5	379,0	3,13	A	379,0	384,0	2,65
		-379,0	379,0	3,64		379,0	384,0	4,99		-378,4	379,0	4,15		378,8	384,0	4,56
		<b>-0,5</b>	<b>0,0</b>	<b>0,57</b>		<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>1,82</b>		<b>0,1</b>	<b>0,0</b>	<b>1,02</b>		<b>-0,2</b>	<b>0,0</b>	<b>1,91</b>
	I	-290,0	288,0	2,88	B	290,0	293,0	3,05	I	-290,0	288,0	2,96	B	290,0	293,0	3,30
		-290,0	288,0	2,98		289,9	293,0	4,36		-290,0	288,0	4,01		290,0	293,0	4,45
	G	-174,5	505,5	3,00	C	174,5	507,5	3,00	G	-174,5	505,5	2,78	C	174,5	507,5	2,92
		-174,5	505,5	3,12		174,5	507,5	3,84		-174,5	505,5	3,40		174,5	507,5	3,73
	H	-	-	2,91	D	-	-	3,19	H	-	-	3,08	D	-	-	3,21
		-	-	2,96		-	-	3,74		-	-	3,27		-	-	3,66
	F	-43,5	408,5	2,00	E	43,5	408,5	2,00	F	-43,5	408,5	3,82	E	43,5	408,5	2,57
-43,7		408,5	2,00	0,0		408,5	2,22	-43,5		408,5	2,00	E		43,4	408,5	2,00
DISTORÇÃO ANGULAR																
$-\theta x/2$	-0,2°	-0,3°	-0,1°	$+\theta x/2$	0,2°	0,5°	0,3°	$-\theta x/2$	0,1°	-0,4°	-0,5°	$+\theta x/2$	0,0°	0,4°	0,4°	
$\theta y$	0,0°	0,1°	0,0°	$\theta y$	-0,1°	0,0°	0,1°	$\theta y$	-0,1°	0,1°	0,2°	$\theta y$	-0,1°	0,0°	0,2°	
$\theta_{xa}$ <span style="color: red;">0,4°</span> $\theta_{xb}$ <span style="color: red;">0,9°</span>																

**Apêndice 08 – Tabelas de valores para o controle dimensional das distorções antes e após soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova apoiados sobre a mesa de trabalho**

As TAB. 7.16 à TAB. 7.18 apresentam os valores das distorções medidos com inclinômetro digital para os corpos de prova tipo CV1, CX1 e CV2 apoiados sobre a mesa de trabalho. Afim de eliminar das medições as variações iniciais já presentes nos corpos de prova, foram realizadas medições antes e após a soldagem, sendo a distorção final a diferença entre esses valores.

TABELA 7.16 – Controle dimensional das distorções de soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova tipo CV2 apoiados sobre a mesa de trabalho.

	CV21			CV22			CV23					
	Pontos	$-\theta x/2$	$\theta y$	Pontos	$-\theta x/2$	$\theta y$	Pontos	$-\theta x/2$	$\theta y$			
CV21	J	-0,2°	0,0°	A	0,3°	-0,1°	J	-0,1°	-0,1°	A	-0,1°	0,2°
		-2,6°	-0,3°		2,6°	-0,4°		-2,3°	-0,3°		1,8°	0,0°
		<b>-2,4°</b>	<b>-0,3°</b>		<b>2,3°</b>	<b>-0,3°</b>		<b>-2,2°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>1,9°</b>	<b>-0,2°</b>
	I	-0,3°	-0,1°	B	0,2°	-0,3°	I	0,0°	-0,1°	B	-0,1°	0,2°
		-2,7°	-0,3°		1,7°	-0,4°		-2,1°	-0,2°		2,0°	0,1°
		<b>-2,4°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>1,5°</b>	<b>-0,1°</b>		<b>-2,1°</b>	<b>-0,1°</b>		<b>2,1°</b>	<b>-0,1°</b>
	G	-0,4°	0,1°	C	0,4°	0,0°	G	0,1°	-0,3°	C	-0,3°	0,3°
		-2,5°	-0,4°		1,6°	-0,5°		-2,3°	-0,5°		1,7°	0,2°
		<b>-2,1°</b>	<b>-0,5°</b>		<b>1,2°</b>	<b>-0,5°</b>		<b>-2,4°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>2,0°</b>	<b>-0,1°</b>
	H	-0,2°	-0,2°	D	0,4°	-0,2°	H	0,0°	-0,1°	D	-0,1°	0,5°
		-2,6°	-0,4°		1,7°	-0,5°		-2,1°	-0,4°		1,9°	0,2°
		<b>-2,4°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>1,3°</b>	<b>-0,3°</b>		<b>-2,1°</b>	<b>-0,3°</b>		<b>2,0°</b>	<b>-0,3°</b>
F	-0,4°	0,0°	E	0,5°	-0,3°	F	-0,2°	-0,1°	E	-0,2°	0,4°	
	-2,5°	-0,2°		1,8°	-0,6°		-2,3°	-0,3°		1,7°	0,2°	
	<b>-2,1°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>1,3°</b>	<b>-0,3°</b>		<b>-2,1°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>1,9°</b>	<b>-0,2°</b>	
Média	-2,3°	-0,3°	Média	1,5°	-0,3°	Média	-2,2°	-0,2°	Média	2,0°	-0,2°	
S	0,2°	0,1°	S	0,4°	0,1°	S	0,1°	0,1°	S	0,1°	0,1°	
		$\theta x$		<b>3,8°</b>			$\theta x$	<b>4,2°</b>				
CV23	J	-0,1°	-0,1°	A	0,4°	0,1°	J	-0,1°	-0,1°	A	-0,1°	0,2°
		-2,3°	-0,3°		2,7°	-0,3°		-2,3°	-0,3°		2,3°	-0,4°
		<b>-2,2°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>2,3°</b>	<b>-0,4°</b>		<b>-2,2°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>2,3°</b>	<b>-0,4°</b>
	I	-0,3°	-0,1°	B	0,3°	-0,1°	I	-0,3°	-0,1°	B	-0,3°	-0,1°
		-2,2°	-0,3°		2,6°	-0,3°		-1,9°	-0,2°		2,3°	-0,2°
		<b>-1,9°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>2,3°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>-1,9°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>2,3°</b>	<b>-0,2°</b>
	G	-0,2°	0,0°	C	0,5°	-0,2°	G	-0,2°	0,0°	C	-0,2°	0,0°
		-2,3°	-0,5°		2,6°	-0,5°		-2,3°	-0,5°		2,6°	-0,5°
		<b>-2,1°</b>	<b>-0,5°</b>		<b>2,1°</b>	<b>-0,3°</b>		<b>-2,1°</b>	<b>-0,5°</b>		<b>2,1°</b>	<b>-0,3°</b>
	H	-0,4°	0,1°	D	0,5°	0,1°	H	-0,4°	0,1°	D	-0,4°	0,1°
		-2,1°	-0,4°		2,5°	-0,4°		-1,7°	-0,5°		2,0°	-0,5°
		<b>-1,7°</b>	<b>-0,5°</b>		<b>2,0°</b>	<b>-0,5°</b>		<b>-1,7°</b>	<b>-0,5°</b>		<b>2,0°</b>	<b>-0,5°</b>
F	-0,3°	0,0°	E	0,4°	0,0°	F	-0,3°	0,0°	E	-0,3°	0,0°	
	-2,1°	-0,2°		2,3°	-0,2°		-2,1°	-0,2°		1,9°	-0,2°	
	<b>-1,8°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>1,9°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>-1,8°</b>	<b>-0,2°</b>		<b>1,9°</b>	<b>-0,2°</b>	
Média	-1,9°	-0,3°	Média	2,1°	-0,3°	Média	-1,9°	-0,3°	Média	2,1°	-0,3°	
S	0,2°	0,2°	S	0,2°	0,1°	S	0,2°	0,1°	S	0,2°	0,1°	
		$\theta x$		<b>4,1°</b>								



TABELA 7.17 – Controle dimensional das distorções de soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova tipo CV1 apoiados sobre a mesa de trabalho.

