

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

**“ESTUDO DE SEQUÊNCIAS DE SOLDAGEM PARA
REDUÇÃO E ELIMINAÇÃO DE DISTORÇÕES”**

AUTOR: ENG^o. HÉLIO COELHO GUIMARÃES SOARES

ORIENTADOR: PROF. ALEXANDRE QUEIROZ BRACARENSE, PhD

Belo Horizonte, 31 de agosto de 2006

HÉLIO COELHO GUIMARÃES SOARES

**“ESTUDO DE SEQUÊNCIAS DE SOLDAGEM PARA
REDUÇÃO E ELIMINAÇÃO DE DISTORÇÕES”**

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. Alexandre Q. Bracarense, PhD. - UFMG

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2006

FOLHA DE APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida;

Ao meu pai Hélio e minha mãe Graça, pelo imensurável amor;

Às minhas irmãs Graciella, Gabriella e Luciene pelo carinho;

Ao meu avô pelas palavras de apoio;

À Evelyne pela dedicação e compreensão em todos os momentos;

À Quero pelo carinho;

Aos meus amigos Carol, Sérgio Guedes, Léo Horta pela companhia;

Ao Professor Bracarense pelos ensinamentos e confiança;

À diretoria e funcionários da empresa TBM Máquinas e Equipamentos pela oportunidade;

Meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE EQUAÇÕES	X
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIATURAS	XI
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVO	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 Seqüência de soldagem.....	18
3.2 Distorções	24
3.2.1 Tipos de distorções.....	30
3.2.2 Controle da distorção	33
3.3 Distribuição de calor.....	34
3.4 Processo GMAW (Gas Metal Arc Welding).....	38
3.5 Dispositivos de fixação e posicionadores.....	39
4 METODOLOGIA	45
4.1 Descrição dos subconjuntos da caçamba e da seqüência de soldagem	48
4.1.1 Subconjunto 01 – SC01.....	48
4.1.2 Subconjunto 02 – SC02.....	50
4.1.3 Subconjunto 03 – SC03.....	51
4.1.4 Subconjunto 04 – SC04.....	52
4.1.5 Subconjunto 05 – SC05.....	53
4.1.6 Subconjunto 06 – SC06.....	54
4.1.7 Subconjunto 07 – SC07.....	55
4.1.8 Subconjunto 08 – SC08.....	56
4.1.9 Subconjunto 09 – SC09.....	57

4.1.10	Subconjunto 10 – SC10	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1	Descrição da montagem e soldagem dos subconjuntos da caçamba.....	63
5.1.1	Subconjunto 01 – SC01.....	63
5.1.2	Subconjunto 02 – SC02.....	66
5.1.3	Subconjunto 03 – SC03.....	67
5.1.4	Subconjunto 04 – SC04.....	69
5.1.5	Subconjunto 05 – SC05.....	72
5.1.6	Subconjunto 06 – SC06.....	75
5.1.7	Subconjunto 07 – SC07.....	78
5.1.8	Subconjunto 08 e 09 – SC08 e SC09	79
5.1.9	Subconjunto 10 – SC10.....	84
6	CONCLUSÕES	88
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
	ANEXOS.....	95

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: Soldagem com passe-a-ré (AWS, 2001).....	20
FIGURA 3.2: Soldagem intercalada (AWS, 2001).	20
FIGURA 3.3: Seqüência de soldagem de topo (a) passe simples e (b) resultados (Teng et al., 2003, modificada)	21
FIGURA 3.4: (a) Soldagem de topo multi-passes (b) resultados (Teng et al., 2003, modificada).	22
FIGURA 3.5: (a) Soldagem circular e (b) resultados (Teng et al., 2003, modificada).	23
FIGURA 3.6: Distorção em função do tempo de aquecimento e resfriamento (Modenesi, 2001)	24
FIGURA 3.7: Diagrama Tensão-deformação (AWS - Welding Handbook; 1987 - adaptado).....	25
FIGURA 3.8: Posicionamento pela pré-visualização da distorção (Modenesi, 2001 - adaptado)	27
FIGURA 3.9: montagem pré-tensionada de uma junta em “T” (Bohn, modificado).....	27
FIGURA 3.10: Mudanças nas propriedades do aço com o aumento de temperatura durante o ciclo de soldagem (Welding Journal, 2001 - adaptado).....	28
FIGURA 3.11: Contração transversal (Modenesi, 2001 - modificada).....	31
FIGURA 3.12: Contração longitudinal (Modenesi, 2001 - modificada).....	31
FIGURA 3.13: Contração angular (Modenesi, 2001 - modificada).....	32
FIGURA 3.14: Ciclo térmico durante a soldagem (Modenesi, 2001).....	35
FIGURA 3.15: Fluxo de calor em juntas (a) em ângulo e (b) de topo (Modenesi, 2001 - adaptado).....	36
FIGURA 3.16: Processo básico de soldagem GMAW.	38
FIGURA 3.17: dispositivo de fixação para soldagem da parte de uma aeronave	40
FIGURA 3.18: utilização correta do “cachorro” e cunha (TBM - cortesia).....	41
FIGURA 3.19: dispositivos de fixação de montagem da viga (a) incorreto e (b) correto (TBM - cortesia)	42
FIGURA 3.20: posicionador com 1 grau de liberdade (rotação da placa na vertical) (TBM - cortesia).....	43
FIGURA 3.21: posicionador com 2 graus de liberdade (TBM - cortesia)	43
FIGURA 3.22: viga com fixação móvel no posicionador para soldagem (TBM - cortesia)....	44

FIGURA 4.1: Conjunto montado, desenhado em 3D.....	45
FIGURA 4.2: Vista explodida do conjunto completo.	48
FIGURA 4.3: Vista explodida do subconjunto 01 - SC01.	49
FIGURA 4.4: Subconjunto SC01	49
FIGURA 4.5: Vista explodida do subconjunto 02 - SC02.	50
FIGURA 4.6: Subconjunto SC02.	50
FIGURA 4.7: Vista explodida do subconjunto 03 - SC03.	51
FIGURA 4.8: Subconjunto SC03.	51
FIGURA 4.9: Vista explodida do subconjunto 04 - SC04.	52
FIGURA 4.10: Subconjunto SC04.	52
FIGURA 4.11: Vista explodida do subconjunto 05 - SC05.	53
FIGURA 4.12: Subconjunto SC05.	53
FIGURA 4.13: Vista explodida do subconjunto 06 - SC06.	54
FIGURA 4.14: Subconjunto SC06.	54
FIGURA 4.15: Vista explodida do subconjunto 07 - SC07.	55
FIGURA 4.16: Subconjunto SC07.	55
FIGURA 4.17: Vista explodida do subconjunto 08 – SC08.	56
FIGURA 4.18: Subconjunto SC08.	56
FIGURA 4.19: Vista explodida do subconjunto 09 – SC09.	57
FIGURA 4.20: Subconjunto SC09.	57
FIGURA 4.21: Vista explodida do subconjunto 10 – SC10.	58
FIGURA 4.22: Subconjunto SC10.	58
FIGURA 4.23: Verificação de empeno pós-soldagem (a) na borda (b) na lateral.	59
FIGURA 4.24: Verificação das dimensões (a) da abertura do bojo e (b) espaçamento entre alças.	60
FIGURA 5.1: Dispositivo para montagem e soldagem do SC01.....	63
FIGURA 5.2: Sequência de soldagem do SC01.....	64

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – Relação dos itens e seus respectivos materiais, CEq e temperatura de pré-aquecimento.	46
TABELA 5.1 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC01.	63
TABELA 5.2 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC02.	67
TABELA 5.3 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC03.	67
TABELA 5.4 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC04.	70
TABELA 5.5 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC05.	72
TABELA 5.6 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC06.	77
TABELA 5.7 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC07.	79
TABELA 5.8 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC09.	80
TABELA 5.9 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC08.	82
TABELA 5.10 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC10.	85

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1	29
Equação 3.2	37
Equação 3.3	37

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIATURAS

E	- Energia de soldagem ou aporte de calor ou heat input [kJ/mm];
η	- Eficiência do processo de soldagem (adimensional);
V	- Tensão do arco elétrico [Volts, V];
I	- Corrente elétrica de soldagem [Ampéres, A];
v	- Velocidade linear de avanço de soldagem [mm/s];
ZTA	- Zona termicamente afetada (adimensional);
T_p	- Temperatura de pico no ciclo térmico de soldagem [°C];
T_c	- Temperatura crítica no ciclo térmico de soldagem [°C];
t_p	- Tempo de permanência [segundos, s];
$\left(\frac{dT}{dt}\right)_T$	- Taxa de resfriamento, tempo necessário para um determinado ponto refriar de uma temperatura T_1 a outra T_2 [s];
CEq	- Carbono equivalente [%];
T_{pr}	- Temperatura de pré-aquecimento [°C];
e	- espessura [mm];
%C	- Concentração de carbono em uma liga metálica [%];
%Mn	- Concentração de manganês em uma liga metálica [%];
%Ni	- Concentração de níquel em uma liga metálica [%];
%Cu	- Concentração de cobre em uma liga metálica [%];
%Cr	- Concentração de cromo em uma liga metálica [%];
%Mo	- Concentração de molibdênio em uma liga metálica [%];
%V	- Concentração de vanádio em uma liga metálica [%];
CO ₂	- Dióxido de carbono ou gás carbônico;
Ar	- Argônio, gás;
Software 3D	- Programa de desenho tridimensional;
GMAW	- <i>Gas Metal Arc Welding</i> ou Processo de soldagem a arco elétrico protegido;
UFMG	- Universidade Federal de Minas Gerais;
ABS	- Associação Brasileira de Soldagem;
AWS	- <i>American Welding Society</i> ou Sociedade Americana de Soldagem;
IIW	- <i>International Institute of Welding</i> ou Instituto Internacional de Soldagem.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta para o estudo e especificação de seqüências soldagem para redução e eliminação de distorções provocadas pelo processo. Isto se deve à necessidade de melhorar a produtividade e a qualidade com redução de custos, de forma a ampliar a margem de lucro e a capacidade em atender a demanda de mercado. Durante o processo de soldagem, a estrutura do metal gera distorção em algumas áreas devido à brusca variação de temperatura. As contrações do cordão de solda, durante o resfriamento após a soldagem, produzem tensões internas. Deste modo, o componente sofrerá variações dimensionais resultantes do alívio destas tensões. É difícil garantir as tolerâncias dimensionais, como também a ausência de tensões residuais que poderão reduzir a resistência mecânica. Uma maneira de solucionar esse problema é o estudo da seqüência de soldagem. Para garantir as características dimensionais e funcionais, são realizadas pesquisas para especificar seqüências ótimas de soldagem. Neste trabalho foi desenvolvido uma metodologia de estudo para desenvolvimento e implantação de uma seqüência de soldagem para a fabricação de um modelo de caçamba, produzida pela empresa TBM, através da avaliação da geometria das suas partes, dividindo-a em subconjuntos, reduzindo a concentração de calor para obter melhor controle das distorções. Foram utilizados e desenvolvidos dispositivos de fixação e posicionamento, para facilitar o manuseio e garantir a repetibilidade do processo de fabricação. Todos os esforços na melhoria do processo possibilitarão no futuro a mecanização e utilização de robôs para esse fim.

ABSTRACT

This work presents a study for specification of welding sequences to reduce and eliminate distortions due the process. It's the necessity to improve the productivity and the quality with costs reduction, extending the profit and the capacity to take care of the market demand. During the welding process, the structure of the metal generates distortion in some areas due to brusque variation of temperature. The weld bead shrinkages, during the cooling after the welding produces internal tensioning. In this way, the component will suffer resultant dimensional variations from the relief of these tensions. Such that, it is difficult to guarantee the dimensional tolerances, as well as the presence of residual stresses that will reduce the mechanics resistance. To solve this problem study of the welding sequence is necessary. To guarantee the dimensional and functional characteristics, research have being carried out to specify excellent sequences of welding. In this work a methodology it was developed to development and implement a welding sequence a dump-cart manufacturer, called TBM, through the evaluation of the geometry of its parts, dividing it in subgroups, reducing the concentration of heat to get better control of the distortions. Devices of setting and positioning have been developed, aiming to facilitate the movement during the welding and to guarantee the repeatability of the manufacture process. All the efforts in the improvement of the process will make possible the mechanization and use of robots in the future.

1 INTRODUÇÃO

No cenário industrial atual, é clara a necessidade do desenvolvimento e implantação de novas tecnologias que visam melhorar a produtividade com redução de custos, ampliando a margem de lucro e a capacidade de atender a demanda de mercado. Para isso, essa nova tecnologia deve garantir a qualidade e integridade funcional do produto, bem como atender as exigências dos seus consumidores.

A TBM, empresa reconhecida no mercado de materiais e equipamentos resistentes ao desgaste, tem implantado novos conceitos por visualizar essa necessidade de melhorar e se manter competitiva não só em termos financeiros, mas também, na manutenção da sua credibilidade para com seus clientes. Diante dessa realidade, tem investido em pesquisas para vencer as dificuldades e proporcionar novas possibilidades e recursos inovadores.

A empresa tem como objetivo principal a fabricação de caçambas para máquinas de extração de minério e afins. Tais equipamentos são expostos a condições severas de esforços de compressão e desgaste, devendo ter em sua estrutura a garantia de suportar e manter suas características mecânicas por um tempo viável de aplicação satisfatória ao seu usuário.

Porém, para garantir estas características, são necessários um planejamento e acompanhamento do processo de fabricação. Ou seja, o processo de fabricação deve ser bem estudado, evitando os problemas intermediários que venham a prejudicar o tempo da mesma, provocando retrabalho, aumentando os custos e desfavorecendo a relação fornecedor cliente.

Essas caçambas são fabricadas por processos de corte, conformação e soldagem GMAW manual. Todos esses processos influenciam muito na qualidade do produto final e, cada um com sua particularidade, deve ser estudado para desenvolver um controle dos seus parâmetros que facilitem e eliminem os problemas intermediários.

As caçambas fabricadas pela TBM eram montadas e soldadas de acordo com os projetos das mesmas e a experiência do montador e soldador, porém não há um procedimento detalhado dos passos para se alcançar maior produtividade e qualidade final. Desta forma, ao final do

processo, as caçambas apresentam não-conformidades dimensionais e de forma e devem ser corrigidas posteriormente.

Os problemas atualmente encontrados, relacionados ao processo de soldagem são: alto grau de distorções, descontinuidades estruturais (trincas), acabamento superficial, uso inadequado de dispositivos de fixação, controle de parâmetros, retrabalho, etc.

Durante o processo de soldagem, a estrutura do metal gera distorção em algumas áreas devido à brusca mudança de temperatura. As contrações do cordão de solda durante o resfriamento após a soldagem produzem tensões térmicas. Deste modo, a peça sofrerá variações dimensionais resultantes do alívio destas tensões. É difícil garantir as tolerâncias dimensionais, como também a presença de tensões residuais que reduzirão a resistência mecânica (AWS, 1987). Portanto, é muito importante tentar reduzir e até eliminar estas tensões. Uma forma de solucionar esse problema é o estudo da seqüência de soldagem.

Os métodos corretivos utilizados são os desempenos localizados por aquecimento e aplicação de carga nas partes não-conformes, que também não tem um procedimento específico. Estes processos geram mais tempo de trabalho e alteram as características e propriedades do material constituinte. Sendo assim, a empresa não tem garantia da repetibilidade do seu processo e produto, o que prejudica a produtividade e a qualidade final.

Para garantir as características dimensionais e funcionais, vêm sendo realizadas pesquisas, entre o Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação e a TBM Máquinas e Equipamentos LTDA, para especificar seqüências ótimas de soldagem. Esta pesquisa foi aplicada a um modelo de caçamba fabricada pela TBM, a qual cedeu suas instalações e recursos para o desenvolvimento desse estudo e vem investindo no entendimento do assunto.

Este documento descreve parte dessa pesquisa. No Capítulo 2 é apresentado o objetivo, no Capítulo 3 é apresentada a Revisão Bibliográfica sobre os assuntos pertinentes que deram subsídios a elaboração e ao desenvolvimento do trabalho, no Capítulo 4 é apresentada a Metodologia para o desenvolvimento das seqüências de soldagem e procedimentos complementares para redução das distorções, no Capítulo 5 são apresentados os Resultados e Discussões da aplicação das seqüências desenvolvidas, no Capítulo 6 são apresentadas as Conclusões de acordo com os resultados encontrados, no Capítulo 7 são feitas propostas para

trabalhos futuros considerando melhorias no processo e no Capítulo 8 são listadas as Referências Bibliográficas que serviram de embasamento científico para o desenvolvimento dessa pesquisa.

2 OBJETIVO

Para se obter o resultado desejado do produto final, o processo de fabricação deve ser executado de forma a eliminar os problemas intermediários, a partir de um procedimento específico para cada processo.

O objetivo deste trabalho é determinar uma metodologia de estudo e desenvolvimento de uma seqüência de soldagem para a fabricação de um modelo de caçamba¹ escavadeira, a fim de controlar as distorções em conjuntos soldados pelo processo GMAW, aumentar a confiabilidade e a repetibilidade das soldas efetuadas, otimizar o processo de fabricação e garantir assim, uma melhor programação no tempo de execução das mesmas.

Também está incluso o desenvolvimento de dispositivos de fixação e posicionamento, para facilitar o manuseio e garantir a repetibilidade do processo de fabricação, o que possibilitará no futuro, a mecanização e a utilização de robôs.

¹ O modelo da caçamba não será divulgado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A soldagem é considerada como um processo de união e deposição de material, para construção e/ou recuperação de estruturas e equipamentos.

Para a finalidade da solda ser alcançada, alguns recursos físicos e/ou metalúrgicos são necessários, como elevar a pressão e/ou o aquecimento até a fusão da junta a ser unida.

No processo de soldagem por fusão, a junta a ser soldada sofre um brusco aumento de temperatura pela formação de um arco elétrico entre a peça e o eletrodo, devido à alimentação por energia elétrica do equipamento de soldagem. Esse aumento de temperatura é dissipado pela peça e provoca alterações na estrutura interna e externa da mesma, inclusive de forma prejudicial. Dentre estas alterações, pode-se citar as tensões internas, distorções, alteração da microestrutura e outros.

Estas alterações podem e devem ser eliminadas ou evitadas. Vários pesquisadores estudam metodologias para prever e prevenir tais problemas, embora nem sempre aplicáveis a toda e qualquer situação.

3.1 Seqüência de soldagem

Na soldagem a arco elétrico, o aquecimento é localizado e a temperatura não é distribuída uniformemente e alterações estruturais e metalúrgicas ocorrem ao longo da junta durante o processo. O metal de solda e a zona afetada pelo calor adjacente ao cordão de solda estão a temperatura acima da temperatura do metal de base, não afetado pelo calor. Quando a peça solidifica e contrai, provoca tensões que podem gerar distorções quando a estrutura está livre ou tensões residuais quando a estrutura é restringida por algum elemento de fixação (AWS, 1987).

É usual determinar o procedimento de soldagem por requisitos de produtividade e qualidade do que pela necessidade de controlar distorções. Entretanto, o processo de soldagem, a técnica e a seqüência influenciam o nível de distorção (Lucas, 1998).

Uma seqüência de soldagem bem planejada envolve a distribuição do metal de solda em diferentes pontos da montagem de modo que a estrutura contraia em um ponto, se contrapondo às forças de contração da solda já realizada. Um exemplo é soldar alternadamente em ambos os lados do eixo neutro de uma junta de topo com chanfro em “X”. A idéia é balancear as contrações através da seqüência dos passes para provocar a interação destas (AWS, out/2001 e FBTS, 2000).

As regras gerais para evitar a distorção são (Lucas, 1998):

- manter o cordão de solda (filete) com o menor volume possível;
- balancear a soldagem em torno do eixo neutro;
- restringir os movimentos da peça devido ao aporte de calor;
- minimizar o tempo entre passes.

A seqüência de soldagem sugere a utilização das tensões térmicas geradas durante o processo para provocar o efeito desejado. Por meio do balanceamento das tensões, a estrutura sofre menores conseqüências devido à compensação de esforços já alcançados, sem a necessidade de correção por métodos posteriores à conclusão da solda. Sendo assim, a sua utilização provê um resultado satisfatório mesmo quando não é possível resolver o problema só pela seqüência e necessitar de recursos extras como dispositivos de fixação.

A seqüência de soldagem deve ser realizada de forma a dividir o cordão de solda em segmentos e deve ser dirigido de dentro para fora, ou à extremidade livre da junta e, na medida do possível, alternar e intercalar a direção dos segmentos, por meio de técnicas como passe-a-ré ou de passes intercalados.

A soldagem com passe-a-ré envolve a deposição de pequenos comprimentos de solda adjacentes na direção oposta a progressão geral, como indicado na FIG. 3.1.

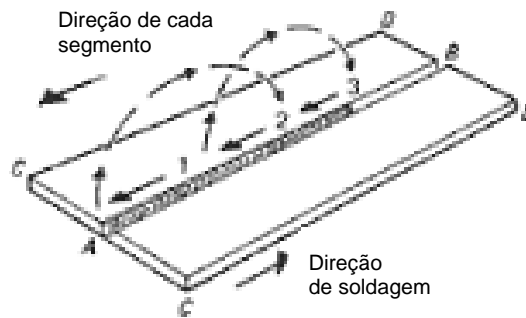


FIGURA 3.1: Soldagem com passe-a-ré (AWS, 2001).

Já a soldagem intercalada consiste em depositar pequenos comprimentos de solda em uma seqüência pré-determinada, espaçada, de forma equilibrada ao longo do cordão de solda, como indicado na FIG. 3.2. Os comprimentos de solda e os espaços entre eles são, de maneira geral, iguais ao comprimento fundido de um eletrodo (LUCAS, 1998).

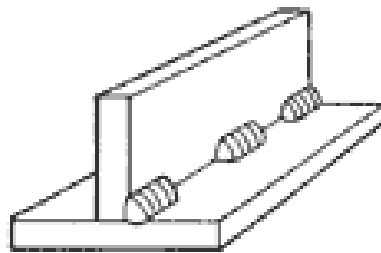


FIGURA 3.2: Soldagem intercalada (AWS, 2001).

Teng et al. (2003), descreveram o efeito da seqüência de soldagem nas tensões residuais, através de análise por elementos finitos, para três casos típicos: soldagem de topo passe simples, soldagem de topo multi-passes e soldagem circular. A numeração representa a ordem dos passes.

A soldagem de topo passe simples foi realizada de três formas: progressiva, passe-a-ré e simétrica, apresentado na FIG. 3.3a. Dentre estas, a soldagem simétrica obteve o melhor resultado, com a menor tensão residual longitudinal, conforme apresentado na FIG. 3.3b.

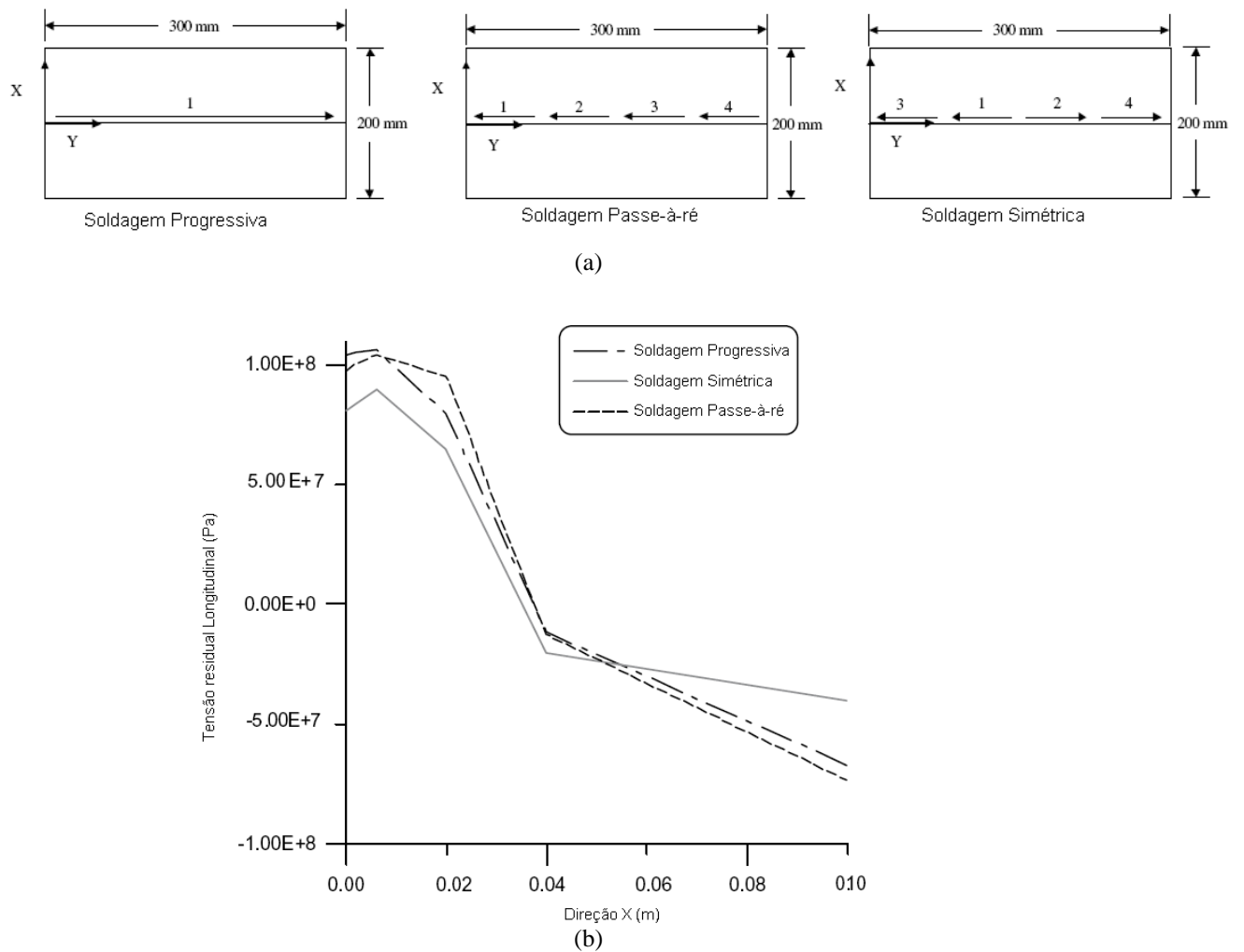


FIGURA 3.3: Sequência de soldagem de topo (a) passe simples e (b) resultados (Teng et al., 2003, modificada)

Ao realizar a solda simetricamente, obtém-se a distribuição de calor homogênea de forma a controlar o resfriamento nas regiões inicialmente aquecidas. Com isso, estas regiões têm o processo de contração retardado, o que garante posteriormente a contração mais controlada de todo o corpo em resfriamento.

A soldagem de topo multi-passes também foi realizada de três formas, demonstradas na FIG. 3.4a. Dentre estas, o caso A obteve o melhor resultado, com a menor tensão residual transversal, conforme a FIG. 3.4b.

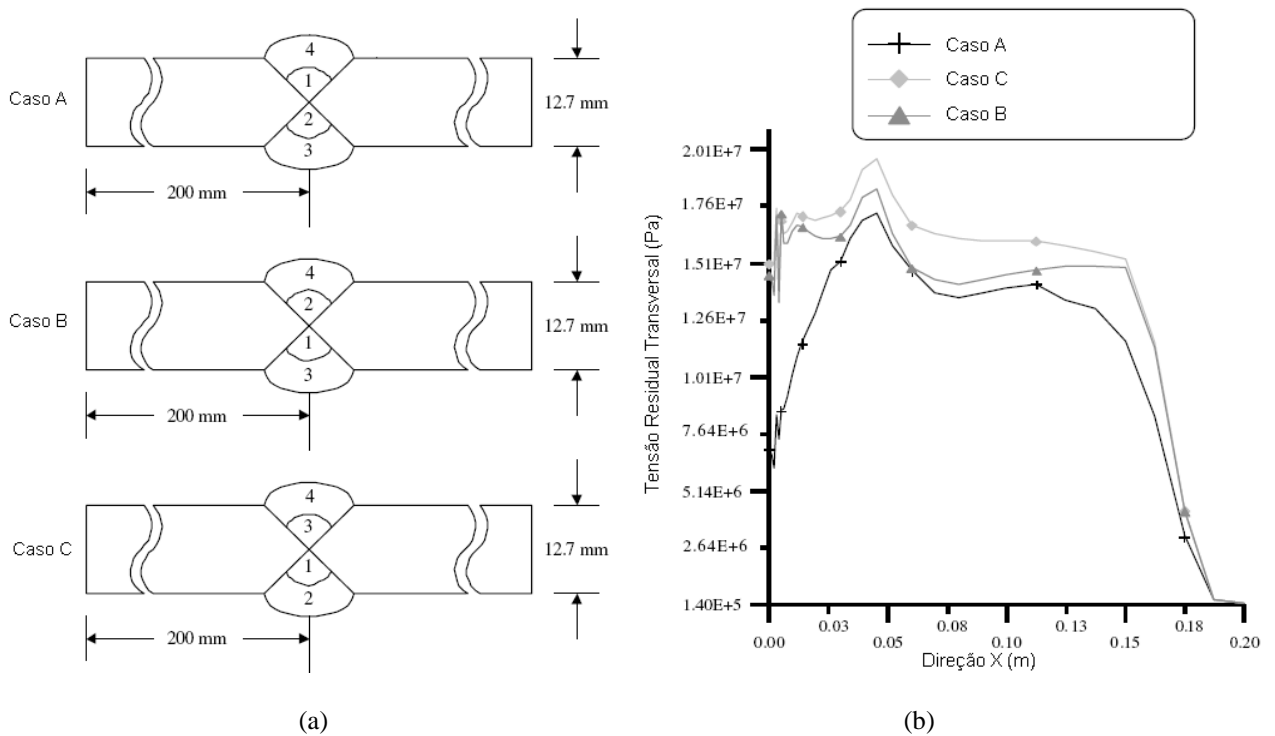


FIGURA 3.4: (a) Soldagem de topo multi-passes (b) resultados (Teng et al., 2003, modificada).