	CV11						CV12					
	Pontos	- $\theta_x/2$	$\theta_y$	Pontos	+ $\theta_x/2$	$\theta_y$	Pontos	- $\theta_x/2$	$\theta_y$	Pontos	+ $\theta_x/2$	$\theta_y$
CV11	J	-0,2°	0,2°	A	0,3°	0,1°	J	-0,5°	0,0°	A	0,3°	0,1°
		-1,0°	0,3°		1,4°	0,3°		-1,8°	0,1°		1,6°	0,4°
		<b>-0,8°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,1°</b>	<b>0,2°</b>		<b>-1,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,3°</b>	<b>0,3°</b>
	I	0,0°	0,1°	B	0,2°	-0,1°	I	-0,3°	0,1°	B	0,4°	-0,1°
		-1,0°	0,3°		1,4°	0,1°		-1,8°	0,2°		1,7°	0,2°
		<b>-1,0°</b>	<b>0,2°</b>		<b>1,2°</b>	<b>0,2°</b>		<b>-1,5°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,3°</b>	<b>0,3°</b>
	G	0,1°	0,1°	C	0,4°	-0,2°	G	-0,2°	0,1°	C	0,4°	-0,2°
		-0,8°	0,2°		1,3°	0,1°		-1,4°	0,2°		1,6°	0,1°
		<b>-0,9°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,9°</b>	<b>0,3°</b>		<b>-1,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,2°</b>	<b>0,3°</b>
	H	0,2°	0,2°	D	0,4°	0,0°	H	0,0°	0,1°	D	0,2°	0,0°
		-0,7°	0,4°		1,5°	0,2°		-1,1°	0,3°		1,1°	0,2°
		<b>-0,9°</b>	<b>0,2°</b>		<b>1,1°</b>	<b>0,2°</b>		<b>-1,1°</b>	<b>0,2°</b>		<b>0,9°</b>	<b>0,2°</b>
	F	0,1°	0,0°	E	0,5°	-0,1°	F	-0,2°	0,0°	E	0,4°	-0,1°
-0,8°		0,2°	1,4°		0,0°	-1,5°		0,2°	1,6°		0,1°	
<b>-0,9°</b>		<b>0,2°</b>	<b>0,9°</b>		<b>0,1°</b>	<b>-1,3°</b>		<b>0,2°</b>	<b>1,2°</b>		<b>0,2°</b>	
Média	<b>-0,9°</b>	<b>0,2°</b>	Média	<b>1,0°</b>	<b>0,2°</b>	Média	<b>-1,3°</b>	<b>0,1°</b>	Média	<b>1,2°</b>	<b>0,3°</b>	
S	<b>0,1°</b>	<b>0,1°</b>	S	<b>0,1°</b>	<b>0,1°</b>	S	<b>0,1°</b>	<b>0,1°</b>	S	<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>	
		<b><math>\theta_x</math></b>		<b>1,9°</b>			<b><math>\theta_x</math></b>			<b>2,5°</b>		
CV13	J	-0,4°	0,1°	A	0,3°	0,1°	J	-0,2°	0,1°	A	0,3°	0,1°
		-1,3°	0,2°		1,4°	0,2°		-1,5°	0,2°		1,5°	0,3°
		<b>-0,9°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,1°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-1,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,2°</b>	<b>0,2°</b>
	I	-0,3°	0,1°	B	0,4°	0,1°	I	-0,3°	0,1°	B	0,2°	0,0°
		-1,5°	0,2°		1,7°	0,2°		-1,6°	0,3°		1,7°	0,1°
		<b>-1,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-1,3°</b>	<b>0,2°</b>		<b>1,5°</b>	<b>0,1°</b>
	G	-0,2°	0,1°	C	0,4°	0,2°	G	-0,3°	-0,1°	C	0,3°	0,0°
		-1,4°	0,2°		1,6°	0,3°		-1,5°	0,1°		1,6°	0,1°
		<b>-1,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-1,2°</b>	<b>0,2°</b>		<b>1,3°</b>	<b>0,1°</b>
	H	-0,2°	0,0°	D	0,2°	0,0°	H	-0,2°	0,0°	D	0,4°	0,0°
		-1,2°	0,1°		1,4°	0,2°		-1,4°	0,3°		1,4°	0,2°
		<b>-1,0°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,2°</b>	<b>0,2°</b>		<b>-1,2°</b>	<b>0,3°</b>		<b>1,0°</b>	<b>0,2°</b>
	F	-0,4°	0,0°	E	0,4°	0,1°	F	-0,3°	0,0°	E	0,5°	0,1°
-1,5°		0,2°	1,6°		0,2°	-1,7°		0,2°	1,8°		0,3°	
<b>-1,1°</b>		<b>0,2°</b>	<b>1,2°</b>		<b>0,1°</b>	<b>-1,4°</b>		<b>0,2°</b>	<b>1,3°</b>		<b>0,2°</b>	
Média	<b>-1,1°</b>	<b>0,1°</b>	Média	<b>1,2°</b>	<b>0,1°</b>	Média	<b>-1,3°</b>	<b>0,2°</b>	Média	<b>1,3°</b>	<b>0,2°</b>	
S	<b>0,1°</b>	<b>0,0°</b>	S	<b>0,1°</b>	<b>0,0°</b>	S	<b>0,1°</b>	<b>0,1°</b>	S	<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>	
		<b><math>\theta_x</math></b>		<b>2,3°</b>			<b><math>\theta_x</math></b>			<b>2,5°</b>		
CV15	J	-0,2°	0,0°	A	0,1°	0,0°	J	0,0°	-0,1°	A	0,2°	0,1°
		-0,9°	0,3°		2,0°	0,3°		-2,0°	0,2°		2,0°	0,2°
		<b>-0,7°</b>	<b>0,3°</b>		<b>1,9°</b>	<b>0,3°</b>		<b>-2,0°</b>	<b>0,3°</b>		<b>0,5°</b>	<b>0,1°</b>
	I	-0,3°	0,1°	B	0,4°	0,1°	I	-0,3°	-0,1°	B	0,4°	0,1°
		-1,0°	0,2°		1,7°	0,2°		-2,1°	0,1°		0,8°	0,1°
		<b>-0,7°</b>	<b>0,1°</b>		<b>1,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-1,8°</b>	<b>0,2°</b>		<b>0,4°</b>	<b>0,0°</b>
	G	-0,4°	-0,1°	C	0,2°	-0,1°	G	-0,2°	0,0°	C	0,4°	0,0°
		-1,2°	0,2°		1,6°	0,0°		-2,0°	0,1°		0,9°	0,1°
		<b>-0,8°</b>	<b>0,3°</b>		<b>1,4°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-1,8°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,5°</b>	<b>0,1°</b>
	H	0,5°	0,1°	D	0,2°	0,1°	H	0,0°	0,0°	D	0,2°	0,0°
		-1,2°	0,3°		1,5°	0,2°		-1,9°	0,2°		0,7°	0,1°
		<b>-1,7°</b>	<b>0,2°</b>		<b>1,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-1,9°</b>	<b>0,2°</b>		<b>0,5°</b>	<b>0,1°</b>
	F	-0,5°	0,1°	E	0,4°	0,1°	F	-0,1°	-0,1°	E	0,4°	0,1°
-1,3°		0,2°	1,6°		0,2°	-2,2°		0,0°	0,9°		0,1°	
<b>-0,8°</b>		<b>0,1°</b>	<b>1,2°</b>		<b>0,1°</b>	<b>-2,1°</b>		<b>0,1°</b>	<b>0,5°</b>		<b>0,0°</b>	
Média	<b>-0,9°</b>	<b>0,2°</b>	Média	<b>1,4°</b>	<b>0,1°</b>	Média	<b>-1,9°</b>	<b>0,2°</b>	Média	<b>0,5°</b>	<b>0,1°</b>	
S	<b>0,4°</b>	<b>0,1°</b>	S	<b>0,3°</b>	<b>0,1°</b>	S	<b>0,1°</b>	<b>0,1°</b>	S	<b>0,0°</b>	<b>0,1°</b>	
		<b><math>\theta_x</math></b>		<b>2,4°</b>			<b><math>\theta_x</math></b>			<b>2,4°</b>		

TABELA 7.18 – Controle dimensional das distorções de soldagem utilizando o inclinômetro digital com os corpos de prova tipo CX1 apoiados sobre a mesa de trabalho.

	CX11 LADO A						CX11 LADO B					
	Pontos	- $\theta x/2$	$\theta y$	Pontos	+ $\theta x/2$	$\theta y$	Pontos	- $\theta x/2$	$\theta y$	Pontos	+ $\theta x/2$	$\theta y$
CX11 LADO A	J	-0,1°	0,1°	A	0,3°	0,1°	J	0,3°	-0,2°	A	-0,2°	0,1°
		-0,2°	0,2°		0,5°	0,2°		0,0°	0,1°		0,3°	0,3°
		<b>-0,1°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-0,3°</b>	<b>0,3°</b>		<b>0,5°</b>	<b>0,2°</b>
	I	0,0°	0,2°	B	0,4°	-0,1°	I	0,0°	-0,1°	B	-0,1°	-0,1°
		-0,3°	0,3°		0,6°	0,1°		-0,4°	0,0°		0,4°	0,1°
		<b>-0,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>		<b>-0,4°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,5°</b>	<b>0,2°</b>
	G	-0,2°	0,1°	C	0,4°	0,2°	G	0,2°	-0,1°	C	-0,1°	-0,2°
		-0,3°	0,2°		0,6°	0,1°		0,0°	0,1°		0,4°	0,1°
		<b>-0,1°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,2°</b>	<b>-0,1°</b>		<b>-0,2°</b>	<b>0,2°</b>		<b>0,5°</b>	<b>0,3°</b>
	H	-0,3°	0,1°	D	0,4°	0,0°	H	0,0°	-0,1°	D	0,2°	-0,1°
-0,5°		0,0°	0,6°		0,2°	-0,3°		0,1°	0,6°		0,1°	
	<b>-0,2°</b>	<b>-0,1°</b>		<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>		<b>-0,3°</b>	<b>0,2°</b>		<b>0,4°</b>	<b>0,2°</b>	
F	-0,1°	0,1°	E	0,5°	0,1°	F	0,2°	0,1°	E	0,1°	-0,2°	
	-0,3°	0,2°		0,6°	0,0°		-0,1°	0,2°		0,5°	0,0°	
	<b>-0,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,1°</b>	<b>-0,1°</b>		<b>-0,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,4°</b>	<b>0,2°</b>	
Média	<b>-0,2°</b>	<b>0,1°</b>	Média	<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>	MÉDIA	<b>-0,3°</b>	<b>0,2°</b>	Média	<b>0,5°</b>	<b>0,2°</b>	
S	<b>0,1°</b>	<b>0,1°</b>	S	<b>0,0°</b>	<b>0,2°</b>	S	<b>0,1°</b>	<b>0,1°</b>	S	<b>0,1°</b>	<b>0,0°</b>	
		<b><math>\theta_{xa}</math></b>		<b>0,4°</b>				<b><math>\theta_{xb}</math></b>		<b>0,8°</b>		
	CX12 LADO A						CX12 LADO B					
	Pontos	- $\theta x/2$	$\theta y$	Pontos	+ $\theta x/2$	$\theta y$	Pontos	- $\theta x/2$	$\theta y$	Pontos	+ $\theta x/2$	$\theta y$
CX12 LADO A	J	-0,5°	0,1°	A	0,5°	0,1°	J	0,0°	0,0°	A	-0,2°	0,1°
		-0,9°	0,2°		0,9°	0,2°		-0,5°	0,5°		0,1°	0,5°
		<b>-0,4°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,4°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-0,5°</b>	<b>0,5°</b>		<b>0,3°</b>	<b>0,4°</b>
	I	-0,5°	0,0°	B	0,6°	0,0°	I	0,1°	-0,1°	B	-0,2°	-0,1°
		-0,8°	0,2°		0,8°	0,1°		-0,4°	0,3°		0,4°	0,4°
		<b>-0,3°</b>	<b>0,2°</b>		<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-0,5°</b>	<b>0,4°</b>		<b>0,6°</b>	<b>0,5°</b>
	G	-0,5°	0,1°	C	0,5°	0,1°	G	0,1°	0,1°	C	-0,1°	-0,2°
		-0,8°	0,2°		1,0°	0,2°		-0,3°	0,3°		0,4°	0,3°
		<b>-0,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,5°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-0,4°</b>	<b>0,2°</b>		<b>0,5°</b>	<b>0,5°</b>
	H	-0,5°	0,1°	D	0,7°	0,1°	H	0,2°	-0,2°	D	-0,2°	0,0°
-1,0°		0,3°	1,0°		0,2°	-0,3°		0,4°	0,5°		0,4°	
	<b>-0,5°</b>	<b>0,2°</b>		<b>0,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-0,5°</b>	<b>0,6°</b>		<b>0,7°</b>	<b>0,4°</b>	
F	-0,6°	0,0°	E	0,6°	-0,1°	F	0,2°	0,0°	E	-0,2°	-0,1°	
	-0,8°	0,1°		0,8°	0,1°		-0,3°	0,3°		0,4°	0,5°	
	<b>-0,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>		<b>-0,5°</b>	<b>0,3°</b>		<b>0,6°</b>	<b>0,6°</b>	
Média	<b>-0,3°</b>	<b>0,1°</b>	Média	<b>0,3°</b>	<b>0,1°</b>	Média	<b>-0,5°</b>	<b>0,4°</b>	Média	<b>0,5°</b>	<b>0,5°</b>	
S	<b>0,1°</b>	<b>0,1°</b>	S	<b>0,1°</b>	<b>0,0°</b>	S	<b>0,0°</b>	<b>0,2°</b>	S	<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>	
		<b><math>\theta_{xa}</math></b>		<b>0,7°</b>				<b><math>\theta_{xb}</math></b>		<b>1,0°</b>		
	CX13 LADO A						CX13 LADO B					
	Pontos	- $\theta x/2$	$\theta y$	Pontos	+ $\theta x/2$	$\theta y$	Pontos	- $\theta x/2$	$\theta y$	Pontos	+ $\theta x/2$	$\theta y$
CX13 LADO A	J	-0,1°	0,0°	A	0,3°	0,1°	J	0,1°	-0,1°	A	-0,1°	-0,1°
		-0,2°	0,0°		0,6°	0,2°		-0,3°	0,0°		0,4°	0,0°
		<b>-0,1°</b>	<b>0,0°</b>		<b>0,3°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-0,4°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,5°</b>	<b>0,1°</b>
	I	-0,3°	0,1°	B	0,3°	-0,2°	I	0,2°	-0,1°	B	0,1°	-0,1°
		-0,4°	0,2°		0,7°	0,0°		-0,4°	0,1°		0,7°	0,1°
		<b>-0,1°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,4°</b>	<b>0,2°</b>		<b>-0,6°</b>	<b>0,2°</b>		<b>0,6°</b>	<b>0,2°</b>
	G	-0,2°	0,1°	C	0,2°	-0,1°	G	0,2°	-0,2°	C	0,2°	-0,2°
		-0,4°	0,1°		0,6°	0,0°		-0,4°	0,1°		0,4°	0,1°
		<b>-0,2°</b>	<b>0,0°</b>		<b>0,4°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-0,6°</b>	<b>0,3°</b>		<b>0,2°</b>	<b>0,3°</b>
	H	0,0°	0,1°	D	0,2°	0,0°	H	0,0°	-0,1°	D	-0,1°	-0,1°
-0,1°		0,0°	0,4°		0,1°	-0,1°		0,1°	0,5°		0,1°	
	<b>-0,1°</b>	<b>-0,1°</b>		<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>		<b>-0,1°</b>	<b>0,2°</b>		<b>0,6°</b>	<b>0,2°</b>	
F	-0,2°	0,0°	E	0,1°	-0,1°	F	0,2°	-0,1°	E	-0,2°	0,0°	
	-0,3°	0,1°		0,3°	0,1°		-0,3°	0,0°		0,3°	0,1°	
	<b>-0,1°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>		<b>-0,5°</b>	<b>0,1°</b>		<b>0,5°</b>	<b>0,1°</b>	
Média	<b>-0,1°</b>	<b>0,0°</b>	-	<b>0,3°</b>	<b>0,1°</b>	Média	<b>-0,4°</b>	<b>0,2°</b>	Média	<b>0,5°</b>	<b>0,2°</b>	
S	<b>0,0°</b>	<b>0,1°</b>	-	<b>0,1°</b>	<b>0,1°</b>	S	<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>	S	<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>	
		<b><math>\theta_{xa}</math></b>		<b>0,4°</b>				<b><math>\theta_{xb}</math></b>		<b>0,9°</b>		

**Apêndice 09 - Tabelas resumo dos valores dos monitoramentos das distorção de soldagem utilizando diferentes instrumentos de medição.**

As TAB. 7.19 à TAB. 7.21 apresentam os valores médios de distorção verificados por cada método de medição para os corpos de prova tipo CV1, CX1 e CV2. As duas linhas finais de cada tabela apresentam os valores médios de distorção entre os três métodos de medição.