Neste caso o equilíbrio na distribuição de passes, favorece a menor geração de tensões ao longo da soldagem por reduzir as contrações e funcionar como um tratamento térmico de pré-aquecimento e pós-aquecimento, ao distribuir calor em ambos os lados.

A soldagem circular também foi realizada por Teng et al. de três formas, como apresentada na FIG. 3.5a. Dentre estas, a soldagem de passe-a-ré obteve o melhor resultado, com a menor tensão residual radial, identificada na comparação entre os três casos apresentado na FIG. 3.5b.

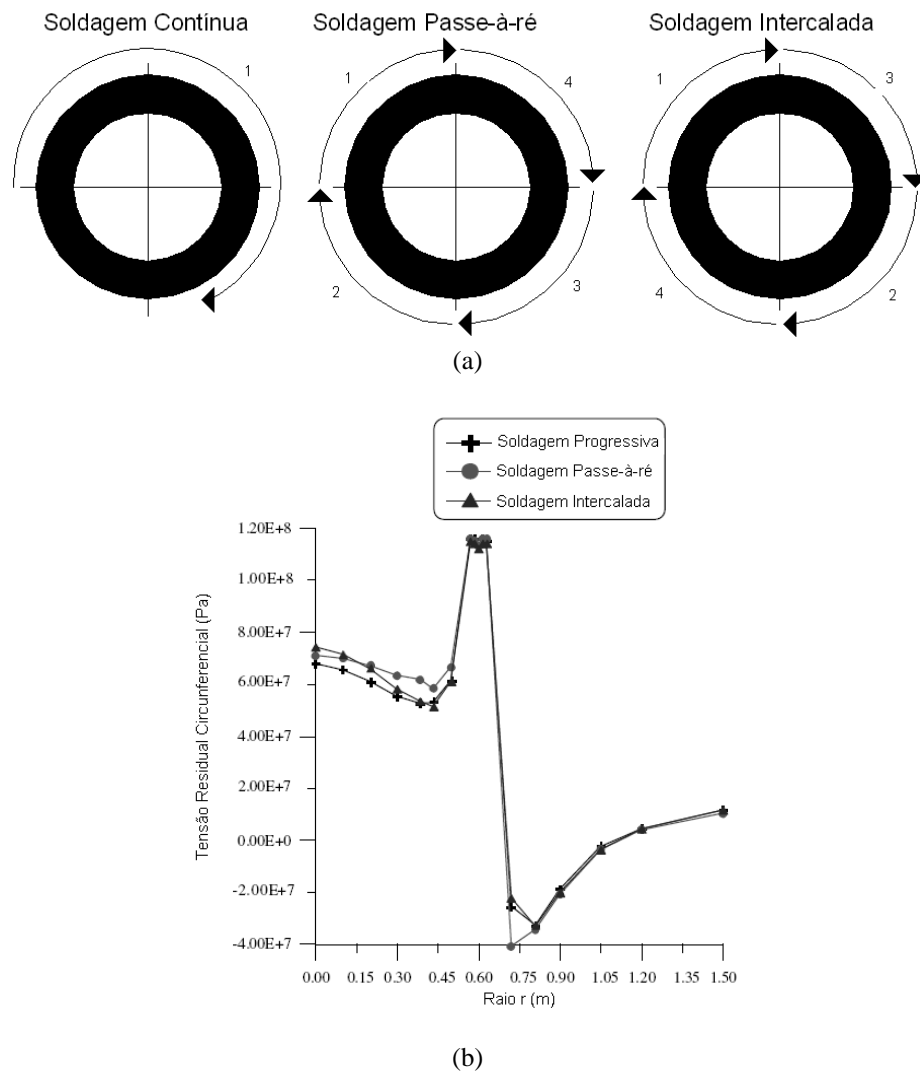


FIGURA 3.5: (a) Soldagem circular e (b) resultados (Teng et al., 2003, modificada).

Nestas condições, é esperado que a seqüência atue como um fator de distribuição de calor, inclusive, para realizar o pós-aquecimento dos passes anteriores. Então, a tensão radial causada é minimizada pelo equilíbrio de aquecimento aplicado.

Além desses resultados, Teng et al. (2003), também concluíram que mais espaços livres deveriam ser disponibilizados para a expansão e contração da estrutura durante a soldagem para prevenir o enrijecimento do cordão de solda e, conseqüentemente, geração da tensão residual.

A seqüência da soldagem é importante e deve ser dirigida à extremidade livre da junta, para que a contração ocorra livremente sem provocar tensões residuais (Rogana, 1999). A

limitação quanto a geometria e espaços livres para a expansão do fluxo de calor, demandam a utilização de dispositivos de fixação para evitar a distorção excessiva e, portanto, deformação definitiva.

Kadivar et al (2000), desenvolveram um algoritmo genético para otimizar a seqüência de soldagem a partir de um modelo termomecânico, que prediz as tensões residuais e distorções ocorridas em chapas finas e obteve as seguintes conclusões:

- a seqüência de soldagem tem um efeito considerável na distorção de soldagens. A distorção pode ser reduzida ao usar uma seqüência ótima.
- A seqüência ótima de soldagem depende da geometria e dos tipos de restrições encontradas na estrutura.
- A seqüência de soldagem tem pouco efeito na tensão residual máxima e afeta, principalmente, a distorção.

3.2 Distorções

A distorção é uma alteração de forma e dimensões que componentes soldados sofrem como resultado do movimento de material que ocorre em função das tensões térmicas desenvolvidas durante o processo de soldagem. A distorção final de um componente soldado é sempre oposta e, em geral, da mesma ordem de grandeza do movimento de material que ocorre durante a soldagem, conforme é ilustrado na FIG. 3.6 (Modenesi, 2001).

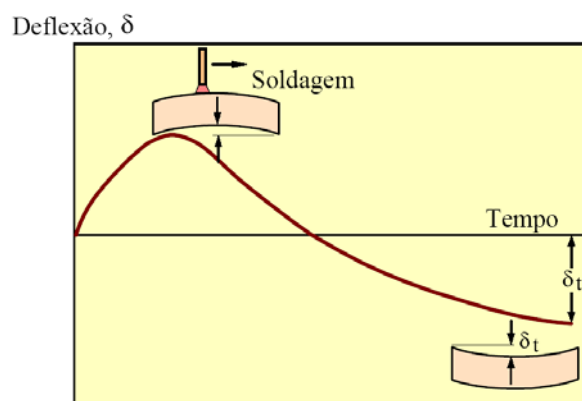


FIGURA 3.6: Distorção em função do tempo de aquecimento e resfriamento (Modenesi, 2001)

A distorção na soldagem resulta da expansão e contração do metal de solda e de base durante o ciclo térmico (aquecimento e resfriamento) do processo de soldagem. Durante o aquecimento e resfriamento, vários fatores influenciam as contrações do metal e causam a distorção, bem como alteram as propriedades físicas e mecânicas com o aporte de calor aplicado. Estas alterações afetam inclusive o fluxo e a uniformidade da distribuição de calor, sendo esta última a causa mais importante para a deformação durante a soldagem (FBTS, 2001).

A soldagem ocasiona um alto aquecimento localizado dos metais a serem unidos e a distribuição de temperatura não é uniforme. De maneira geral, o metal de solda e a ZTA estão a temperaturas acima do metal de base não afetado. Durante o resfriamento, a poça de fusão contrai e solidifica, gerando tensões ao redor do cordão de solda e da ZTA. Se as tensões (δ) produzidas pela expansão térmica e contração excederem o limite de escoamento do metal base, ocorrem deformações (ϵ) plásticas localizadas, que podem ser analisadas no diagrama tensão-deformação, apresentado na FIG. 3.7. A deformação plástica resulta em mudanças nos componentes dimensionais e distorce a estrutura definitivamente. Se um componente for aquecido e resfriado de maneira uniforme, a distorção será minimizada (AWS, 1997).

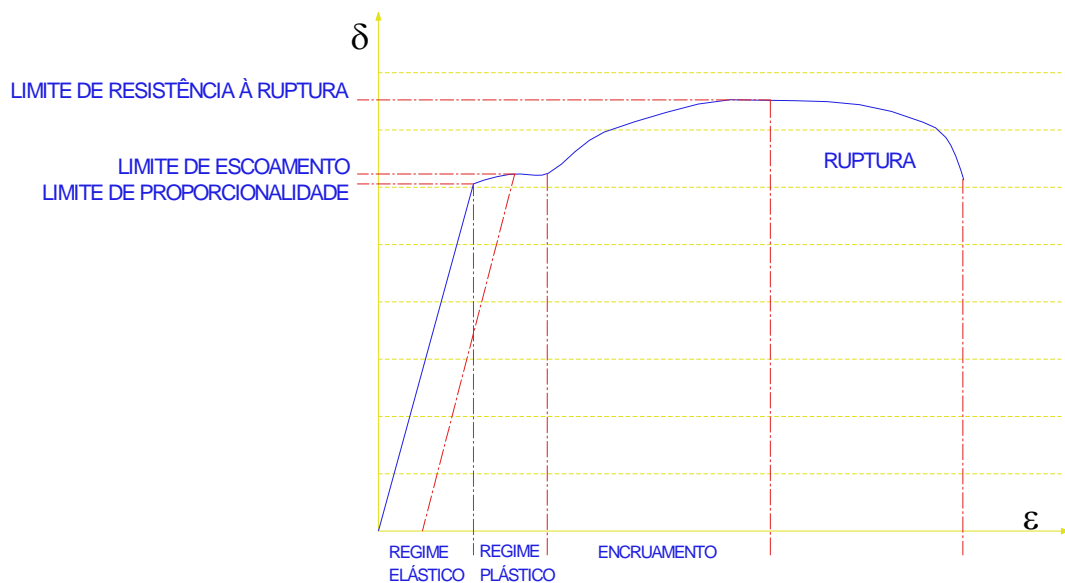


FIGURA 3.7: Diagrama Tensão-deformação (AWS - Welding Handbook; 1987 - adaptado)

Os fatores que afetam a distorção são:

- grau de restrição;
- projeto da junta;
- procedimento de montagem;
- procedimento de soldagem;
- propriedades do metal base;
- energia de soldagem;
- tensões internas;
- seqüência de soldagem.

Estes fatores são estudados por vários pesquisadores para reduzir as conseqüências negativas do processo de soldagem, baseados no tipo de junta, procedimento de montagem e pré-deformação elástica.

A restrição pode ser usada para minimizar a distorção. Os componentes soldados sem restrição externa estão livres para deslocarem-se ou distorcerem em resposta às tensões de soldagem. É comum fixar ou restringir os componentes a serem soldados de maneira a impedir o movimento e a distorção. Esta restrição causa tensões residuais elevadas nos componentes.

Se duas chapas estiverem restringidas às suas possibilidades de deformação, o nível de tensões internas se elevaria, havendo escoamento do cordão de solda no final e a peça se acomodaria na temperatura ambiente com um pequeno grau de deformação. Ou seja, quanto maior o grau de restrição, maior o nível de tensões internas, menor a possibilidade de deformação, porém é maior a possibilidade de aparecimento de trincas (Masubuchi, 1980).

Ao especificar um tipo de junta deve ser considerado o menor número de partes e o menor volume de solda possível, de maneira a reduzir a quantidade de cordões de solda, conseqüentemente, menor quantidade de calor aplicado.

Por meio da pré-visualização da distorção, pode-se utilizar na montagem a disposição das peças de forma a compensar o movimento de distorção pós-soldagem, como apresentado na FIG. 3.8. Ou seja, uma vez que se tenha o conhecimento do tipo de distorção que pode ocorrer, o pré-posicionamento das peças de forma inversa, garante que com a soldagem, as

tensões atuantes, sejam aliviadas por falta de restrições. Este método é mais prático a ser utilizado em montagens simples e pode ser melhor aproveitado em submontagens, até formar o conjunto final (Michaleris e DeBiccari, 1997).

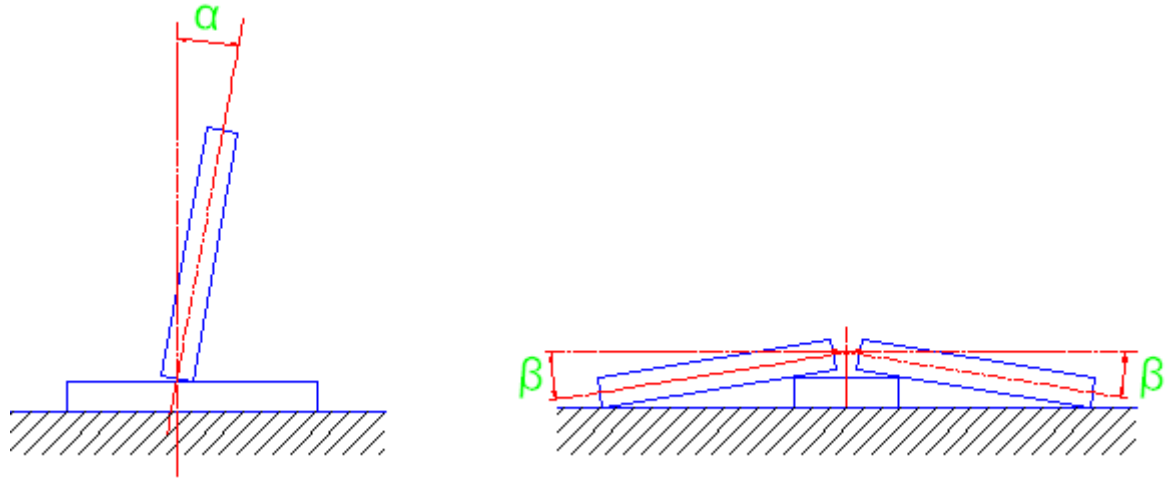


FIGURA 3.8: Posicionamento pela pré-visualização da distorção (Modenesi, 2001 - adaptado)

A montagem que utiliza dispositivos de fixação para restringir o movimento, também pode ser aplicada, porém, pode resultar em altos níveis de tensões residuais. Dos métodos discutidos acima, quando aplicados isoladamente, pode-se obter um resultado inferior ao desejado, mas quando aplicados em conjunto, este resultado tende a satisfazer. Por exemplo, a pré-deformação considera a condição inicial de posição da peça e a sua restrição através da fixação, conforme a FIG. 3.9.

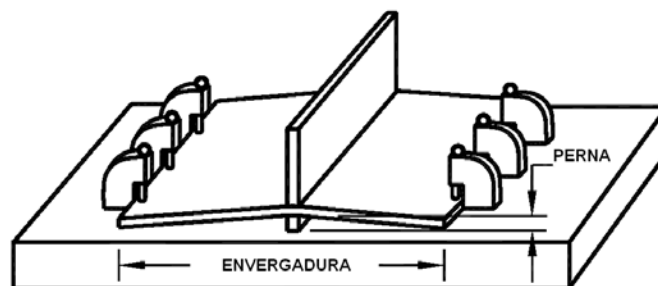


FIGURA 3.9: montagem pré-tensionada de uma junta em "T" (Bohn, modificado)

O procedimento de soldagem influencia o grau de distorção devido ao aporte de calor produzido. O soldador tem pouco controle do aporte de calor especificado em um procedimento de soldagem, o que não o impede em tentar minimizar a distorção. O

dimensionamento correto da junta reduz o volume de metal de solda e o tempo necessário para preenchê-lo, minimizando o aporte de calor na junta. O excesso de metal de solda, causa a convexidade do cordão, não aumenta a resistência deste, mas aumenta as forças de contração.