TABELA 7.19 –Valores médios de distorção medidos pelos diferentes instrumentos de medição para os corpos de prova tipo CV1.

CP	MÉTODO DE CONTROLE	- $\theta_{x/2}$	$\theta_y$	+ $\theta_{x/2}$	$\theta_y$	$\theta_x$
CV11	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-1,0°	0,1°	1,0°	0,1°	1,9°
	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-0,9°	0,2°	1,0°	0,2°	1,9°
	Medição indireta relógio comparador	-1,0°	0,2°	0,9°	0,2°	2,0°
	<b>Média</b>	<b>-1,0°</b>	<b>0,1°</b>	<b>1,0°</b>	<b>0,2°</b>	<b>1,9°</b>
	<b>Erro (intervalo de confiança 95%)</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>
CV12	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-1,4°	0,1°	1,3°	0,1°	2,6°
	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-1,3°	0,1°	1,2°	0,3°	2,5°
	Medição indireta relógio comparador	-1,3°	0,1°	1,2°	0,3°	2,5°
	<b>Média</b>	<b>-1,3°</b>	<b>0,1°</b>	<b>1,2°</b>	<b>0,2°</b>	<b>2,5°</b>
	<b>Erro (intervalo de confiança 95%)</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,3°</b>	<b>±0,2°</b>
CV13	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-1,3°	0,1°	1,2°	0,1°	2,5°
	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-1,1°	0,1°	1,2°	0,1°	2,3°
	Medição indireta relógio comparador	-1,2°	0,1°	1,2°	0,1°	2,3°
	<b>Média</b>	<b>-1,2°</b>	<b>0,1°</b>	<b>1,2°</b>	<b>0,1°</b>	<b>2,4°</b>
	<b>Erro (intervalo de confiança 95%)</b>	<b>±0,3°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,2°</b>
CV14	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-1,5°	0,1°	1,1°	0,1°	2,5°
	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-1,3°	0,2°	1,3°	0,2°	2,5°
	Medição indireta relógio comparador	-1,2°	0,2°	1,2°	0,1°	2,5°
	<b>Média</b>	<b>-1,3°</b>	<b>0,1°</b>	<b>1,2°</b>	<b>0,1°</b>	<b>2,5°</b>
	<b>Erro (intervalo de confiança 95%)</b>	<b>±0,3°</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,3°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>
CV15	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-1,6°	0,3°	1,2°	0,2°	2,8°
	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-0,9°	0,2°	1,4°	0,1°	2,4°
	Medição indireta relógio comparador	-1,0°	0,2°	1,5°	0,1°	2,5°
	<b>Média</b>	<b>-1,2°</b>	<b>0,2°</b>	<b>1,4°</b>	<b>0,1°</b>	<b>2,5°</b>
	<b>Erro (intervalo de confiança 95%)</b>	<b>±0,8°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,3°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,5°</b>
CV16	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-1,3°	0,1°	1,3°	0,1°	2,6°
	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-1,9°	0,2°	0,5°	0,1°	2,4°
	Medição indireta relógio comparador	-2,0°	0,2°	0,4°	0,0°	2,4°
	<b>Média</b>	<b>-1,7°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,7°</b>	<b>0,1°</b>	<b>2,4°</b>
	<b>Erro (intervalo de confiança 95%)</b>	<b>±1,0°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±1,2°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,2°</b>
<b>MÉDIA</b>		<b>-1,3°</b>	<b>0,1°</b>	<b>1,1°</b>	<b>0,1°</b>	<b>2,5°</b>
<b>ERRO</b>		<b>0,3°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,1°</b>

TABELA 7.20 – Valores médios de distorção medidos pelos diferentes instrumentos de medição para os corpos de prova tipo CX1.

CP	MÉTODO DE CONTROLE	LADO A					LADO B				
		- $\theta_x/2$	$\theta_y$	+ $\theta_x/2$	$\theta_y$	$\theta_x$	- $\theta_x/2$	$\theta_y$	+ $\theta_x/2$	$\theta_y$	$\theta_x$
CX11	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-0,1°	0,1°	0,3°	0,1°	0,4°	-0,4°	0,1°	0,5°	0,1°	0,9°
	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-0,2°	0,1°	0,2°	0,1°	0,4°	-0,3°	0,2°	0,5°	0,2°	0,8°
	Medição indireta relógio comparador	-0,1°	0,1°	0,2°	0,1°	0,3°	-0,2°	0,2°	0,4°	0,2°	0,6°
	<b>Média</b>	<b>-0,1°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,3°</b>	<b>-0,3°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,5°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,8°</b>
	<b>Erro (intervalo de confiança 95%)</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,0°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,4°</b>
CX12	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-0,3°	0,1°	0,2°	0,0°	0,5°	-0,7°	0,1°	0,3°	0,1°	1,0°
	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-0,3°	0,1°	0,3°	0,1°	0,7°	-0,5°	0,4°	0,5°	0,5°	1,0°
	Medição indireta relógio comparador	-0,3°	0,1°	0,3°	0,1°	0,5°	-0,5°	0,4°	0,5°	0,5°	1,0°
	<b>Média</b>	<b>-0,3°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,5°</b>	<b>-0,5°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,5°</b>	<b>0,4°</b>	<b>1,0°</b>
	<b>Erro (intervalo de confiança 95%)</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,3°</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,5°</b>	<b>±0,3°</b>	<b>±0,6°</b>	<b>±0,1°</b>
CX13	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-0,2°	0,1°	0,2°	0,1°	0,4°	-0,5°	0,1°	0,4°	0,1°	0,9°
	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-0,1°	0,0°	0,3°	0,1°	0,4°	-0,4°	0,2°	0,5°	0,2°	0,9°
	Medição indireta relógio comparador	-0,1°	0,0°	0,3°	0,1°	0,4°	-0,5°	0,2°	0,4°	0,2°	0,9°
	<b>Média</b>	<b>-0,1°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,4°</b>	<b>-0,5°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,9°</b>
	<b>Erro (intervalo de confiança 95%)</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,1°</b>
<b>MÉDIA</b>		<b>-0,2°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,4°</b>	<b>-0,4°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,5°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,9°</b>
<b>ERRO</b>		<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,3°</b>

TABELA 7.21 – Valores médios de distorção medidos pelos diferentes instrumentos de medição para os corpos de prova tipo CV2.

CP	MÉTODO DE CONTROLE	- $\theta_x/2$	$\theta_y$	+ $\theta_x/2$	$\theta_y$	$\theta_x$
CV21	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-2,35°	-0,35°	2,17°	-0,30°	4,52°
	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-2,28°	-0,28°	1,52°	-0,30°	3,80°
	Medição indireta relógio comparador	-2,18°	-0,30°	2,17°	-0,31°	4,35°
	<b>Média</b>	<b>-2,3°</b>	<b>-0,3°</b>	<b>2,0°</b>	<b>-0,3°</b>	<b>4,2°</b>
	<b>Erro (intervalo de confiança 95%)</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,09°</b>	<b>±0,9°</b>	<b>±0,0°</b>	<b>±0,9°</b>
CV22	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-2,15°	-0,30°	2,05°	-0,10°	4,20°
	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-2,18°	-0,20°	1,98°	-0,18°	4,16°
	Medição indireta relógio comparador	-2,08°	-0,19°	1,93°	-0,16°	4,01°
	<b>Média</b>	<b>-2,1°</b>	<b>-0,2°</b>	<b>2,0°</b>	<b>-0,1°</b>	<b>4,1°</b>
	<b>Erro (intervalo de confiança 95%)</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,15°</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,1°</b>	<b>±0,2°</b>
CV23	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-2,10°	-0,30°	2,08°	-0,35°	4,18°
	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-1,94°	-0,32°	2,12°	-0,32°	4,06°
	Medição indireta relógio comparador	-1,96°	-0,33°	2,10°	-0,34°	4,06°
	<b>Média</b>	<b>-2,0°</b>	<b>-0,3°</b>	<b>2,1°</b>	<b>-0,3°</b>	<b>4,1°</b>
	<b>Erro (intervalo de confiança 95%)</b>	<b>±0,2°</b>	<b>±0,04°</b>	<b>±0,0°</b>	<b>±0,0°</b>	<b>±0,2°</b>
<b>MÉDIA</b>		<b>-2,1°</b>	<b>-0,3°</b>	<b>2,0°</b>	<b>-0,3°</b>	<b>4,1°</b>
<b>ERRO</b>		<b>0,3°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,2°</b>

**Apêndice 10 – Tabela de valores do monitoramento contínuo dos deslocamentos dos pontos refletidos no plano do anteparo através da análise dos frames dos vídeos no software Auto Cad**

As TAB. 7.22 à TAB. 7.24 apresentam os valores de deslocamentos dos pontos refletidos no plano do anteparo obtidos através da análise computacional dos frames discretizados dos vídeos para os corpos de prova tipo CV2, CV1 e CX1. Estas tabelas também apresentam os resultados dos valores dos ângulos de distorções calculados através da regressão linear dos pontos refletidos para o lado esquerdo e direito do corpo de prova.

TABELA 7.22 – Monitoramento contínuo dos deslocamentos dos pontos refletidos no plano do anteparo para os corpos de prova tipo CV2.