Quanto à natureza dos materiais, sabe-se que metais diferentes expandem em quantidades diferentes quando aquecidos. Os coeficientes de dilatação do metal de base e do metal de solda têm uma influência importante na deformação, o que pode ser verificado na FIG. 3.10 com a variação da temperatura. A deformação não ocorreria se o material tivesse coeficiente zero de dilatação, mas como isto não acontece, quanto maior o valor do coeficiente de dilatação, maior será a tendência a deformação durante a soldagem.

A tensão de escoamento do metal de solda é outro parâmetro que afeta o grau de deformação de uma peça soldada. Para acomodar a contração da junta soldada no resfriamento, as tensões devem atingir a tensão de escoamento do metal de solda. Quanto maior a tensão de escoamento na área da solda, maiores as tensões residuais que podem agir para deformar a peça. De forma inversa, a deformação em metais de baixa resistência é menos provável ou menos severa.

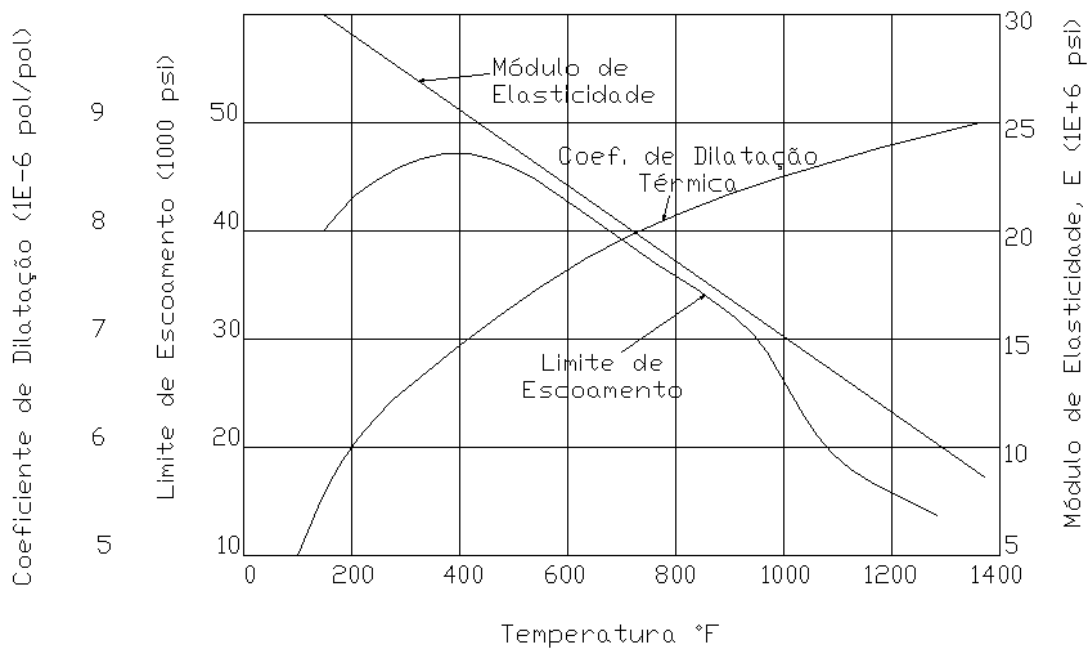


FIGURA 3.10: Mudanças nas propriedades do aço com o aumento de temperatura durante o ciclo de soldagem (Welding Journal, 2001 - adaptado)

Durante a soldagem o metal adjacente é aquecido até quase o ponto de fusão. A temperatura do metal de base a pouca distância da solda é mais baixa, o aquecimento não é uniforme e no resfriamento, a contração desigual do metal de solda e das chapas ocorre. Esta grande diferença de temperatura causa expansões não uniformes seguidas de um movimento do metal base ou deformação no metal, se as partes a serem unidas estiverem com restrição de movimentos. À medida que a poça de fusão avança, o metal base resfria e se contrai, da mesma forma como ocorre com o metal de solda.

A quantidade de calor adicionada a um material, por unidade de comprimento linear, é o que se chama energia de soldagem, ou aporte de calor, ou aporte térmico, ou mesmo *heat input*, geralmente representada pelas letras E ou H e cuja unidade usual é KJ/mm.

Para a soldagem a arco elétrico o valor de E, em J/mm, é dado pela Eq. 3.1:

$$E = \frac{\eta \times V \times I}{v} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde η – eficiência de transferência;
V – tensão, em Volts (V);
I – corrente elétrica, em ampéres (A);
v – velocidade linear de soldagem, em mm/s.

Tensões internas estão presentes nos componentes de uma estrutura mesmo antes de sua fabricação e são causados por vários processos como laminação, corte e conformação (Lucas, 1998).

O calor aplicado durante a soldagem tende a aliviar estas tensões e a deformação final é uma combinação daquela devida às tensões internas. Muitas vezes estas deformações se opõem à deformação causada pela soldagem e assim reduzem a deformação resultante, outras vezes os efeitos são exatamente o oposto. É difícil antecipar como seções conformadas reagem ao calor de soldagem, uma vez que o arranjo das tensões internas é desconhecido. Na prática é aconselhável assumir que as peças que contenham consideráveis tensões internas possam trazer problemas no que se refere a deformação e assim aplicar medidas para controlar seus movimentos durante a soldagem (FBTS, 2001).

A seqüência de soldagem influi na distribuição de calor na região de solda e adjacentes. Uma vez que a interação de ambas as regiões resulta na deformação, é necessário desenvolver uma seqüência ótima para controlar ou direcionar as tensões térmicas geradas pela distribuição de calor e pelas reações do metal (contrações e dilatações) quando a elas submetido.

A seqüência bem planejada envolve a deposição de material em diferentes pontos de um conjunto soldado, de forma a balancear as forças de contração de soldas já executadas e garantir a relação de produtividade e qualidade.

Na determinação da seqüência de soldagem, todas as observações anteriores devem ser consideradas para minimizar as deformações ou obter o efeito desejado.

3.2.1 Tipos de distorções

Em juntas simples, três tipos básicos de distorção podem ocorrer: contração transversal, contração longitudinal e distorção angular. Estas podem causar distorções mais complexas em juntas reais de solda como, por exemplo, o dobramento e a torção de vigas e a distorção por flambagem em juntas de peças de pequena espessura. Durante a soldagem de componentes livres de ponteamto ou dispositivos de fixação, estes podem sofrer distorção rotacional, o que pode dificultar as condições de soldagem e modificar o padrão final da distorção da junta soldada.

Os três tipos básicos de distorção são descritos como:

- Contração transversal

Trata-se de uma redução de dimensão perpendicular ao eixo do cordão de solda, como apresentado na FIG. 3.11. Quanto maior a seção transversal da zona fundida, maior a contração. A contração transversal é influenciada pelos seguintes fatores (Masubuchi, 1991):

1. diminui com o aumento do grau de restrição das peças durante a soldagem e resfriamento;
2. aumenta com a extensão da curva de repartição térmica, isto é, energia de soldagem, pré-aquecimento, número de passes;
3. diminui com martelamento de soldas.

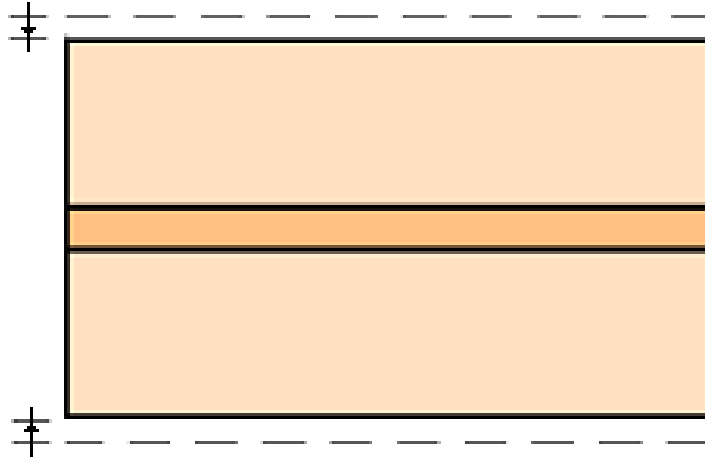


FIGURA 3.11: Contração transversal (Modenesi, 2001 - modificada)

- Contração longitudinal

Trata da redução do comprimento do cordão, ilustrada na FIG. 3.12, e depende da relação entre a seção transversal da zona fundida e a seção restante da peça. Está sujeita aos mesmos fatores de influência que a contração transversal, porém, tende a ser menor. Contudo, acrescenta que ela pode causar efeitos importantes como o dobramento em peças soldadas fora de sua linha neutra e a distorção por flambagem em chapas finas (Modenesi, 2001).

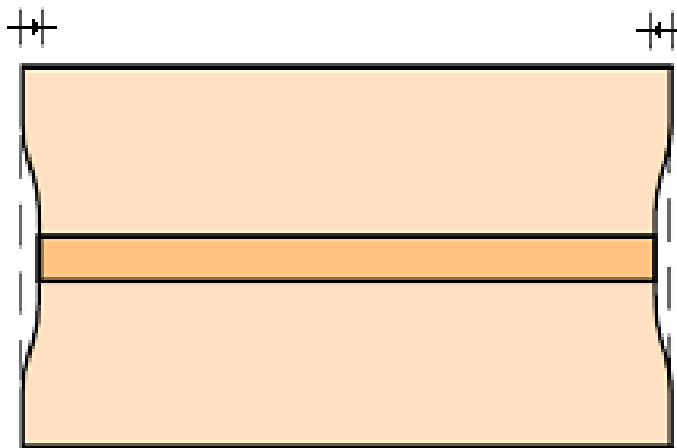


FIGURA 3.12: Contração longitudinal (Modenesi, 2001 - modificada)

- Deformação angular

A disposição irregular da zona plástica em relação a linha neutra da peça é a principal razão da deformação angular.

A distorção angular ocorre quando a contração transversal não é uniforme ao longo da espessura da junta e pode ocorrer tanto em soldas de topo como em soldas de filete, como ilustrado na FIG. 3.13 (Modenesi, 2001).

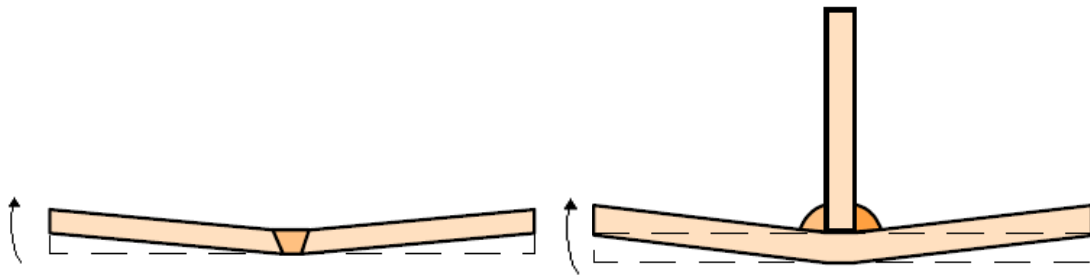


FIGURA 3.13: Contração angular (Modenesi, 2001 - modificada)

Nas juntas soldadas as forças de contração e dilatação atuam no metal de base e na zona fundida. Quando o metal de adição é depositado e se funde com o metal de base, ele está no seu estado de expansão máximo. No resfriamento, o metal de solda tende a se contrair para o volume que ocuparia as temperaturas mais baixas, mas como ele está ligado ao metal de base a sua contração fica restringida (AWS, 1987).

Se o esforço de contração for suficiente para puxar todo o material de base ocorrerá uma grande deformação. A restrição deliberadamente imposta (recursos de montagem) ou a que surge da natureza dos componentes, tem influência direta na deformação resultante da soldagem.

O cálculo da deformação promovida pela operação de soldagem torna-se difícil, tendo em vista a influência da temperatura nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais. Com o aumento da temperatura, o limite de escoamento, o módulo de elasticidade e a condutividade térmica do aço decrescem e o coeficiente de dilatação térmica aumenta. Estas variações, por sua vez, afetam o escoamento e a uniformidade de distribuição de calor, o que torna difícil o cálculo da deformação.

Assim, é de grande valor na fase de projeto ou de fabricação, o entendimento prático das causas de deformação, dos efeitos da contração nos vários tipos de estruturas e equipamentos soldados e os métodos para controlar e usar de forma vantajosa as forças de contração.

3.2.2 Controle da distorção

Várias medidas para o controle de distorções podem ser tomadas, inclusive em conjunto para eliminá-las com melhor eficiência. Pode-se citar:

- projetar juntas com a menor quantidade possível de soldas;
- soldar junto à linha neutra da peça ou em posições simétricas à mesma;
- prever a distorção que ocorrerá durante a solda e definir o posicionamento das peças de forma a equilibrar esta distorção;
- utilizar dispositivos de fixação para posicionar as peças e mantê-las rígidas durante a soldagem;
- desenvolver seqüências ótimas de soldagem que possibilitem a distribuição homogênea de calor sobre a peça.

Muitos autores discutem métodos e os aplicam em análises por elementos finitos para desenvolver modelos para determinar a melhor forma de controlar as distorções provenientes do processo de soldagem.

Michaleris (1997) demonstrou por meio de um modelo, que o tensionamento térmico é um método eficiente para eliminar empenos. Para o autor, a distribuição homogênea de calor e o resfriamento controlado diminuem as tensões residuais longitudinais e elimina o empenamento da chapa. Mas, deve ficar claro que cada montagem tem uma forma singular e requer estudo caso a caso para se determinar o melhor método de controle de distorção.

Qian et al. (2002) perceberam que a distribuição de tensões na junta soldada depende do histórico do ciclo térmico e que as propriedades mecânicas das ligas soldadas dependem da temperatura.

3.3 Distribuição de calor

A fonte de calor, proveniente do processo de soldagem desenvolve no corpo metálico uma distribuição não-uniforme de temperatura, que provoca efeitos prejudiciais, como: tensões e distorções residuais, alteração da microestrutura da ZTA, fraturas por fadiga, redução da resistência mecânica, etc.

De acordo com o ASM (1993), estes problemas estão relacionados com os seguintes fatores:

- taxa de solidificação na poça de fusão;
- taxa de resfriamento na zona termicamente afetada (ZTA);
- tensões térmicas nas proximidades do cordão de solda.

Este fluxo de calor pode ser dividido em duas etapas básicas: o fornecimento de calor e a dissipação deste na peça.

O arco de soldagem é aproximadamente 100% eficiente na transformação de energia elétrica em energia térmica. Esta energia de soldagem, ou aporte térmico, é definida como a quantidade de energia fornecida a junta por unidade de comprimento, demonstrado anteriormente na Eq. 3.1.