Tempo		0 min		5 min		10 min		15 min		20 min		30 min		
Pontos	PX (mm)	PZ (mm)	PX (mm)	PZ (mm)	PX (mm)	PZ (mm)	PX (mm)	PZ (mm)	PX (mm)	PZ (mm)	PX (mm)	PZ (mm)	PZ (mm)	
<b>CV21</b>														
A	375,8	0,0	370,3	3,2	367,0	4,3	366,8	4,5	366,4	7,1	366,4	7,1	366,4	7,5
B	285,1	0,0	279,3	3,6	277,3	4,9	275,5	3,9	275,3	3,6	275,3	3,6	275,3	3,5
E	100,7	0,0	100,7	-1,7	100,7	-2,3	100,7	-3,6	97,9	-3,4	97,9	-3,4	97,9	-3,4
<b>+θx/2</b>	<b>0,0°</b>		<b>1,1°</b>		<b>1,5°</b>		<b>1,8°</b>		<b>2,2°</b>		<b>2,3°</b>		<b>2,3°</b>	
F	-100,7	0,0	-100,7	-0,1	-100,7	-0,2	-100,7	-1,6	-97,6	-6,0	-97,6	-6,0	-97,6	-6,0
I	-292,2	0,0	-288,1	2,4	-288,2	3,9	-288,4	1,6	-288,3	0,3	-288,3	0,3	-288,3	0,5
J	-379,8	0,0	-375,4	3,2	-375,2	3,9	-375,9	3,4	-375,9	3,0	-375,9	3,0	-375,9	3,6
<b>-θx/2</b>	<b>0,0°</b>		<b>-0,7°</b>		<b>-0,9°</b>		<b>-1,0°</b>		<b>-1,9°</b>		<b>-2,0°</b>		<b>-2,0°</b>	
<b>θx</b>	<b>0,0°</b>		<b>1,8°</b>		<b>2,5°</b>		<b>2,9°</b>		<b>4,1°</b>		<b>4,3°</b>		<b>4,3°</b>	
<b>CV22</b>														
A	378,3	0,0	374,6	11,0	373,8	14,9	373,1	17,9	373,0	18,8	374,3	19,9	374,3	19,9
B	286,0	0,0	278,3	7,9	278,0	10,4	277,6	10,6	277,0	10,4	277,0	10,4	277,0	10,6
E	100,7	0,0	100,7	-2,1	100,7	-2,8	100,7	-2,8	98,2	-2,8	98,2	-2,8	98,2	-2,8
<b>+θx/2</b>	<b>0,0°</b>		<b>2,8°</b>		<b>3,8°</b>		<b>4,3°</b>		<b>4,5°</b>		<b>4,6°</b>		<b>4,6°</b>	
F	-100,7	0,0	-100,7	-2,4	-100,7	-3,1	-100,7	-3,2	-97,9	-3,3	-97,9	-3,3	-97,9	-3,3
I	-291,1	0,0	-285,4	10,2	-283,7	13,3	-283,0	13,7	-283,2	13,9	-283,2	13,9	-283,2	14,2
J	-380,0	0,0	-373,0	9,1	-371,1	11,8	-371,1	14,8	-372,5	14,9	-372,5	14,9	-372,5	14,9
<b>-θx/2</b>	<b>0,0°</b>		<b>-2,6°</b>		<b>-3,5°</b>		<b>-4,0°</b>		<b>-4,0°</b>		<b>-4,0°</b>		<b>-4,0°</b>	
<b>θx</b>	<b>0,0°</b>		<b>5,4°</b>		<b>7,2°</b>		<b>8,4°</b>		<b>8,5°</b>		<b>8,7°</b>		<b>8,7°</b>	
<b>CV23</b>														
A	374,9	0,0	369,8	5,9	368,8	6,6	368,4	5,1	367,2	9,1	367,2	9,2	367,2	9,2
B	282,6	0,0	277,8	2,4	276,1	2,4	275,4	2,2	274,6	1,5	274,6	1,8	274,6	1,8
E	100,7	0,0	100,7	-0,4	100,7	-1,0	100,7	-2,9	97,9	-1,9	97,9	-1,9	97,9	-1,9
<b>+θx/2</b>	<b>0,0°</b>		<b>1,3°</b>		<b>1,6°</b>		<b>1,7°</b>		<b>2,2°</b>		<b>2,2°</b>		<b>2,2°</b>	
F	-100,7	0,0	-100,7	-0,6	-100,7	-1,1	-100,7	-3,2	-98,1	-2,3	-98,1	-2,3	-98,1	-2,3
I	-294,3	0,0	-292,8	2,4	-292,1	2,0	-291,4	1,1	-290,9	0,3	-290,3	0,5	-290,3	0,5
J	-381,6	0,0	-380,9	2,3	-380,7	2,7	-379,7	1,9	-379,5	7,3	-379,3	7,6	-379,3	7,6
<b>-θx/2</b>	<b>0,0°</b>		<b>-0,6°</b>		<b>-0,8°</b>		<b>-1,1°</b>		<b>-1,8°</b>		<b>-1,9°</b>		<b>-1,9°</b>	
<b>θx</b>	<b>0,0°</b>		<b>1,9°</b>		<b>2,4°</b>		<b>2,8°</b>		<b>3,9°</b>		<b>4,1°</b>		<b>4,1°</b>	



TABELA 7.24 – Monitoramento contínuo dos deslocamentos dos pontos refletidos no plano do anteparo para os corpos de prova tipo CX1.

Tempo			0 min			5 min			10 min			15 min			5 min			10 min		
Tempo	Pontos	PX (mm)	PZ (mm)	PX (mm)	PZ (mm)	PX (mm)	PZ (mm)	PX (mm)	PZ (mm)	PX (mm)	PZ (mm)	PX (mm)	PZ (mm)	PX (mm)	PZ (mm)	PX (mm)	PZ (mm)	PX (mm)	PZ (mm)	
																				PX (mm)
<b>CX11 LADO A</b>																				
A		376,4	0,0	375,6	0,4	376,6	3,0	376,6	2,9											
B		285,4	0,0	285,0	0,3	285,0	2,0	285,0	1,9											
C		172,8	0,0	172,2	-0,1	173,1	1,9	173,1	1,8											
E		42,5	0,0	42,5	-0,1	42,2	1,8	42,0	1,8											
	<b>+θx/2</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>											
F		-42,5	0,0	-42,5	0,1	-42,2	0,9	-42,0	0,9											
G		-175,8	0,0	-175,8	0,1	-175,4	0,8	-175,4	0,8											
I		-290,6	0,0	-290,6	0,2	-289,2	1,4	-289,3	0,9											
J		-380,7	0,0	-380,1	0,3	-378,8	1,7	-379,0	2,2											
	<b>-θx/2</b>	<b>0,0°</b>	<b>-0,1°</b>	<b>0,0°</b>	<b>-0,1°</b>	<b>-0,1°</b>	<b>0,3°</b>	<b>-0,2°</b>	<b>0,4°</b>											
	<b>θx</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,5°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,4°</b>											
<b>CX11 LADO B</b>																				
A		376,9	0,0	376,2	5,0	375,9	6,4													
B		284,4	0,0	284,0	4,6	284,1	6,4													
C		171,0	0,0	170,1	4,5	170,5	6,0													
E		42,5	0,0	42,5	3,1	42,2	4,1													
	<b>+θx/2</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,4°</b>													
F		-42,5	0,0	-42,5	2,9	-42,2	3,8													
G		-177,0	0,0	-175,2	3,9	-175,2	5,1													
I		-290,4	0,0	-288,6	4,5	-287,3	5,9													
J		-381,7	0,0	-378,5	4,7	-377,4	6,3													
	<b>-θx/2</b>	<b>0,0°</b>	<b>-0,3°</b>	<b>-0,3°</b>	<b>-0,4°</b>	<b>-0,4°</b>	<b>-0,4°</b>													
	<b>θx</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,6°</b>	<b>0,6°</b>	<b>0,8°</b>	<b>0,8°</b>	<b>0,8°</b>													
<b>CX12 LADO A</b>																				
A		374,5	0,0	376,4	10,9	376,3	13,5													
B		284,3	0,0	285,7	9,8	285,7	11,7													
C		170,5	0,0	169,9	9,0	169,9	11,4													
E		42,5	0,0	42,5	8,2	42,2	10,3													
	<b>+θx/2</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,5°</b>	<b>0,5°</b>	<b>0,5°</b>	<b>0,5°</b>	<b>0,5°</b>													
F		-42,5	0,0	-42,5	8,2	-42,2	10,2													
G		-178,0	0,0	-178,1	10,1	-179,6	12,5													
I		-290,8	0,0	-292,4	10,7	-292,8	13,1													
J		-380,9	0,0	-383,6	11,4	-383,8	14,4													
	<b>-θx/2</b>	<b>0,0°</b>	<b>-0,5°</b>	<b>-0,5°</b>	<b>-0,7°</b>	<b>-0,7°</b>	<b>-0,7°</b>													
	<b>θx</b>	<b>0,0°</b>	<b>1,0°</b>	<b>1,0°</b>	<b>1,2°</b>	<b>1,2°</b>	<b>1,2°</b>													
<b>CX12 LADO B</b>																				
A		377,3	0,0	376,2	4,9	376,7	6,9													
B		285,1	0,0	284,3	3,7	284,3	5,9													
C		172,7	0,0	172,5	4,4	172,5	5,6													
E		42,5	0,0	42,5	2,5	42,2	3,1													
	<b>+θx/2</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,6°</b>	<b>0,6°</b>	<b>0,6°</b>													
F		-42,5	0,0	-42,5	3,3	-42,2	3,8													
G		-175,4	0,0	-174,4	4,5	-174,4	5,2													
I		-289,0	0,0	-288,6	2,3	-288,6	6,0													
J		-379,6	0,0	-377,9	7,2	-379,3	6,3													
	<b>-θx/2</b>	<b>0,0°</b>	<b>-0,4°</b>	<b>-0,4°</b>	<b>-0,4°</b>	<b>-0,4°</b>	<b>-0,4°</b>													
	<b>θx</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,8°</b>	<b>0,8°</b>	<b>1,0°</b>	<b>1,0°</b>	<b>1,0°</b>													
<b>CX13 LADO A</b>																				
A		375,9	0,0	369,2	1,9	368,8	2,5	368,2	2,8											
B		283,5	0,0	277,0	1,7	276,8	2,2	276,4	2,5											
C		169,5	0,0	164,5	1,0	165,3	1,5	165,5	1,8											
E		42,5	0,0	42,5	0,8	42,2	1,3	42,0	1,5											
	<b>+θx/2</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>											
F		-42,5	0,0	-42,5	0,0	-42,2	0,0	-42,0	0,0											
G		-179,1	0,0	-179,1	0,1	-179,4	0,5	-179,4	0,4											
I		-293,7	0,0	-292,6	0,6	-292,6	0,8	-292,6	0,8											
J		-382,2	0,0	-379,6	0,8	-379,8	1,1	-380,2	1,2											
	<b>-θx/2</b>	<b>0,0°</b>	<b>-0,1°</b>	<b>-0,2°</b>	<b>-0,2°</b>	<b>-0,2°</b>	<b>-0,2°</b>	<b>-0,2°</b>	<b>-0,2°</b>											
	<b>θx</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,4°</b>											
<b>CX13 LADO B</b>																				

**Apêndice 11 - Tabela dos valores da projeção teórica da posição final dos pontos refletidos no painel do anteparo**

A TAB. 7.25 apresenta os resultados dos cálculos de previsão da posição final de cada ponto luminoso no painel do anteparo para os corpos de prova tipo CV1, CX1 e CV2 conforme descrito no item 3.7

TABELA 7.25 – Resultados dos cálculos da projeção teórica do pontos refletidos no anteparo.