Altas temperaturas são alcançadas no arco elétrico, algo em torno de 5000°K (4726,85°C) a 30.000°K (29.726,85°C), dependendo da natureza do plasma e da corrente induzida (AWS, 1987).

A dissipação de calor no componente soldado ocorre por condução, das regiões aquecidas para as adjacentes. Cada ponto destas regiões apresentará uma diferente variação de temperatura devido ao aporte de calor momentâneo. Este fenômeno pode ser chamado de ciclo térmico. Na FIG. 3.14 são apresentadas as fases do ciclo térmico durante a soldagem.

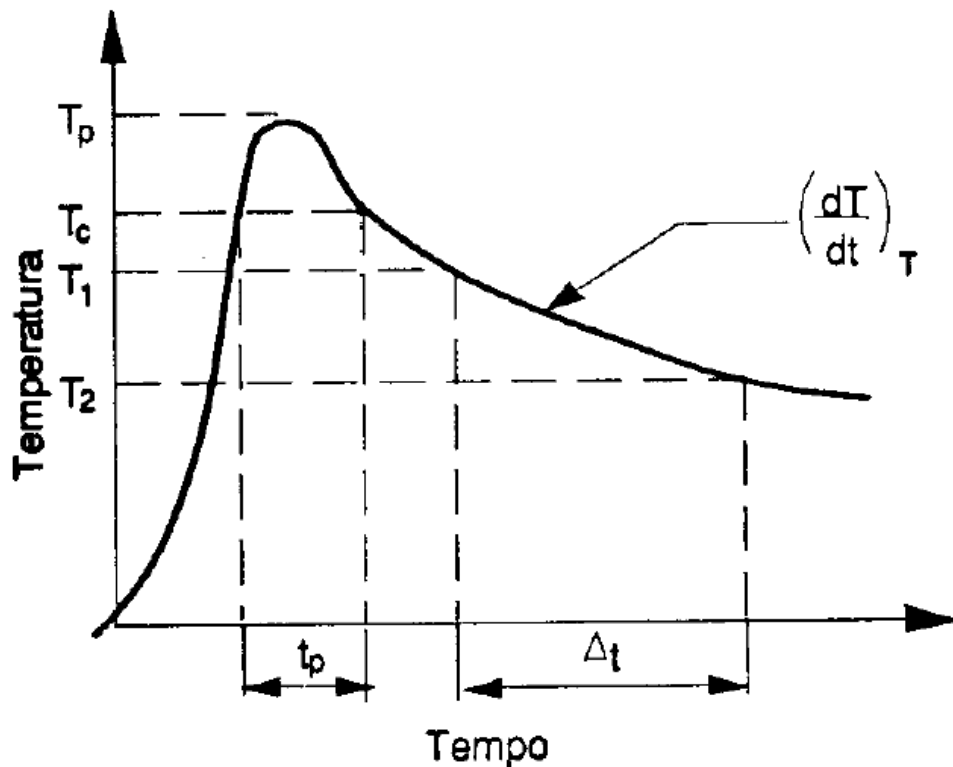


FIGURA 3.14: Ciclo térmico durante a soldagem (Modenesi, 2001)

O ciclo térmico pode ser descrito pelos seguintes fatores:

- Temperatura de pico (T_p): temperatura máxima atingida, que pode provocar transformações estruturais e ainda determinar a extensão da zona termicamente afetada (ZTA) em relação à linha de centro do cordão de solda. Este fator depende das propriedades físicas do material soldado e da energia de solda aplicada e varia sua magnitude ao distanciar do centro da solda.
- Temperatura crítica (T_c): acima desta temperatura ocorrem alterações microestruturais e de propriedades significativas no material.
- Tempo de permanência (t_p): tempo em que o componente soldado fica submetido a uma temperatura acima da temperatura crítica.
- Velocidade de resfriamento $(dT/dt)_T$: é a derivada da temperatura na curva de resfriamento. Ou seja, a variação da temperatura em relação a variação do tempo em que ocorre o resfriamento. Essa variação depende da temperatura inicial do corpo, da forma

geométrica e das dimensões da estrutura soldada, como apresentado na FIG. 3.15, varia diretamente com a espessura do material e inversamente com a energia de soldagem.

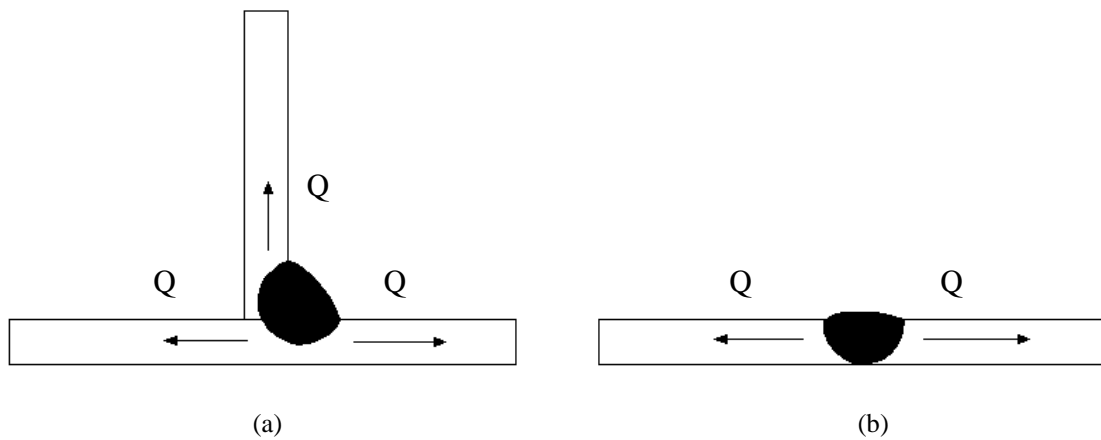


FIGURA 3.15: Fluxo de calor em juntas (a) em ângulo e (b) de topo (Modenesi, 2001 - adaptado)

O fluxo de calor na ZTA e regiões adjacentes – que é função direta da condutividade térmica e dos gradientes térmicos, e inversamente proporcional à capacidade térmica – deve ser mantido dentro de certos limites, para que se possa controlar a microestrutura do metal de solda e de base, suas propriedades mecânicas e distorções resultantes da operação de soldagem. Através do estudo do ciclo térmico pode-se identificar: a taxa de solidificação do metal fundido; as temperaturas máximas alcançadas na ZTA; a taxa de resfriamento tanto do metal fundido quanto da ZTA e ainda, a distribuição de calor entre o metal fundido e ZTA (AWS, 1997).

Portanto, conhecer o modo como o calor se distribui pela placa é essencial para prever os efeitos térmicos resultantes do processo de soldagem. Se comparada com as dimensões da peça a se soldar, a área relativa à fonte de calor é bem pequena, e as variáveis que definem a quantidade de calor transferido à peça são (Lombera, 1989):

- a magnitude da taxa de energia fornecida à peça;
- a distribuição do calor fornecido;
- e a velocidade de soldagem.

Deve-se salientar o fato de que na maioria das situações de soldagem, a velocidade de deslocamento da fonte de calor ao longo da peça trabalhada é muito superior à velocidade de propagação de calor pela peça. Ou seja, o fluxo de calor na direção do deslocamento é

pequeno se comparado à velocidade na direção perpendicular à linha de solda. Isto significa que certa parte do material de base sente o ciclo térmico como um curto e intenso pulso de calor (Easterling, 1992).

Outro fator importante a ser observado, é a soldabilidade dos metais de cada junta. Isto garante que a região de solda não seja fragilizada, o que provoca resultados indesejáveis como trincas.

As trincas podem ser formadas a quente (trincas na solidificação) ou a frio (presença de hidrogênio), sendo que ambas têm em comum a presença de elementos fragilizantes da liga metálica. A fim de solucionar este problema, é utilizado o tratamento térmico de pré-aquecimento e pós-aquecimento para a manutenção da temperatura por um período de tempo maior. Ao variar a taxa de resfriamento, aumenta-se o tempo em que se mantém o metal aquecido para que o hidrogênio seja expelido da região de solda (Irving, 1999).

Para se determinar a temperatura de pré-aquecimento, é feita a análise do carbono equivalente (CEq) dos metais que compõem a junta a ser soldada. O CEq é a relação da concentração dos elementos que compõem a liga metálica na influência destes no resultado da soldagem, como se fossem carbono. Uma referência para o cálculo do CEq, segundo o International Institute of Welding (IIW), é dada pela seguinte Eq. 3.2:

$$CEq = \%C + \frac{1}{6}(\%Mn) + \frac{1}{15}(\%Ni + \%Cu) + \frac{1}{5}(\%Cr + \%Mo + \%V) \quad \text{Equação 3.2}$$

Para valores de CEq abaixo de 0,4% a soldabilidade dos metais é excelente (Marques, 2005). Quando maior, um procedimento de pré-aquecimento é necessário para realizar a solda no subconjunto.

A temperatura é dada pela Eq. 3.3:

$$Tp = 350 \times \sqrt{CEq \times (1 + 0,005 \times e) - 0,25} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde, T_p – temperatura de pré-aquecimento (°C);

CEq – carbono equivalente (%);

e – espessura da chapa (mm).

Ao se realizar o pré-aquecimento, além da difusão de hidrogênio, outros fatores são afetados, como o aumento da ductilidade do metal e a diminuição da magnitude das contrações pela homogeneização do calor em toda a peça (Manning, 1983). Este conceito é absorvido nesta pesquisa, uma vez que ao distribuir e aumentar o tempo de permanência do calor é possível equilibrar as tensões térmicas geradas durante o processo de soldagem, o que elimina as distorções.

3.4 Processo GMAW (Gas Metal Arc Welding)

O processo GMAW (Gas Metal Arc Welding) utiliza um arco elétrico como fonte de energia (calor) para alcançar a temperatura de fusão dos metais, e provoca a união da junta. Este arco elétrico é gerado pela descarga de alta corrente elétrica estabelecida entre a peça e um consumível na forma de arame, protegidos por uma camada de gás inerte e/ou ativo para manter sua estabilidade e garantir a qualidade do cordão de solda formado. O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão. A FIG. 16 apresenta esse processo e uma parte da tocha de soldagem.

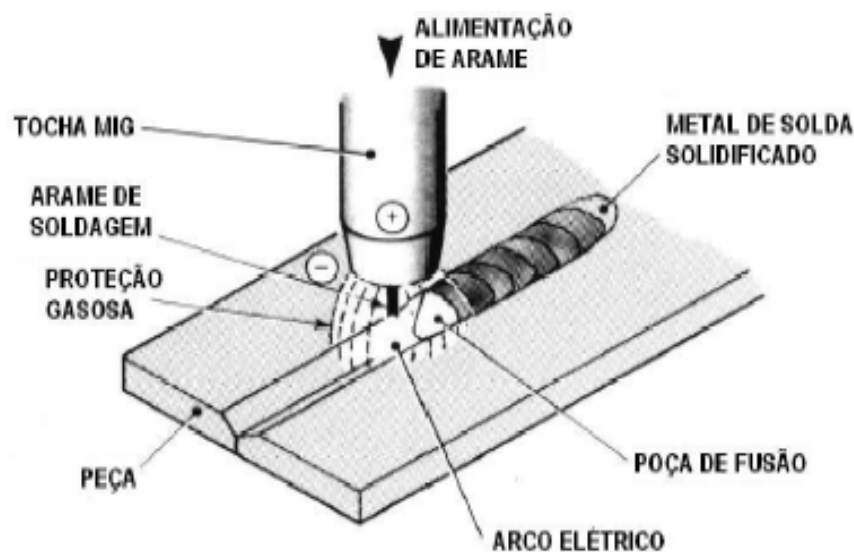


FIGURA 3.16: Processo básico de soldagem GMAW.

A soldagem GMAW é um processo semi-mecanizado, que pode ser completamente automatizado, em que a alimentação de arame eletrodo é feita mecanicamente, através de um alimentador motorizado, sendo que o soldador é responsável pela iniciação e interrupção da soldagem, além de mover a tocha ao longo da junta. A manutenção do arco é garantida pela alimentação contínua de arame eletrodo e o comprimento do arco é, em princípio, mantido

aproximadamente constante pelo próprio sistema, independentemente dos movimentos do soldador, dentro de certos limites.

O avanço tecnológico e o desenvolvimento das técnicas tornaram o processo GMAW aplicável à soldagem de todos os metais comercialmente importantes como os aços, o alumínio, aços inoxidáveis, cobre e vários outros.

As vantagens encontradas no processo de soldagem GMAW (semi-mecanizado e automática), são:

- a soldagem pode ser executada em todas as posições;
- não há necessidade de remoção de escória;
- alta taxa de deposição do metal de solda;
- tempo total de execução de soldas de cerca da metade do tempo para o eletrodo revestido;
- altas velocidades de soldagem; menos distorção das peças;
- largas aberturas preenchidas ou amanteigadas facilmente, tornando certos tipos de soldagem de reparo mais eficientes;
- não há perdas de pontas como no eletrodo revestido.

A soldagem GMAW é usada na fabricação e manutenção de equipamentos e peças metálicas, na recuperação de peças desgastadas e no revestimento de superfícies metálicas.

3.5 Dispositivos de fixação e posicionadores

Diante da necessidade de alta produtividade e garantia da qualidade do produto final, vários recursos devem ser aplicados em paralelo ao processo de soldagem para garantir a sua integridade.

Na montagem de equipamentos, é comum utilizar dispositivos de fixação responsáveis em garantir o posicionamento do conjunto de acordo com suas tolerâncias e mantê-lo assim após o processo de soldagem que, conforme visto anteriormente, provoca alterações bruscas na forma em função das tensões térmicas geradas.

Dependendo da aplicação e da quantidade a ser produzida, é aconselhável desenvolver dispositivo específico para a montagem do produto, garantindo a repetibilidade do processo, como pode ser visto na FIG. 3.17.