CP	Pontos	PX (mm)	PZ (mm)	Pontos	PX (mm)	PZ (mm)	CP	Pontos	PX (mm)	PZ (mm)	Pontos	PX (mm)	PZ (mm)
CV11	J	-378,0	8,9	A	377,9	9,3	CX11 A	J	-379,7	2,6	A	379,6	2,5
	I	-288,0	7,4	B	287,9	7,7		I	-289,7	2,4	B	289,6	2,2
	G	-173,0	5,5	C	172,9	5,8		G	-174,7	2,1	C	174,6	1,8
	F	-41,5	3,3	E	41,4	3,5		F	-43,2	1,8	E	43,1	1,4
CV12	J	-377,1	10,6	A	377,4	11,9	CX11B	J	-379,6	4,4	A	379,1	6,3
	I	-287,1	8,5	B	287,5	10,0		I	-289,6	4,1	B	289,1	5,6
	G	-172,2	5,8	C	172,5	7,6		G	-174,6	3,7	C	174,1	4,8
	F	-40,7	2,8	E	41,0	4,9		F	-43,1	3,3	E	42,6	3,8
CV13	J	-377,4	9,4	A	377,5	9,2	CX12 A	J	-379,4	4,1	A	379,5	3,1
	I	-287,5	7,5	B	287,5	7,3		I	-289,4	3,6	B	289,5	2,7
	G	-172,5	5,2	C	172,5	4,9		G	-174,4	3,1	C	174,5	2,2
	F	-41,0	2,4	E	41,0	2,2		F	-42,9	2,4	E	43,0	1,6
CV14	J	-377,1	11,2	A	377,5	10,3	CX12 B	J	-378,9	9,6	A	379,0	10,9
	I	-287,2	9,1	B	287,5	8,5		I	-288,9	8,8	B	289,0	10,1
	G	-172,2	6,5	C	172,5	6,1		G	-173,9	7,7	C	174,0	9,2
	F	-40,7	3,4	E	41,0	3,4		F	-42,4	6,5	E	42,5	8,2
CV15	J	-377,5	12,0	A	377,1	11,6	CX13 A	J	-379,7	1,9	A	379,5	3,8
	I	-287,5	10,1	B	287,1	9,5		I	-289,7	1,7	B	289,5	3,5
	G	-172,5	7,8	C	172,1	6,8		G	-174,7	1,4	C	174,5	3,0
	F	-41,1	5,2	E	40,6	3,6		F	-43,2	1,1	E	43,0	2,4
CV16	J	-376,3	13,8	A	378,4	5,9	CX13 B	J	-379,0	5,8	A	379,1	5,5
	I	-286,3	11,1	B	288,4	4,7		I	-289,0	5,1	B	289,1	4,8
	G	-171,4	7,7	C	173,4	3,2		G	-174,0	4,2	C	174,1	4,0
	F	-39,9	3,7	E	41,9	1,5		F	-42,5	3,1	E	42,6	3,0
CV21	J	-375,01	5,36	A	375,85	3,67	CV22	J	-375,24	6,49	A	375,88	6,69
	I	-285,07	2,55	B	285,89	0,02		I	-285,29	3,80	B	285,92	3,06
	F	-97,33	-5,65	E	98,31	-5,54		F	-97,54	-4,04	E	98,33	-2,48
CV23	J	-375,68	3,67	A	375,35	3,98							
	I	-285,72	1,22	B	285,40	-0,10							
	F	-97,94	-5,93	E	97,85	-6,30							



## Apêndice 12 - Tabela resumo dos valores do monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser

As TAB. 7.26 à TAB. 7.28 apresentam o resumo dos valores de distorção angular obtidos nas tabelas do Apêndice 10. Estas tabelas representam a evolução das distorções de soldagem em função do tempo monitorados pelo sistema de monitoramento contínuo utilizando sensores a laser para os corpos de provas tipo CV1, CX1 e CV2.

TABELA 7.26 - Monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para os corpos de prova tipo CV1.

CP	Tempo	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min
CV11	- $\theta x/2$	0,0°	-0,4°	-0,5°	-0,9°	-1,1°	-1,1°
	+ $\theta x/2$	0,0°	0,1°	0,1°	0,3°	0,9°	0,9°
	$\theta x$	0,0°	0,5°	0,7°	1,1°	2,0°	2,0°
CV12	- $\theta x/2$	0,0°	-0,2°	-0,5°	-1,1°	-1,3°	-1,3°
	+ $\theta x/2$	0,0°	0,0°	0,3°	0,9°	1,1°	1,2°
	$\theta x$	0,0°	0,1°	0,8°	2,0°	2,4°	2,5°
CV13	- $\theta x/2$	0,0°	-0,6°	-1,2°	-1,4°	-1,4°	-1,4°
	+ $\theta x/2$	0,0°	0,2°	0,8°	0,9°	1,0°	1,0°
	$\theta x$	0,0°	0,8°	2,0°	2,3°	2,5°	2,5°
CV14	- $\theta x/2$	0,0°	-0,1°	-0,4°	-0,7°	-1,1°	-1,2°
	+ $\theta x/2$	0,0°	0,0°	0,3°	1,0°	1,2°	1,3°
	$\theta x$	0,0°	0,1°	0,6°	1,7°	2,4°	2,6°
CV15	- $\theta x/2$	0,0°	0,0°	0,1°	1,0°	0,9°	1,0°
	+ $\theta x/2$	0,0°	-0,1°	0,1°	0,5°	0,5°	0,6°
	$\theta x$	0,0°	-0,1°	0,1°	-0,5°	-0,4°	-0,4°
CV16	- $\theta x/2$	0,0°	-0,1°	-0,9°	-1,5°	-1,7°	-1,9°
	+ $\theta x/2$	0,0°	0,2°	0,3°	0,5°	0,5°	0,5°
	$\theta x$	0,0°	0,3°	1,2°	2,0°	2,2°	2,4°
MÉDIA	- $\theta x/2$	0,0°	-0,2°	-0,7°	-1,2°	-1,4°	-1,5°
	Erro	$\pm 0,0^\circ$	$\pm 0,4^\circ$	$\pm 0,6^\circ$	$\pm 0,6^\circ$	$\pm 0,4^\circ$	$\pm 0,5^\circ$
	+ $\theta x/2$	0,0°	0,1°	0,4°	0,9°	1,0°	1,0°
	Erro	$\pm 0,0^\circ$	$\pm 0,2^\circ$	$\pm 0,4^\circ$	$\pm 0,4^\circ$	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 0,6^\circ$
	$\theta x$	0,0°	0,3°	1,2°	2,0°	2,4°	2,5°
Erro	$\pm 0,0^\circ$	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 1,0^\circ$	$\pm 0,4^\circ$	$\pm 0,2^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	

TABELA 7.27 - Monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para os corpos de prova tipo CX1.

CP	TEMPO	LADO A				LADO B		
		0 min	5 min	10 min	15 min	0 min	5 min	10 min
CX11	- $\theta x/2$	0,0°	0,0°	-0,1°	-0,2°	0,0°	-0,3°	-0,4°
	+ $\theta x/2$	0,0°	0,1°	0,2°	0,2°	0,0°	0,3°	0,4°
	$\theta x$	<b>0,0°</b>	<b>0,1°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,6°</b>	<b>0,8°</b>
CX12	- $\theta x/2$	0,0°	-0,1°	-0,1°	-0,1°	0,0°	-0,5°	-0,7°
	+ $\theta x/2$	0,0°	0,2°	0,3°	0,3°	0,0°	0,5°	0,5°
	$\theta x$	<b>0,0°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,5°</b>	<b>0,0°</b>	<b>1,0°</b>	<b>1,2°</b>
CX13	- $\theta x/2$	0,0°	-0,1°	-0,2°	-0,2°	0,0°	-0,4°	-0,4°
	+ $\theta x/2$	0,0°	0,2°	0,2°	0,2°	0,0°	0,3°	0,6°
	$\theta x$	<b>0,0°</b>	<b>0,3°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,8°</b>	<b>1,0°</b>
MÉDIA	- $\theta x/2$	<b>0,0°</b>	<b>-0,1°</b>	<b>-0,1°</b>	<b>-0,2°</b>	<b>0,0°</b>	<b>-0,4°</b>	<b>-0,5°</b>
	Erro	$\pm 0,0^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,2^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,0^\circ$	$\pm 0,3^\circ$	$\pm 0,4^\circ$
	+ $\theta x/2$	<b>0,0°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,5°</b>
	Erro	$\pm 0,0^\circ$	$\pm 0,2^\circ$	$\pm 0,2^\circ$	$\pm 0,2^\circ$	$\pm 0,0^\circ$	$\pm 0,2^\circ$	$\pm 0,3^\circ$
	$\theta x$	<b>0,0°</b>	<b>0,2°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,4°</b>	<b>0,0°</b>	<b>0,8°</b>	<b>1,0°</b>
	Erro	$\pm 0,0^\circ$	$\pm 0,3^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,0^\circ$	$\pm 0,4^\circ$	$\pm 0,5^\circ$

TABELA 7.28 - Monitoramento contínuo das distorções de soldagem utilizando sensores a laser para os corpos de prova tipo CV2.

CP	Tempo	0,0°	5,0°	10,0°	15,0°	20,0°	30,0°
CV21	- $\theta x/2$	0,0°	-0,7°	-0,9°	-1,0°	-1,9°	-2,0°
	+ $\theta x/2$	0,0°	1,1°	1,6°	1,9°	2,2°	2,3°
	$\theta x$	<b>0,0°</b>	<b>1,8°</b>	<b>2,5°</b>	<b>2,9°</b>	<b>4,1°</b>	<b>4,3°</b>
CV22	- $\theta x/2$	0,0°	-2,6°	-3,5°	-4,0°	-4,0°	-4,0°
	+ $\theta x/2$	0,0°	2,8°	3,8°	4,3°	4,5°	4,6°
	$\theta x$	<b>0,0°</b>	<b>5,4°</b>	<b>7,2°</b>	<b>8,4°</b>	<b>8,5°</b>	<b>8,7°</b>
CV23	- $\theta x/2$	0,0°	-0,6°	-0,8°	-1,1°	-1,8°	-1,9°
	+ $\theta x/2$	0,0°	1,3°	1,6°	1,7°	2,2°	2,2°
	$\theta x$	<b>0,0°</b>	<b>1,9°</b>	<b>2,4°</b>	<b>2,8°</b>	<b>3,9°</b>	<b>4,1°</b>
MÉDIA	- $\theta x/2$	<b>0,0°</b>	<b>-0,7°</b>	<b>-0,9°</b>	<b>-1,1°</b>	<b>-1,8°</b>	<b>-1,9°</b>
	Erro	$\pm 0,0^\circ$	$\pm 0,4^\circ$	$\pm 0,8^\circ$	$\pm 0,4^\circ$	$\pm 0,6^\circ$	$\pm 0,5^\circ$
	+ $\theta x/2$	<b>0,0°</b>	<b>1,2°</b>	<b>1,6°</b>	<b>1,8°</b>	<b>2,2°</b>	<b>2,3°</b>
	Erro	$\pm 0,0^\circ$	$\pm 1,0^\circ$	$\pm 0,0^\circ$	$\pm 0,9^\circ$	$\pm 0,3^\circ$	$\pm 0,7^\circ$
	$\theta x$	<b>0,0°</b>	<b>1,9°</b>	<b>2,4°</b>	<b>2,8°</b>	<b>4,0°</b>	<b>4,2°</b>
	Erro	$\pm 0,0^\circ$	$\pm 0,6^\circ$	$\pm 0,7^\circ$	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 0,9^\circ$	$\pm 1,2^\circ$

**Apêndice 13 - Planilhas dos cálculos estatísticos para os testes de hipóteses**

As TAB. 7.29 à TAB. 7.31 apresentam os cálculos estatísticos para os testes de hipóteses de uma média com desvio-padrão desconhecido para os corpos de prova do tipo CV1, CX1 à CV2. A comparação é realizada entre a média dos valores de distorção verificado com os instrumentos de medição ( $\bar{X}$ ) e os valores finais de distorções verificados com o sistema de monitoramento contínuo ( $\mu_0$ ). São apresentadas três comparações para cada corpo de prova, sendo duas comparações para as distorções que ocorre em cada lado da peça e terceira comparação para a distorção total do corpo de prova.

TABELA 7.29 – Testes de hipóteses para comparação entre os valores médios de distorção verificados com os instrumentos de medição x SMCDS para os corpos de prova tipo CV1.

(Continua)

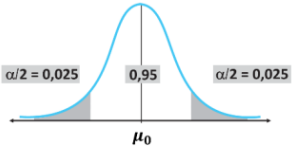
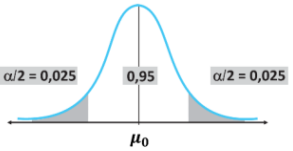
TESTE DE HIPÓTESE PARA UMA MÉDIA COM DESVIO PADRÃO DESCONHECIDO E PEQUENA AMOSTRA (n<30)								
CV11	-θx/2	+θx/2	θx	CV12	-θx/2	+θx/2	θx	
Inclinômetro digital na mesa desempenho	-0,95°	0,95°	1,90°	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-1,35°	1,25°	2,60°	
Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-0,90°	1,04°	1,94°	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-1,28°	1,18°	2,46°	
Medição indireta relógio comparador	-1,04°	0,95°	1,99°	Medição indireta relógio comparador	-1,33°	1,15°	2,48°	
$\bar{X}$	-0,96°	0,98°	1,94°	$\bar{X}$	-1,32°	1,19°	2,51°	
$\mu_0$ (SMCDS)	-1,09°	0,91°	1,99°	$\mu_0$ (SMCDS)	-1,31°	1,17°	2,48°	
S	0,0729°	0,0524°	0,0463°	S	0,0365°	0,0509°	0,0749°	
n	3	3	3	n	3	3	3	
gl	2	2	2	gl	2	2	2	
α	0,05	0,05	0,05	α	0,05	0,05	0,05	
$t_{[n-1]}$	2,866	2,403	1,798	$t_{[n-1]}$	-0,476	0,879	0,830	
$t_{[n-1];\alpha}$	4,303	4,303	4,303	$t_{[n-1];\alpha}$	4,303	4,303	4,303	
<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>				<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>				
Ho: $\mu = \mu_0$ Ha: $\mu \neq \mu_0$ Rejeita Ho si $ t_{[n-1]}  > t_{[n-1];\alpha}$ sendo $\mu = \bar{X}$				Ho: $\mu = \mu_0$ Ha: $\mu \neq \mu_0$ Rejeita Ho si $ t_{[n-1]}  > t_{[n-1];\alpha}$ sendo $\mu = \bar{X}$				
<b>CONCLUSÃO</b>				<b>CONCLUSÃO</b>				
Como $t_{[n-1];\alpha} >  t_{[n-1]} $ , aceita Hou seja, pode-se se afirmar com 95% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CV11 mesurada pelo SMDSL é igual a distorção mesurada pelos instrumentos de medição.				Como $t_{[n-1];\alpha} >  t_{[n-1]} $ , aceita Hou seja, pode-se se afirmar com 95% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CV12 mesurada pelo SMDSL é igual a distorção mesurada pelos instrumentos de medição.				
$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$ 				$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$ 				

TABELA 7.29 - Testes de hipóteses para comparação entre os valores médios de distorção verificados com os instrumentos de medição x SMCDs para os corpos de prova tipo CV1.

(Conclusão)

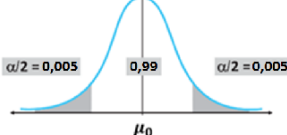
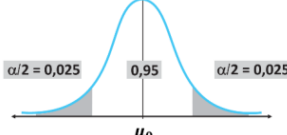
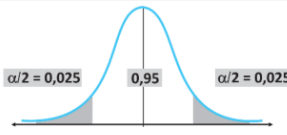
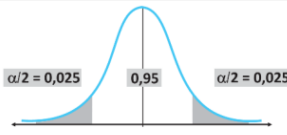
TESTE DE HIPÓTESE PARA UMA MÉDIA COM DESVIO PADRÃO DESCONHECIDO E PEQUENA AMOSTRA (n<30)											
CV13			-θx/2	+θx/2	θx	CV14			-θx/2	+θx/2	θx
Inclinômetro digital na mesa desempenho			-1,30°	1,15°	2,45°	Inclinômetro digital na mesa desempenho			-1,45°	1,05°	2,50°
Inclinômetro digital na mesa de trabalho			-1,10°	1,20°	2,30°	Inclinômetro digital na mesa de trabalho			-1,28°	1,26°	2,54°
Medição indireta relógio comparador			-1,15°	1,18°	2,33°	Medição indireta relógio comparador			-1,23°	1,23°	2,47°
$\bar{X}$			-1,18°	1,18°	2,36°	$\bar{X}$			-1,32°	1,18°	2,50°
μ0 (SMCDs)			-1,43°	1,04°	2,47°	μ0 (SMCDs)			-1,24°	1,32°	2,56°
S			0,1041°	0,0252°	0,0794°	S			0,1143°	0,1145°	0,0366°
n			3	3	3	n			3	3	3
gl			2	2	2	gl			2	2	2
α			0,01	0,01	0,01	α			0,05	0,05	0,05
$t_{[n-1]}$			4,153	9,622	2,394	$t_{[n-1]}$			-1,199	-2,025	2,597
$t_{[n-1];\alpha}$			9,925	9,925	9,925	$t_{[n-1];\alpha}$			4,303	4,303	4,303
<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>						<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>					
Ho: μ = μ0			Ha: μ ≠ μ0			Rejeita Ho se $ t_{[n-1]}  > t_{[n-1];\alpha}$			sendo μ = $\bar{X}$		
<b>CONCLUSÃO</b>						<b>CONCLUSÃO</b>					
Como $t_{[n-1];\alpha} >  t_{[n-1]} $ , aceita Hou seja, pode-se se afirmar com 99% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CV13 mesurada pelo SMDSL é igual a distorção mesurada pelos instrumentos de medição.						Como $t_{[n-1];\alpha} >  t_{[n-1]} $ , aceita Hou seja, pode-se se afirmar com 95% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CV14 mesurada pelo SMDSL é igual a distorção mesurada pelos instrumentos de medição.					
$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$						$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$					
TESTE DE HIPÓTESE PARA UMA MÉDIA COM DESVIO PADRÃO DESCONHECIDO E PEQUENA AMOSTRA (n<30)											
CV15			-θx/2	+θx/2	θx	CV16			-θx/2	+θx/2	θx
Inclinômetro digital na mesa desempenho			-1,55°	1,20°	2,75°	Inclinômetro digital na mesa desempenho			-1,25°	1,30°	2,55°
Inclinômetro digital na mesa de trabalho			-0,94°	1,42°	2,36°	Inclinômetro digital na mesa de trabalho			-1,92°	0,48°	2,40°
Medição indireta relógio comparador			-1,00°	1,45°	2,45°	Medição indireta relógio comparador			-1,96°	0,43°	2,38°
$\bar{X}$			-1,16°	1,36°	2,52°	$\bar{X}$			-1,71°	0,74°	2,44°
μ0 (SMCDs)			0,97°	0,57°	-0,40°	μ0 (SMCDs)			-1,88°	0,51°	2,39°
S			0,3359°	0,1367°	0,2039°	S			0,3975°	0,4887°	0,0913°
n			3	3	3	n			3	3	3
gl			2	2	2	gl			2	2	2
α			0,05	0,05	0,05	α			0,05	0,05	0,05
$t_{[n-1]}$			-11,013	9,978	24,827	$t_{[n-1]}$			0,736	0,793	1,039
$t_{[n-1];\alpha}$			4,303	4,303	4,303	$t_{[n-1];\alpha}$			4,303	4,303	4,303
<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>						<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>					
Ho: μ = μ0			Ha: μ ≠ μ0			Rejeita Ho se $ t_{[n-1]}  > t_{[n-1];\alpha}$			sendo μ = $\bar{X}$		
<b>CONCLUSÃO</b>						<b>CONCLUSÃO</b>					
Como $ t_{[n-1]}  > t_{[n-1];\alpha}$ , rejeita Hou seja, pode-se se afirmar com 95% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CV15 mesurada pelo SMDSL é diferente da distorção mesurada pelos instrumentos de medição.						Como $t_{[n-1];\alpha} >  t_{[n-1]} $ , aceita Hou seja, pode-se se afirmar com 95% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CV16 mesurada pelo SMDSL é igual a distorção mesurada pelos instrumentos de medição.					
$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$						$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$					

TABELA 7.30 - Testes de hipóteses para comparação entre os valores médios de distorção verificados com os instrumentos de medição x SMCDS para os corpos de prova tipo CX1.

(Continua)

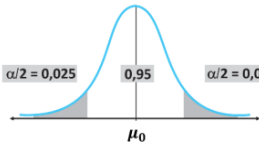
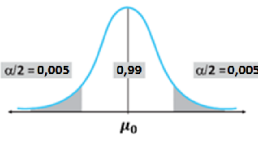
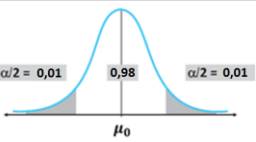
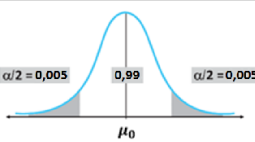
TESTE DE HIPÓTESE PARA UMA MÉDIA COM DESVIO PADRÃO DESCONHECIDO E PEQUENA AMOSTRA (n<30)							
CX11 LADO A	-θx/2	+θx/2	θx	CX11 LADO B	-θx/2	+θx/2	θx
Inclinômetro digital na mesa desempenho	-0,10°	0,25°	0,35°	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-0,25°	0,45°	0,70°
Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-0,18°	0,18°	0,36°	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-0,18°	0,40°	0,58°
Medição indireta relógio comparador	-0,14°	0,16°	0,30°	Medição indireta relógio comparador	-0,18°	0,44°	0,62°
$\bar{X}$	-0,14°	0,20°	0,34°	$\bar{X}$	-0,20°	0,43°	0,63°
μ0 (SMCDS)	-0,19°	0,17°	0,35°	μ0 (SMCDS)	-0,43°	0,39°	0,82°
S	0,0401°	0,0492°	0,0322°	S	0,0408°	0,0260°	0,0616°
n	3	3	3	n	3	3	3
gl	2	2	2	gl	2	2	2
α	0,05	0,05	0,05	α	0,01	0,01	0,01
t <sub>[n-1]</sub>	1,941	1,034	0,838	t <sub>[n-1]</sub>	9,459	2,594	5,171
t <sub>[n-1];α</sub>	4,303	4,303	4,303	t <sub>[n-1];α</sub>	9,925	9,925	9,925
<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>				<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>			
Ho: μ = μ0 Ha: μ ≠ μ0 Rejeita Ho se:  t <sub>[n-1]</sub>   > t <sub>[n-1];α</sub> sendo μ = $\bar{X}$				Ho: μ = μ0 Ha: μ ≠ μ0 Rejeita Ho se:  t <sub>[n-1]</sub>   > t <sub>[n-1];α</sub> sendo μ = $\bar{X}$			
<b>CONCLUSÃO</b>				<b>CONCLUSÃO</b>			
Como t <sub>[n-1];α</sub> >  t <sub>[n-1]</sub>  , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CX11A medida pelo SMDSL é igual a distorção medida pelos instrumentos de medição.				Como t <sub>[n-1];α</sub> >  t <sub>[n-1]</sub>  , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar com 99% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CX11B medida pelo SMDSL é igual a distorção medida pelos instrumentos de medição.			
$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$ 				$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$ 			
TESTE DE HIPÓTESE PARA UMA MÉDIA COM DESVIO PADRÃO DESCONHECIDO E PEQUENA AMOSTRA (n<30)							
CX12 LADO A	-θx/2	+θx/2	θx	CX12 LADO B	-θx/2	+θx/2	θx
Inclinômetro digital na mesa desempenho	-0,25°	0,20°	0,45°	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-0,65°	0,30°	0,95°
Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-0,34°	0,32°	0,66°	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-0,48°	0,54°	1,02°
Medição indireta relógio comparador	-0,26°	0,27°	0,53°	Medição indireta relógio comparador	-0,47°	0,53°	1,00°
$\bar{X}$	-0,28°	0,26°	0,55°	$\bar{X}$	-0,53°	0,46°	0,99°
μ0 (SMCDS)	-0,15°	0,31°	0,46°	μ0 (SMCDS)	-0,68°	0,50°	1,18°
S	0,0500°	0,0606°	0,1059°	S	0,1002°	0,1347°	0,0359°
n	3	3	3	n	3	3	3
gl	2	2	2	gl	2	2	2
α	0,02	0,02	0,02	α	0,01	0,01	0,01
t <sub>[n-1]</sub>	-4,602	-1,346	1,402	t <sub>[n-1]</sub>	2,458	-0,627	9,208
t <sub>[n-1];α</sub>	6,965	6,965	6,965	t <sub>[n-1];α</sub>	9,925	9,925	9,925
<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>				<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>			
Ho: μ = μ0 Ha: μ ≠ μ0 Rejeita Ho se:  t <sub>[n-1]</sub>   > t <sub>[n-1];α</sub> sendo μ = $\bar{X}$				Ho: μ = μ0 Ha: μ ≠ μ0 Rejeita Ho se:  t <sub>[n-1]</sub>   > t <sub>[n-1];α</sub> sendo μ = $\bar{X}$			
<b>CONCLUSÃO</b>				<b>CONCLUSÃO</b>			
Como t <sub>[n-1];α</sub> >  t <sub>[n-1]</sub>  , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar com 98% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CX12A medida pelo SMDSL é igual a distorção medida pelos instrumentos de medição.				Como t <sub>[n-1];α</sub> >  t <sub>[n-1]</sub>  , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar com 99% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CX12B medida pelo SMDSL é igual a distorção medida pelos instrumentos de medição.			
$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$ 				$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$ 			