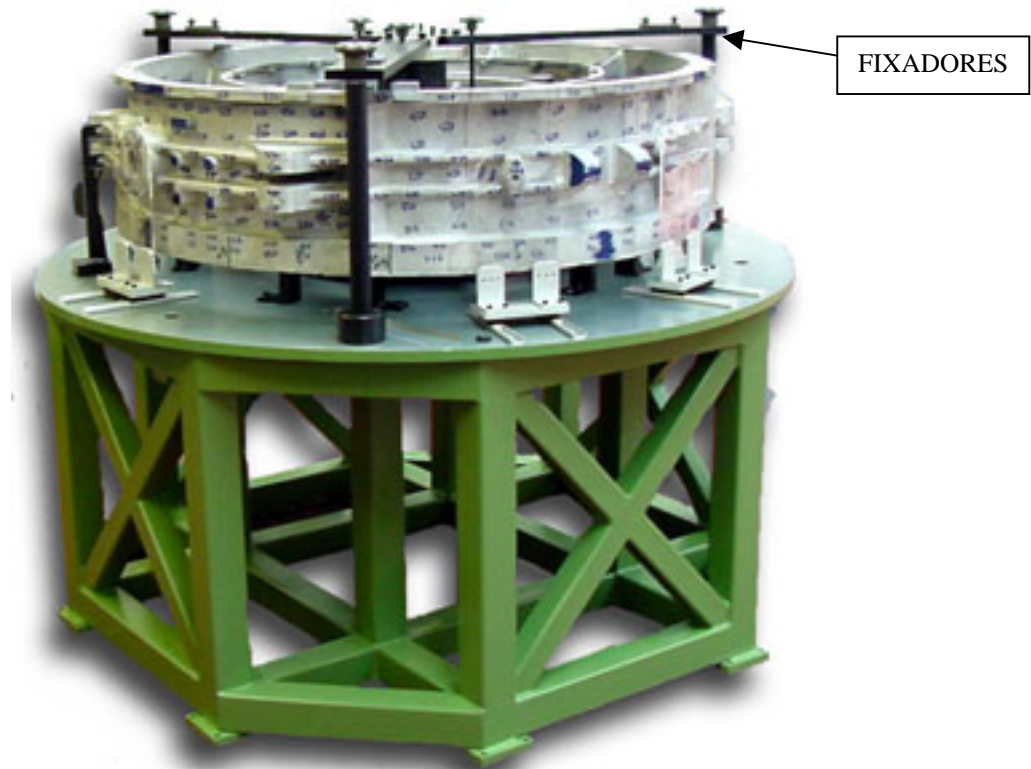


FIGURA 3.17: dispositivo de fixação para soldagem da parte de uma aeronave

Os fixadores, além de garantir o posicionamento da peça, podem ser utilizados na redução de problemas causados pelas tensões geradas durante soldagem, por exemplo, a pré-deformação das partes montadas que, logo após a soldagem, devem apresentar a forma correta após o alívio da pré-deformação.

Apesar da grande variedade e versatilidade destes fixadores, deve-se salientar que alguns tipos prejudicam não somente a estrutura do material, mas também a estética. Isto se refere aos elementos soldados diretamente nas peças para desempenhar a fixação. Como exemplo clássico, pode ser citado o “cachorro”, ou uma peça de aço em forma de “L” ou “U”, soldada diretamente a peça utilizado juntamente com a cunha. Primeiramente, a região soldada poderá sofrer alterações microestruturais, que podem comprometer sua resistência mecânica. Em segundo, ao retirar esta peça, a superfície ficará irregular em relação às adjacências. Para

evitar estes problemas, devem ser desenvolvidos dispositivos móveis e rígidos (mais do que a própria montagem), que sejam de fácil manuseio e retirada após a finalização da soldagem.

Na FIG. 3.18, apresenta-se um exemplo de uma forma correta de utilizar o “cachorro” e a cunha. O “cachorro” é soldado à mesa e posicionado sob o conjunto a soldar, onde é utilizada a cunha para fixá-lo. Esta montagem foi realizada para garantir a posição e minimizar a distorção, que restringe os movimentos provenientes das tensões térmicas geradas durante a soldagem.

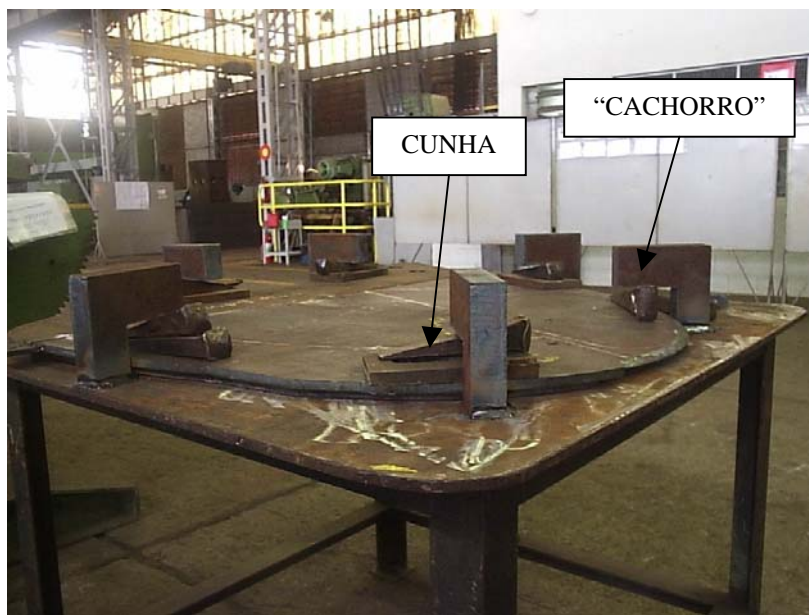


FIGURA 3.18: utilização correta do “cachorro” e cunha (TBM - cortesia)

Os fixadores devem ser projetados de acordo com as seguintes condições (AWS, 1987):

- acessibilidade às juntas a serem soldadas;
- rigidez superior à do conjunto montado;
- protegidos dos respingos;
- ter o mínimo de solda temporária;
- facilidade de remover a fixação após a soldagem.

Nas FIG. 3.19a e 3.19b apresentam-se duas situações de montagens: dispositivo de fixação correto e incorreto. Na FIG. 3.19a foram soldadas peças de metal diretamente ao conjunto. Neste caso a estrutura do metal, nas regiões soldadas, pode sofrer alterações micro estruturais prejudicando suas características de resistência mecânica e, ainda, sendo necessário de

acabamento quando retirar as peças utilizadas. Na FIG. 3.19b foi utilizado um dispositivo de fixação por parafusos, dimensionado especificamente para esta aplicação, que possibilita sua remoção com facilidade e sem alterar nenhuma característica física e visual do conjunto soldado e cumpre o objetivo de evitar a distorção durante a soldagem.



FIGURA 3.19: dispositivos de fixação de montagem da viga (a) incorreto e (b) correto (TBM - cortesia)

Além dos dispositivos de fixação, como recurso de apoio é utilizado também o posicionador, apresentado nas FIG. 3.20 e FIG. 3.21. Estes equipamentos têm o papel de facilitar o manuseio das peças/montagens, uma vez que estas podem ser de grande porte e há a necessidade de reposicioná-la para possibilitar a soldagem na posição plana, que é mais favorável ao processo e garante a qualidade da solda.

Estes posicionadores podem ter um ou mais graus de liberdade, o que possibilita o acesso a todas as juntas da peça e torna versátil para as mais variadas geometrias das peças. Estas versatilidades combinadas com a aplicação de robôs tendem a tornar o processo altamente produtivo e repetitivo e garante a qualidade constante do produto final, principalmente quando atrelados ao correto procedimento de montagem e soldagem.

Ao utilizar os posicionadores, além de garantir a melhor posição de soldagem, o processo é otimizado por não depender de outros equipamentos para movimentar o componente soldado,



FIGURA 3.20: posicionador com 1 grau de liberdade (rotação da placa na vertical) (TBM - cortesia)



FIGURA 3.21: posicionador com 2 graus de liberdade (TBM - cortesia)

A FIG. 3.22 apresenta-se uma viga com o dispositivo de fixação móvel e fixada a um posicionador de 2 graus de liberdade para soldagem. Todos estes recursos, garantirão a posição da montagem e a posição da soldagem.



FIGURA 3.22: viga com fixação móvel no posicionador para soldagem (TBM - cortesia)

4 METODOLOGIA

Esta metodologia foi desenvolvida para minimizar a distorção das caçambas, sendo avaliadas no aspecto visual e verificado quanto aos empenos por meio de gabaritos, que copiam o perfil fielmente do projeto. No aspecto dimensional², as caçambas foram medidas por um equipamento tridimensional de alta precisão.

Estudou-se o projeto da caçamba, para verificar a possibilidade de montá-la em subconjuntos, ou seja, montar e soldar as partes da caçamba separadas com o objetivo de minimizar a concentração de calor, com conseqüência, menor possibilidade de distorção. Para isso desenhou-se essas partes em software CAD 3D, o *Solid Works*. Desta forma, foi possível simular a montagem dos subconjuntos, prever as falhas e determinar a melhor seqüência de soldagem. O conjunto desenhado e montado no *Solid Works* está apresentado na FIG. 4.1.

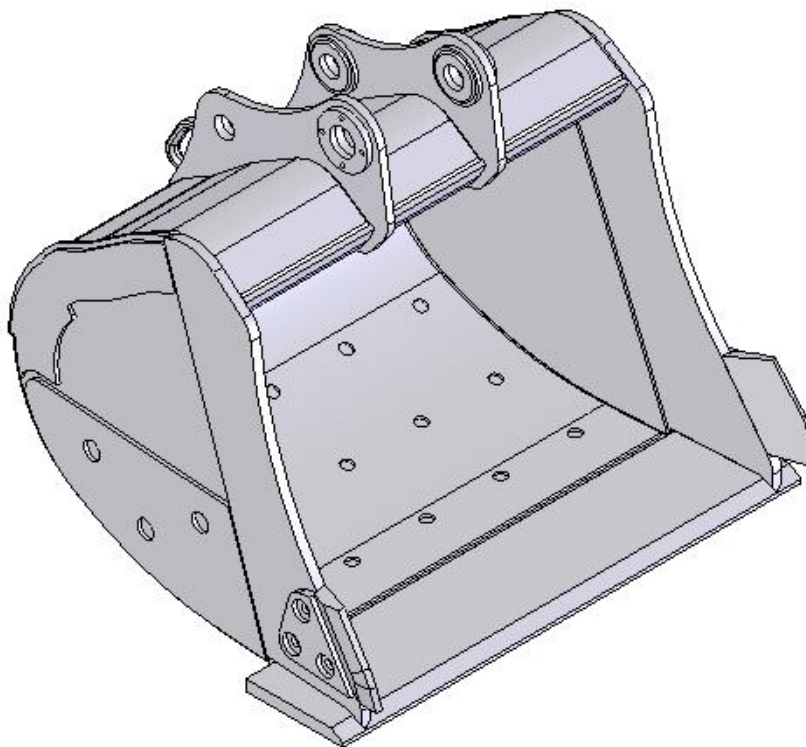


FIGURA 4.1: Conjunto montado, desenhado em 3D.

² Estas dimensões serão omitidas para preservar informações confidenciais da empresa TBM.

Para garantir a qualidade do conjunto, avaliou-se os materiais utilizados na fabricação, observando o grau de soldabilidade em função do Carbono Equivalente (CEq). O CEq de cada material foi calculado, para avaliar a necessidade de pré-aquecimento da junta a ser soldada e a temperatura indicada, segundo a fórmula do IIW (International Institute of Welding). Os valores do CEq de cada metal é apresentado no Anexo 1.

A TAB. 4.1 apresenta os itens que compõem a caçamba e seus respectivos materiais, seguidos do CEq e da temperatura de pré-aquecimento necessária para o processo de soldagem.

TABELA 4.1 – Relação dos itens e seus respectivos materias, CEq e temperatura de pré-aquecimento.

Item	Material	CEq	Temperatura de Pré-aquecimento
01	USI SAR 60	0,437%	150°
01R	USI AR 400	0,505%	260°
02	USI SAR 60	0,437%	150°
03	USI SAR 60	0,437%	150°
05	USI SAR 60	0,437%	150°
06	USI SAR 60	0,437%	150°
07	USI SAR 60	0,437%	150°
08-1	USI SAR 60	0,437%	150°
08-2	USI AR 400	0,505%	260°
09	USI AR 400	0,505%	260°
10	USI SAR 60	0,437%	150°
10-SUP	USI SAR 60	0,437%	150°
23	USI AR 400	0,505%	260°
35	USI SAR 60	0,437%	150°
36	USI AR 400	0,505%	260°
39	USI AR 400	0,505%	260°

O processo de soldagem utilizado para a soldagem da caçamba foi o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), pois é o principal processo utilizado pela TBM na sua linha de fabricação e foi disponibilizado para o desenvolvimento da pesquisa. Na indústria em geral, este processo é aplicado devido às características de alta produtividade e qualidade final do cordão de solda e ainda pode ser totalmente automatizado. Foi utilizado o arame sólido E 70S6, de 1,2mm de diâmetro como metal de adição e gás mistura de CO₂ e Ar para todas as juntas soldadas.

Desenvolveram-se dispositivos e posicionadores para auxiliar a montagem e evitar recursos como “cachorros”, os quais geram a necessidade de acabamento superficial após sua retirada, aumentam o tempo de produção e prejudicam a estética do produto final, fator determinante na aceitação do cliente. Com esses dispositivos garantiu-se a melhor posição de soldagem e facilidade na movimentação do conjunto.

Para o desenvolvimento da seqüência, foram considerados os seguintes argumentos:

- soldar com o menor número de passes possíveis;
- soldar na posição plana e horizontal;
- aproveitar as áreas adjacentes ao cordão de solda para distribuir o calor aplicado de forma homogênea;
- iniciar a seqüência de soldagem de dentro para fora, ou do centro para as extremidades;
- dividir subconjuntos para acumular menos calor;
- enrijecer o conjunto por partes;
- favorecer a produtividade.

A descrição de cada subconjunto conterà as seguintes informações:

- itens: os números que fazem referências às peças no projeto original;
- tipos de juntas;
- figura representativa para cada subconjunto, que contém a indicação das juntas consideradas.

4.1 Descrição dos subconjuntos da caçamba e da seqüência de soldagem

A caçamba, apresentada na FIG. 4.1, foi detalhada em subconjuntos e estes formam subconjuntos mais complexos para formar o conjunto final. Na FIG. 4.2 apresenta-se a caçamba em vista explodida e demonstra os subconjuntos, descritos posteriormente.