TABELA 7.30 - Testes de hipóteses para comparação entre os valores médios de distorção verificados com os instrumentos de medição x SMCDs para os corpos de prova tipo CX1.

(Conclusão)

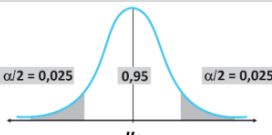
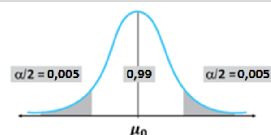
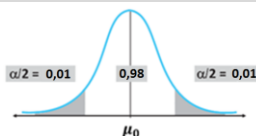
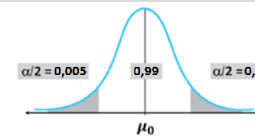
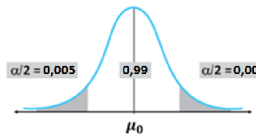
TESTE DE HIPÓTESE PARA UMA MÉDIA COM DESVIO PADRÃO DESCONHECIDO E PEQUENA AMOSTRA (n<30)							
CX13 LADO A	-θx/2	+θx/2	θx	CX13 LADO B	-θx/2	+θx/2	θx
Inclinômetro digital na mesa desempenho	-0,20°	0,15°	0,35°	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-0,45°	0,40°	0,85°
Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-0,12°	0,30°	0,42°	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-0,44°	0,48°	0,92°
Medição indireta relógio comparador	-0,10°	0,27°	0,37°	Medição indireta relógio comparador	-0,48°	0,42°	0,91°
$\bar{X}$	-0,14°	0,24°	0,38°	$\bar{X}$	-0,46°	0,43°	0,89°
$\mu_0$ (SMCDs)	-0,19°	0,24°	0,43°	$\mu_0$ (SMCDs)	-0,43°	0,61°	1,05°
S	0,0541°	0,0799°	0,0361°	S	0,0227°	0,0413°	0,0370°
n	3	3	3	n	3	3	3
gl	2	2	2	gl	2	2	2
$\alpha$	0,05	0,05	0,05	$\alpha$	0,01	0,01	0,01
$t_{[n-1]}$	1,772	0,116	2,397	$t_{[n-1]}$	-1,768	-7,398	7,182
$t_{[n-1];\alpha}$	4,303	4,303	4,303	$t_{[n-1];\alpha}$	9,925	9,925	9,925
<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>				<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>			
Ho: $\mu = \mu_0$ Ha: $\mu \neq \mu_0$ Rejeita Ho se: $ t_{[n-1]}  > t_{[n-1];\alpha}$ sendo $\mu = \bar{X}$				Ho: $\mu = \mu_0$ Ha: $\mu \neq \mu_0$ Rejeita Ho se: $ t_{[n-1]}  > t_{[n-1];\alpha}$ sendo $\mu = \bar{X}$			
<b>CONCLUSÃO</b>				<b>CONCLUSÃO</b>			
Como $t_{[n-1];\alpha} >  t_{[n-1]} $ , aceita Ho, ou seja, pode-se se afirmar com 95% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CX13A mesurada pelo SMDSL é igual a distorção mesurada pelos instrumentos de medição.				Como $t_{[n-1];\alpha} >  t_{[n-1]} $ , aceita Ho, ou seja, pode-se se afirmar com 99% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CX13B mesurada pelo SMDSL é igual a distorção mesurada pelos instrumentos de medição.			
$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$ 				$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$ 			

TABELA 7.31 - Testes de hipóteses para comparação entre os valores médios de distorção verificados com os instrumentos de medição x SMCDS para os corpos de prova tipo CV2.

TESTE DE HIPÓTESE PARA UMA MÉDIA COM DESVIO PADRÃO DESCONHECIDO E PEQUENA AMOSTRA (n<30)							
CV21	-θx/2	+θx/2	θx	CV22	-θx/2	+θx/2	θx
Inclinômetro digital na mesa desempenho	-2,35°	2,17°	4,52°	Inclinômetro digital na mesa desempenho	-2,15°	2,05°	4,20°
Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-2,28°	1,52°	3,80°	Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-2,18°	1,98°	4,16°
Medição indireta relógio comparador	-2,18°	2,17°	4,35°	Medição indireta relógio comparador	-2,08°	1,93°	4,01°
$\bar{X}$	-2,27°	1,95°	4,22°	$\bar{X}$	-2,14°	1,99°	4,12°
μ0 (SMCDS)	-1,97°	2,31°	4,29°	μ0 (SMCDS)	-4,04°	4,64°	8,68°
S	0,0854°	0,3753°	0,3763°	S	0,0476°	0,0615°	0,0988°
n	3	3	3	n	3	3	3
gl	2	2	2	gl	2	2	2
α	0,02	0,02	0,02	α	0,01	0,01	0,01
$t_{[n-1]}$	-5,994	-1,662	0,296	$t_{[n-1]}$	69,214	-74,860	79,924
$t_{[n-1];\alpha}$	6,965	6,965	6,965	$t_{[n-1];\alpha}$	9,925	9,925	9,925
<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>				<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>			
Ho: μ = μ0    Ha: μ ≠ μ0    Rejeita Ho se: $ t_{[n-1]}  > t_{[n-1];\alpha}$ sendo μ = $\bar{X}$				Ho: μ = μ0    Ha: μ ≠ μ0    Rejeita Ho se: $ t_{[n-1]}  > t_{[n-1];\alpha}$ sendo μ = $\bar{X}$			
<b>CONCLUSÃO</b>				<b>CONCLUSÃO</b>			
Como $t_{[n-1];\alpha} >  t_{[n-1]} $ , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar com 98% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CV21 medida pelo SMDSL é igual a distorção medida pelos instrumentos de medição.				Como $t_{[n-1];\alpha} >  t_{[n-1]} $ , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar com 99% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CV22 medida pelo SMDSL é diferente da distorção medida pelos instrumentos de medição.			
$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$ 				$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$ 			
TESTE DE HIPÓTESE PARA UMA MÉDIA COM DESVIO PADRÃO DESCONHECIDO E PEQUENA AMOSTRA (n<30)							
CV23	-θx/2	+θx/2	θx				
Inclinômetro digital na mesa desempenho	-2,10°	2,08°	4,18°				
Inclinômetro digital na mesa de trabalho	-1,94°	2,12°	4,06°				
Medição indireta relógio comparador	-1,96°	2,10°	4,06°				
$\bar{X}$	-2,00°	2,10°	4,10°				
μ0 (SMCDS)	-1,89°	2,20°	4,10°				
S	0,0886°	0,0200°	0,0705°				
n	3	3	3				
gl	2	2	2				
α	0,01	0,01	0,01				
$t_{[n-1]}$	-2,074	-8,964	0,062				
$t_{[n-1];\alpha}$	9,925	9,925	9,925				
<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>							
Ho: μ = μ0    Ha: μ ≠ μ0    Rejeita Ho se: $ t_{[n-1]}  > t_{[n-1];\alpha}$ sendo μ = $\bar{X}$							
<b>CONCLUSÃO</b>							
Como $t_{[n-1];\alpha} >  t_{[n-1]} $ , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar com 99% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CV23 medida pelo SMDSL é igual a distorção medida pelos instrumentos de medição.							
$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$ 							

A TAB. 7.32 apresentam os cálculos estatísticos para o teste de hipótese de uma média com desvio-padrão desconhecido o CV11. A comparação é realizada entre os valores médios de distorções verificados nos CV12 à CV16 ( $\bar{X}$ ) e o valor médio de distorção verificado no CV11 ( $\mu_0$ ) utilizando os instrumentos de medição. São apresentadas três comparações para cada corpo de prova, sendo duas comparações para as distorções que ocorre em cada lado da peça e terceira comparação para a distorção total do corpo de prova.

TABELA 7.32 - Testes de hipóteses para comparação entre a distorção media do CV11 e valor médio de distorção entre os CV12 à CV16 medidos com os instrumentos medição.

TESTE DE HIPÓTESE PARA UMA MÉDIA COM DESVIO PADRÃO DESCONHECIDO E PEQUENA AMOSTRA (n<30)			
CV11 x (CV12 à CV16)	- $\theta x/2$	+ $\theta x/2$	$\theta x$
CV12	-1,32°	1,19°	2,51°
CV13	-1,18°	1,18°	2,36°
CV14	-1,32°	1,18°	2,50°
CV15	-1,28°	1,18°	2,46°
CV16	-1,71°	0,74°	2,44°
$\bar{X}$	-1,43°	1,04°	2,47°
$\mu_0$ (CV11)	-0,96°	0,98°	1,94°
S	0,2018°	0,2002°	0,0611°
n	5	5	5
gl	4	4	4
$\alpha$	0,01	0,01	0,01
$t_{[n-1]}$	-5,211	0,653	19,351
$t_{[n-1];\alpha}$	4,604	4,604	4,604

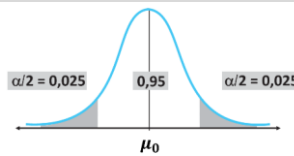
**CONDIÇÃO DE TESTE**

Ho:  $\mu = \mu_0$  Ha:  $\mu \neq \mu_0$  Rejeita Ho se:  $|t_{[n-1]}| > t_{[n-1];\alpha}$  sendo  $\mu = \bar{X}$

**CONCLUSÃO**

Como  $t_{[n-1];\alpha} > |t_{[n-1]}|$ , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar com 98% de confiabilidade que a distorção angular final do CP CV21 medida pelo SMDSL é igual a distorção medida pelos instrumentos de medição.

$$t_{[n-1]} = \frac{(\bar{X} - \mu_0)}{S/\sqrt{n}}$$





As TAB. 7.33 à TAB. 7.35 apresentam os cálculos para os testes de hipóteses entre duas médias considerando amostras independentes e pequenas, com variâncias populacionais desconhecidas e estatisticamente iguais. A comparação é realizada entre o valor médio de distorção final verificado com o SMCDs e o valor médio de distorção final verificado com instrumentos de medição para cada tipo de corpo de prova (CX1, CV1 e CV2).

TABELA 7.33 - Testes de hipóteses para comparação entre o valor médio de distorção final verificado com o SMCDs e o valor médio de distorção verificado com instrumentos de medição - CX1.

TESTE DE HIPÓTES ENTRE DUAS MÉDIAS, AMOSTRAS INDEPENDENTES E PEQUENAS, DESVIO PADRÃO DESCONHECIDO E VARIÂNCIA POPULACIONAL ESTATISTICAMENTE IGUAL							
CP	Instrumetos de medição	SMCDs		CP	SMCDs	Instrumetos de medição	
CX11 A	0,3°	0,4°		CX11 B	0,8°	0,8°	
CX12 A	0,5°	0,5°		CX12 B	1,2°	1,0°	
CX13 A	0,4°	0,4°		CX12 B	1,0°	0,9°	
Teste-F: duas amostras para variâncias				Teste-F: duas amostras para variâncias			
$\bar{X}_n$	0,421252	0,414532		$\bar{X}_n$	1,013858	0,884527	
S <sup>2</sup>	0,012372	0,003164		S <sup>2</sup>	0,034005	0,011878	
n	3	3		n	3	3	
gl	2	2		gl	2	2	
F	3,910409			F	2,862715		
Fc	19,000			Fc	19,000		
CONDIÇÃO DE TESTE				CONDIÇÃO DE TESTE			
Ho : $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ Ha : $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$ Rejeita Ho se: $F > F_c$				Ho : $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ Ha : $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$ Rejeita Ho se: $F > F_c$			
CONCLUSÃO				CONCLUSÃO			
Como $F_c > F$ , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar que as variâncias das amostras são estatisticamente iguais com confiabilidade de 95%				Como $F_c > F$ , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar que as variâncias das amostras são estatisticamente iguais com confiabilidade de 95%			
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes				Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes			
$\bar{X}_n$	0,421252	0,414532		$\bar{X}_n$	1,013858	0,884527	
S <sup>2</sup>	0,012372	0,003164		S <sup>2</sup>	0,034005	0,011878	
n	3	3		n	3	3	
gl	4			gl	4		
ts	0,093383			ts	1,045770		
tc	2,776			tc	2,776		
CONDIÇÃO DE TESTE				CONDIÇÃO DE TESTE			
Ho: $\mu_1 = \mu_2$ Ha: $\mu_1 \neq \mu_2$ Rejeita Ho se: $ ts  > tc$				Ho: $\mu_1 = \mu_2$ Ha: $\mu_1 \neq \mu_2$ Rejeita Ho se: $ ts  > tc$			
CONCLUSÃO				CONCLUSÃO			
Como $tc >  ts $ , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que a média das distorções angulares mesurada pelo SMCDs é igual a média das distorções mesurada pelos instrumentos de medição para o lado A dos CP com 1 junta e chanfro em X.				Como $tc >  ts $ , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que a média das distorções angulares mesurada pelo SMCDs é igual a média das distorções mesurada pelos instrumentos de medição para o lado B dos CP com 1 junta e chanfro em X.			
$t_s = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}} \quad S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$ $gl = v = n_1 + n_2 - 2$				$t_s = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}} \quad S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$ $gl = v = n_1 + n_2 - 2$			

Para o cálculo do valor médio de distorção dos corpos de prova do tipo CV1, não foi considerado o CV11, pois o mesmo foi soldado com diferentes parâmetros de soldagem, portanto, não será considerado uma amostra desta população. Para o cálculo do valor médio de distorção total verificado com o SMCDS para os corpos de prova do tipo CV1, também não foi considerado o CV15 que falhou no teste experimental, portanto estes dois corpos de prova não serão considerados como amostras desta população.

TABELA 7.34 - Testes de hipóteses para comparação entre o valor médio de distorção final verificado com o SMCDS e o valor médio de distorção verificado com instrumentos de medição - CV1.

TESTE DE HIPÓTES ENTRE DUAS MÉDIAS, AMOSTRAS INDEPENDENTES E PEQUENAS, DESVIO PADRÃO DESCONHECIDO E VARIÂNCIA POPULACIONAL ESTATISTICAMENTE IGUAL			
CP	SMCDS	Intrumentos de medição	
CV11	-	-	
CV12	2,5°	2,5°	
CV13	2,5°	2,4°	
CV14	2,6°	2,5°	
CV15	-	2,5°	
CV16	2,4°	2,4°	

Teste-F: duas amostras para variâncias			
$\bar{X}_n$	2,473937	2,456170	
S <sup>2</sup>	0,004666	0,003733	
n	4	5	
gl	3	4	
F	1,249951		
Fc	6,591		

**CONDIÇÃO DE TESTE**

H<sub>0</sub> : σ<sub>1</sub><sup>2</sup> = σ<sub>2</sub><sup>2</sup>    H<sub>a</sub> : σ<sub>1</sub><sup>2</sup> > σ<sub>2</sub><sup>2</sup>    Rejeita H<sub>0</sub> se: F > F<sub>c</sub>

**CONCLUSÃO**

Como F<sub>c</sub> > F, aceita H<sub>0</sub>, ou seja, pode-se afirmar que as variâncias das amostras são estatisticamente iguais com confiabilidade de 95%

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes			
$\bar{X}_n$	2,473937	2,456170	
S <sup>2</sup>	0,004666	0,003733	
n	4	5	
gl	7		
t <sub>s</sub>	-0,411947		
t <sub>c</sub>	2,365		

**CONDIÇÃO DE TESTE**

H<sub>0</sub>: μ<sub>1</sub> = μ<sub>2</sub>    H<sub>a</sub>: μ<sub>1</sub> ≠ μ<sub>2</sub>    Rejeita H<sub>0</sub> se: |t<sub>s</sub>| > t<sub>c</sub>

**CONCLUSÃO**

Como t<sub>c</sub> > |t<sub>s</sub>|, aceita H<sub>0</sub>, ou seja, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que a média das distorções angulares mesurada pelo SMDSL é igual a média das distorções mesurada pelos instrumentos de medição para os CP com 1 junta e chanfro em V.

$$t_s = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}} \quad S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

$gl = v = n_1 + n_2 - 2$

Para o cálculo do valor médio de distorção total verificado com o SMCDS para os corpos de prova do tipo CV2, não foi considerado o CV22 que falhou no teste experimental, portanto este corpo de prova não será considerado como amostra desta população.

TABELA 7.35 - Testes de hipóteses para comparação entre o valor médio de distorção final verificado com o SMCDS e o valor médio de distorção verificado com instrumentos de medição - CV2.

TESTE DE HIPÓTES ENTRE DUAS MÉDIAS, AMOSTRAS INDEPENDENTES E PEQUENAS, DESVIO PADRÃO DESCONHECIDO E VARIÂNCIA POPULACIONAL ESTATISTICAMENTE IGUAL			
CP	SMCDS	Intrumentos de medição	
CV21	4,3°	4,2°	
CV22	-	4,1°	
CV23	4,1°	4,1°	
Teste-F: duas amostras para variâncias			
$\bar{X}_n$	4,191924	4,148138	
S²	0,018350	0,004382	
n	2	3	
gl	1	2	
F	4,187950		
Fc	18,513		
CONDIÇÃO DE TESTE			
Ho : $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ Ha : $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$ Rejeita Ho se: $F > F_c$			
CONCLUSÃO			
Como $F_c > F$ , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar que as variâncias das amostras são estatisticamente iguais com confiabilidade de 95%			
Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes			
$\bar{X}_n$	4,191924	4,148138	
S²	0,018350	0,004382	
n	2	3	
gl	3		
ts	0,504533		
tc	3,182		
CONDIÇÃO DE TESTE			
Ho: $\mu_1 = \mu_2$ Ha: $\mu_1 \neq \mu_2$ Rejeita Ho se: $ ts  > tc$			
CONCLUSÃO			
Como $tc >  ts $ , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que a média das distorções angulares mesurada pelo SMCDS é igual a média das distorções mesurada pelos instrumentos de medição para os CP com 2 juntas e chanfro em V.			
$t_s = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}} \quad S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$			
$gl = v = n_1 + n_2 - 2$			

A TAB. 7.36 apresenta os cálculos para os testes de hipóteses entre duas médias considerando amostras independentes e pequenas, com variâncias populacionais desconhecidas e estatisticamente iguais. Na TAB. 7.36a é realizada a comparação entre os valores médios de distorção verificados com os instrumentos de medição para os corpos de prova CV1 e CV2. Na A TAB. 7.36b é realizada a comparação entre os valores médios de distorção verificados com os instrumentos de medição para os corpos de prova tipo CV1 e CX1.

Para o cálculo do valor médio de distorção os corpos de prova do tipo CV1, não foi considerado o CV11, pois o mesmo apresenta parâmetros de soldagem diferentes, portanto não será considerado amostra desta população.

TABELA 7.36 - Testes de hipóteses para comparação do valor médio de distorção verificado com os instrumentos de medição para os diferentes tipos de corpos de prova: (a) CV1 x CV2; (b) CV1 x CX1B.

TESTE DE HIPÓTES ENTRE DUAS MÉDIAS, AMOSTRAS INDEPENDENTES E PEQUENAS, DESVIO PADRÃO DESCONHECIDO E VARIÂNCIA POPULACIONAL ESTATISTICAMENTE IGUAIS							
(a)	CV2	CV1		(b)	CX1 B	CV1	
1	4,2°			1	0,8°		
2	4,1°	2,5°		2	1,0°	2,5°	
3	4,1°	2,4°		3	0,9°	2,4°	
4		2,5°		4		2,5°	
5		2,5°		5		2,5°	
6		2,4°		6		2,4°	
<b>Teste-F: duas amostras para variâncias</b>				<b>Teste-F: duas amostras para variâncias</b>			
$\bar{X}_n$	4,148138	2,456170		$\bar{X}_n$	0,884527	2,456170	
S²	0,004382	0,003733		S²	0,011878	0,003733	
n	3	5		n	3	5	
gl	2	4		gl	2	4	
F	1,173685			F	3,181744		
Fc	6,944			Fc	6,944		
<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>				<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>			
Ho : $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ Ha : $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$ Rejeita Ho se: F > Fc				Ho : $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ Ha : $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$ Rejeita Ho se: F > Fc			
<b>CONCLUSÃO</b>				<b>CONCLUSÃO</b>			
Como Fc > F, aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar que as variâncias das amostras são estatisticamente iguais com confiabilidade de 95%				Como Fc > F, aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar que as variâncias das amostras são estatisticamente iguais com confiabilidade de 95%			
<b>Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes</b>				<b>Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes</b>			
$\bar{X}_n$	4,148138	2,456170		$\bar{X}_n$	0,884527	2,456170	
S²	0,004382	0,003733		S²	0,011878	0,003733	
n	3	5		n	3	5	
gl	6			gl	6		
ts	36,865883			ts	-26,799726		
tc	3,707			tc	3,707		
<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>				<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>			
Ho: $\mu_1 = \mu_2$ Ha: $\mu_1 \neq \mu_2$ Rejeita Ho se:  ts  > tc				Ho: $\mu_1 = \mu_2$ Ha: $\mu_1 \neq \mu_2$ Rejeita Ho se:  ts  > tc			
<b>CONCLUSÃO</b>				<b>CONCLUSÃO</b>			
Como tc >  ts , aceita Ho, ou seja, pode-se afirmar com 99% de confiabilidade que a média das distorções angulares dos CP com uma junta em V é diferente dos CP com duas juntas em V				Como tc >  ts , rejeita Ho, ou seja, pode-se afirmar com 99% de confiabilidade que a média das distorções angulares dos CP com uma junta em V é diferente dos CP com uma junta X.			
$t_s = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}}$ $S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$ $gl = v = n_1 + n_2 - 2$				$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}}$ $S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$ $gl = v = n_1 + n_2 - 2$			