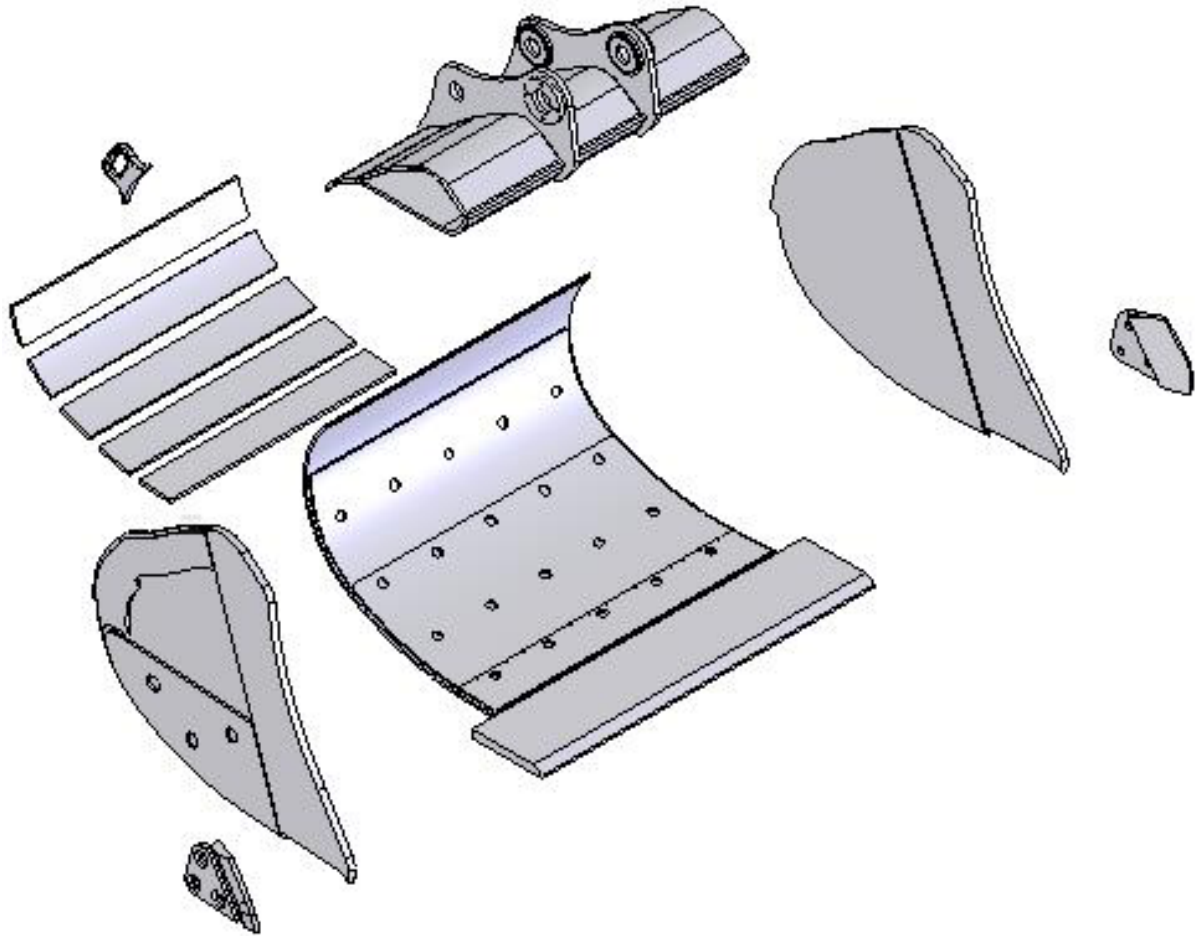


FIGURA 4.2: Vista explodida do conjunto completo.

A seguir, cada subconjunto foi detalhado na sua forma construtiva e analisadas as possibilidades de montagem, onde estudou-se a seqüência de soldagem.

4.1.1 Subconjunto 01 – SC01

O SC01 apresentado na FIG. 4.3, compõe-se da chapa do bojo (ITEM 01), da chapa de revestimento (ITEM 01R) e da borda (ITEM 39). Os ITENS 01 e 01R são soldados em todo o

contorno, cordão de filete, e preenchimento dos bujões por completo. O ITEM 39 é soldado ao longo do seu comprimento ao ITEM 01.

Bujões são furos no elemento a ser soldados, utilizado como junta em elementos com superfície ampla e que não possibilita a soldagem nesta região. É denominado também como furo de caldeamento.

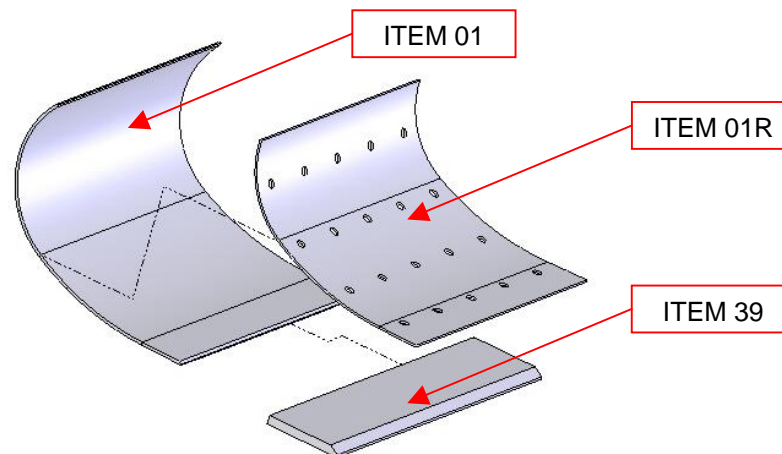


FIGURA 4.3: Vista explodida do subconjunto 01 - SC01.

No SC01 serão soldadas juntas de filete, indicadas na FIG. 4.4 como C1, C2 e C3, juntas de topo indicadas como “A” a “J” e bujões indicados como colunas “a”, “b”, “c”, “d”, “e” e linhas 1, 2, 3 e 4.

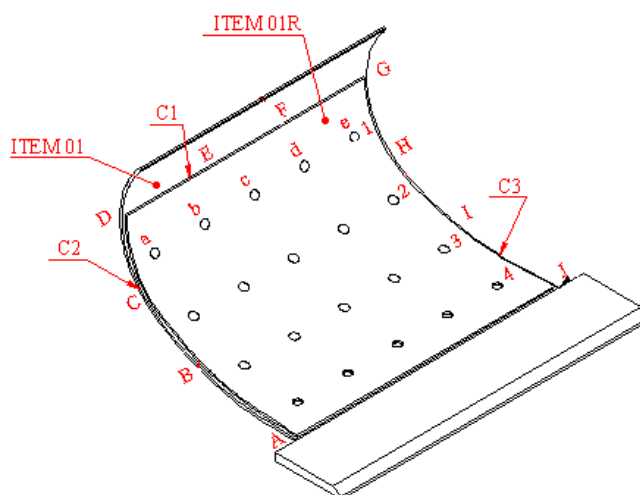


FIGURA 4.4: Subconjunto SC01

4.1.2 Subconjunto 02 – SC02

O SC02, apresentado FIG. 4.6, compõe-se da alça esquerda (ITEM 06-LE), da arruela externa (ITEM 07-EXT) e da arruela interna (ITEM 07-INT). Os ITENS 07-EXT e 07-INT são soldados em todo o contorno ao ITEM 06-LE, conforme o projeto.

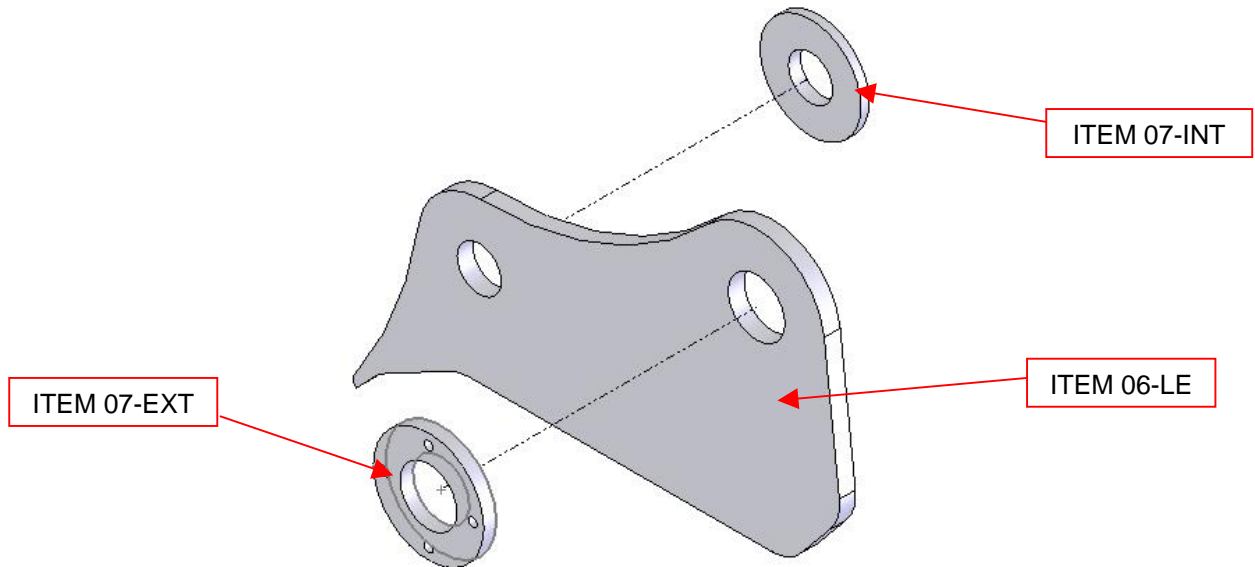


FIGURA 4.5: Vista explodida do subconjunto 02 - SC02.

Neste subconjunto serão soldadas juntas de filete, formadas pela montagem da alça com as arruelas, indicadas na FIG. 4.6.

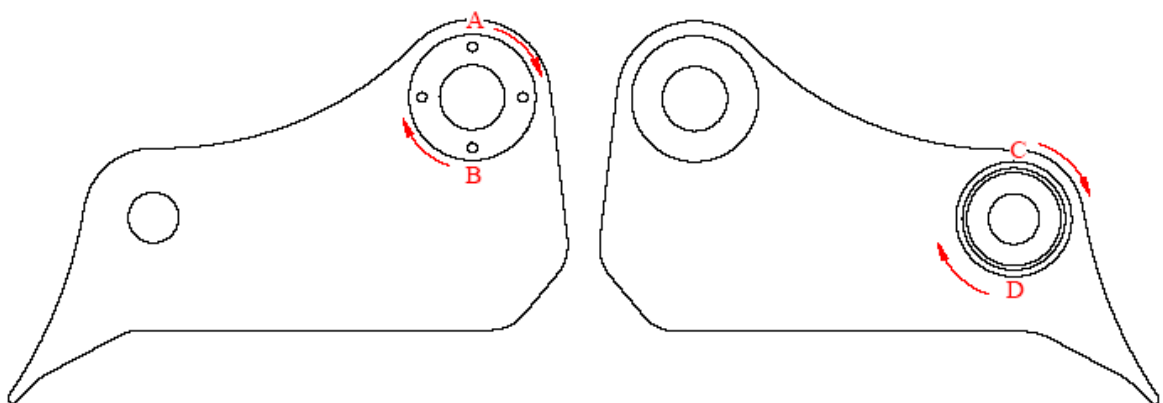


FIGURA 4.6: Subconjunto SC02.

4.1.3 Subconjunto 03 – SC03

O SC03, apresentado na FIG. 4.7, compõe-se da alça direita (ITEM 06-LD), das arruelas externas direitas (ITEM 07-EXT-LD) e das arruelas internas (ITEM 07-INT). Os ITENS 07-EXT-LD e 07-INT são soldados em todo o contorno ao ITEM 06-LD, conforme o projeto.

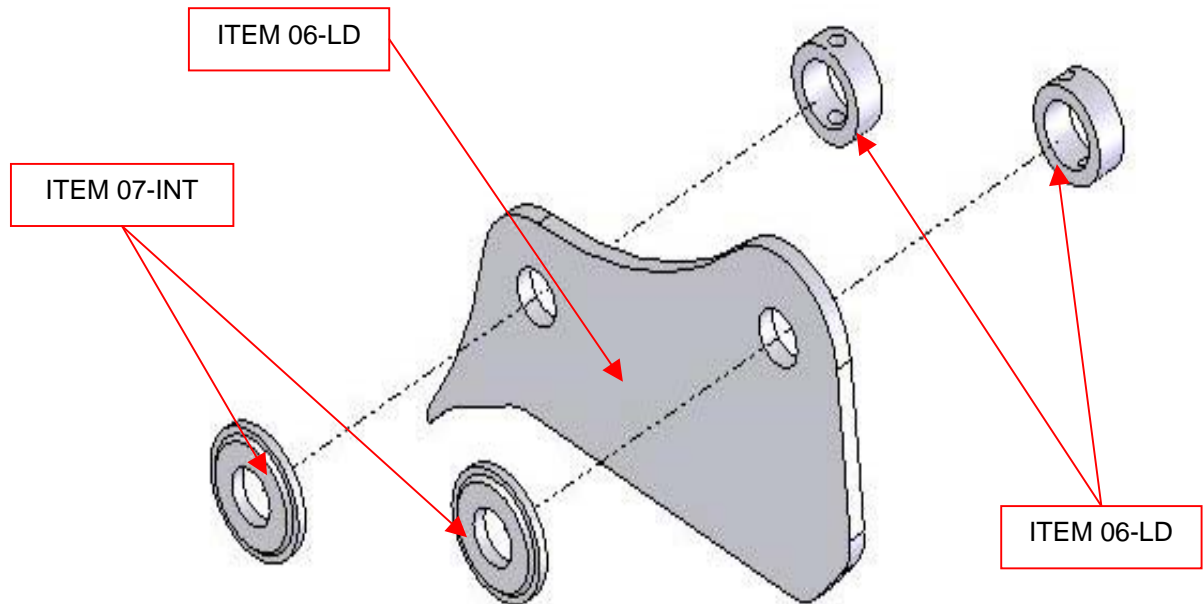


FIGURA 4.7: Vista explodida do subconjunto 03 - SC03.

Neste subconjunto serão soldadas juntas de filete, formadas pela montagem das alças com as arruelas, de acordo com as indicações da FIG. 4.8.

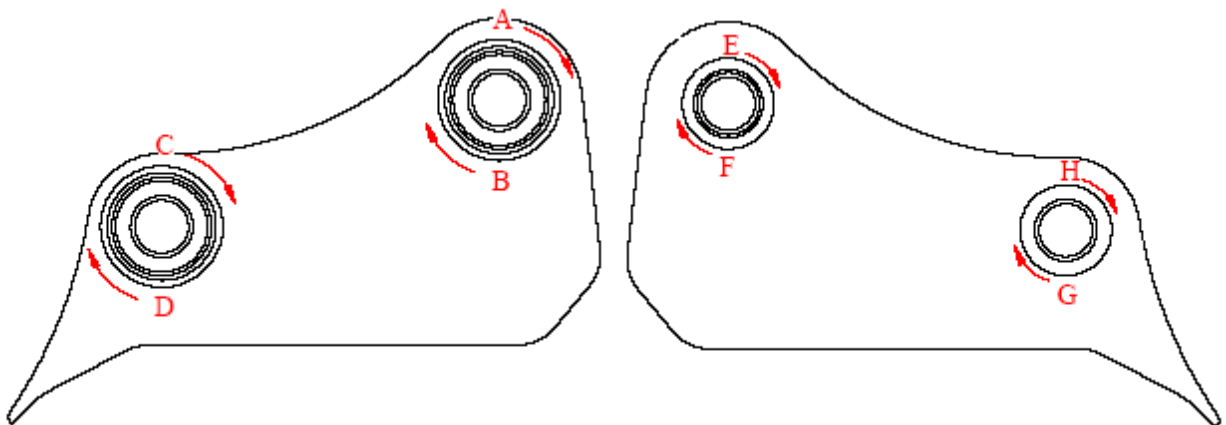


FIGURA 4.8: Subconjunto SC03.

4.1.4 Subconjunto 04 – SC04

O SC04, FIG. 4.9, compõe-se do complemento do bojo (ITEM 35), da alça esquerda (SC02) e da alça direita (SC03). O SC02 e o SC03 têm as suas bases soldadas em todo o contorno ao ITEM 35, conforme o projeto.

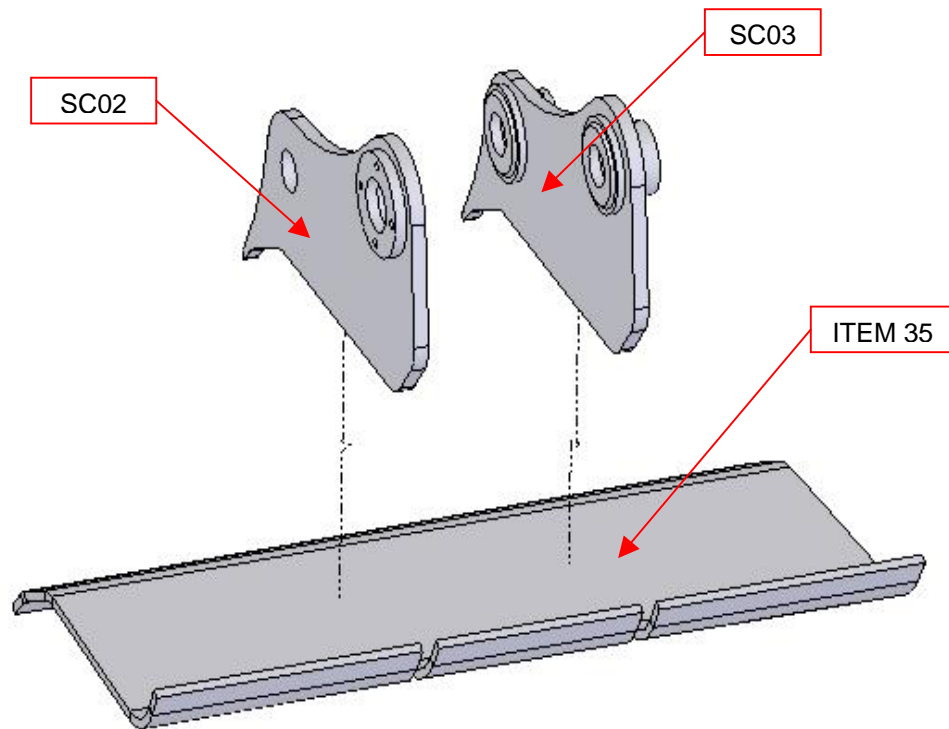


FIGURA 4.9: Vista explodida do subconjunto 04 - SC04.

Neste subconjunto serão soldadas juntas de filete, formadas pela montagem das alças com o complemento da viga, de acordo com as indicações da FIG. 4.10.

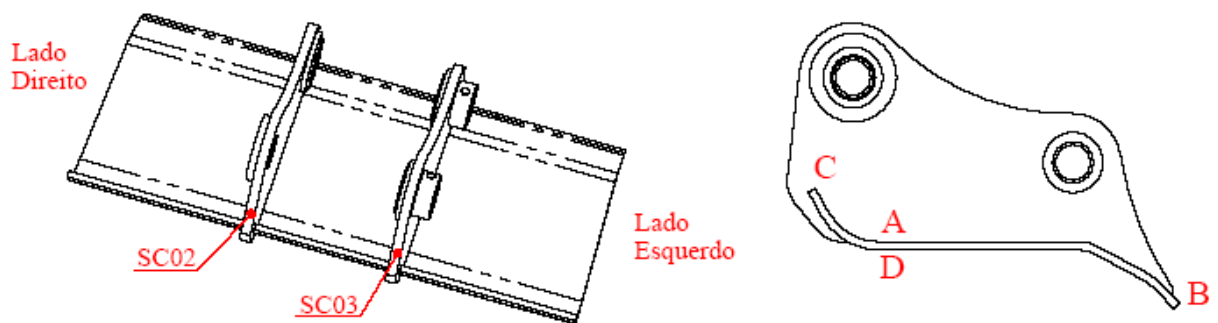


FIGURA 4.10: Subconjunto SC04.

4.1.5 Subconjunto 05 – SC05

O SC05, apresentado na FIG. 4.11, compõe-se das vigas externas e central (ITEM 05-EXT-LE, 05-EXT-LD e 05-CE) e do SC04. As vigas são soldadas às alças e ao complemento do bojo em todo o contorno, conforme o projeto.

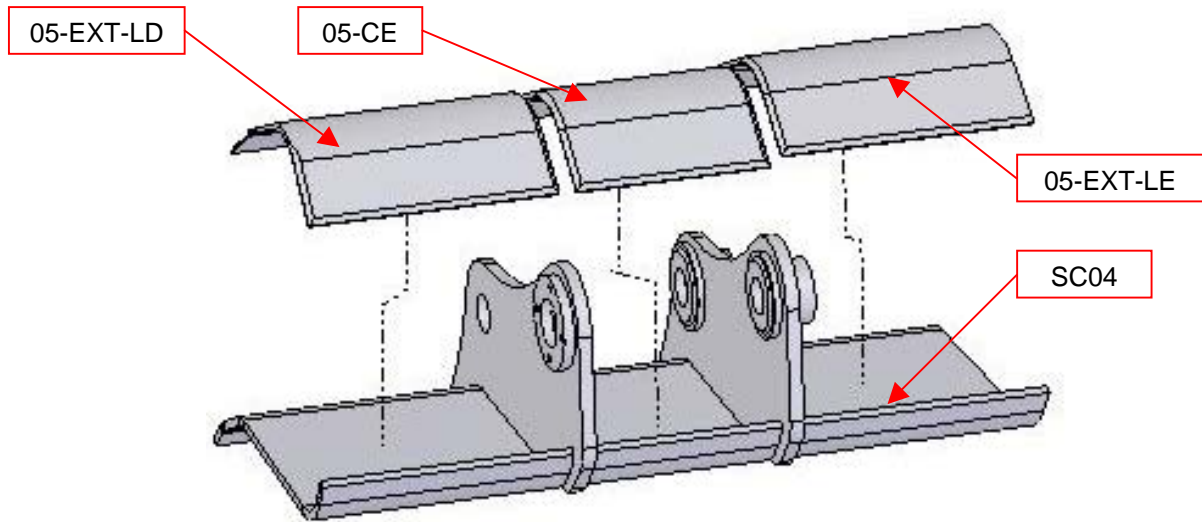


FIGURA 4.11: Vista explodida do subconjunto 05 - SC05.

Neste subconjunto serão soldadas juntas de filete e bixel, formadas pela montagem das alças, com o complemento do bojo e com as vigas, como indicado na FIG. 4.12.

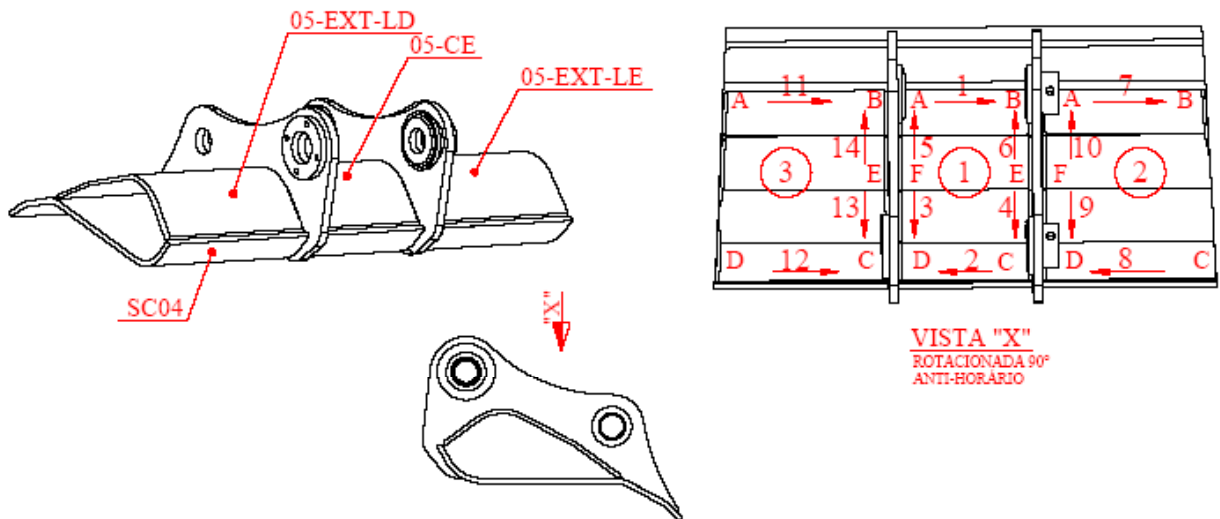


FIGURA 4.12: Subconjunto SC05.

4.1.6 Subconjunto 06 – SC06

O SC06, FIG. 4.13, compõe-se da lateral (ITEM 02-LE/LD), do reforço lateral (ITEM 03) e das seções superior e inferior (ITEM 10 e 10-SUP). Os ITENS 10 e 10-SUP são soldados ao ITEM 02 por junta de filete em todo o contorno.

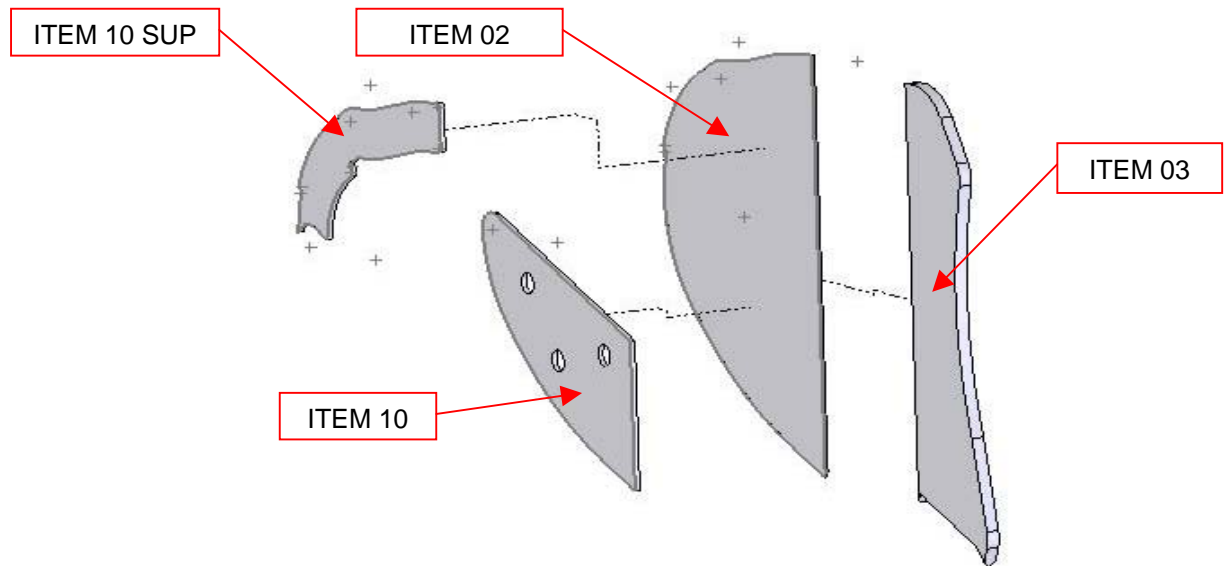


FIGURA 4.13: Vista explodida do subconjunto 06 - SC06.

No SC06 serão soldadas juntas de filete, de topo e bixel, formadas pela montagem da lateral, com o reforço e com as seções inferior e superior, de acordo com a FIG. 4.14.

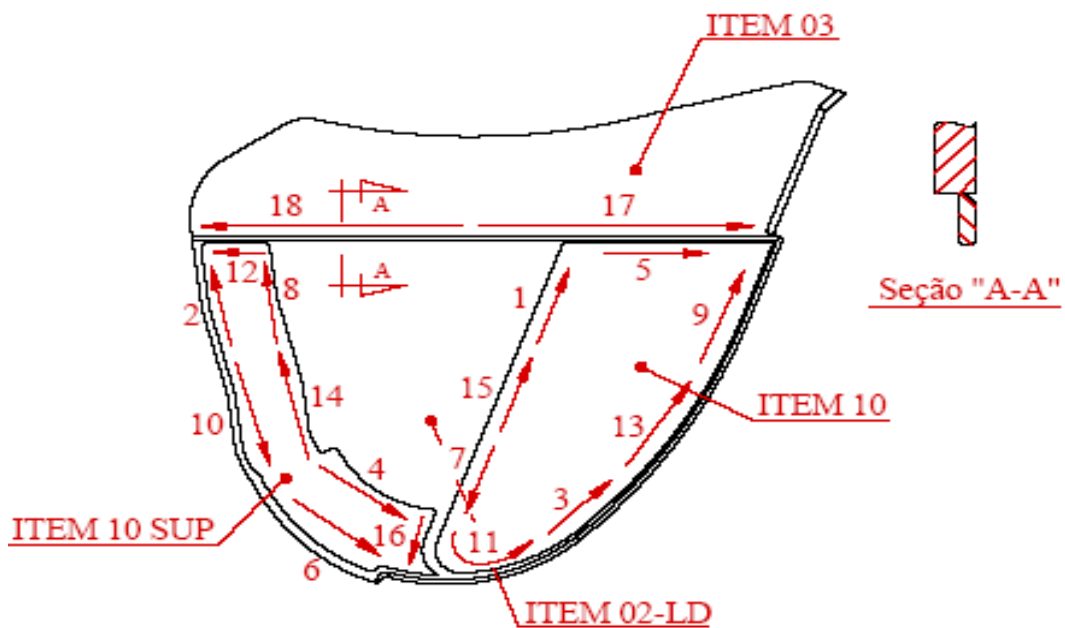


FIGURA 4.14: Subconjunto SC06.

4.1.7 Subconjunto 07 – SC07

O SC07, FIG. 4.15, compõe-se da base do canto esquerda (ITEM 08-1) e da faca do canto esquerda (ITEM 08-2). O ITEM 08-1 é soldado ao ITEM 08-2 por junta de topo com chanfro em todo o comprimento.

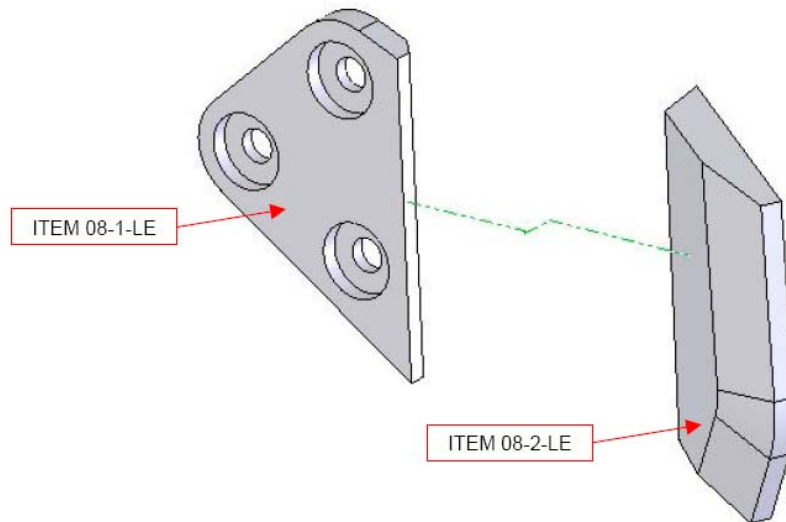


FIGURA 4.15: Vista explodida do subconjunto 07 - SC07.

Neste subconjunto serão juntas de filete, de topo e em chanfro, formada pela montagem do canto com a faca, como indicada na FIG. 4.16.

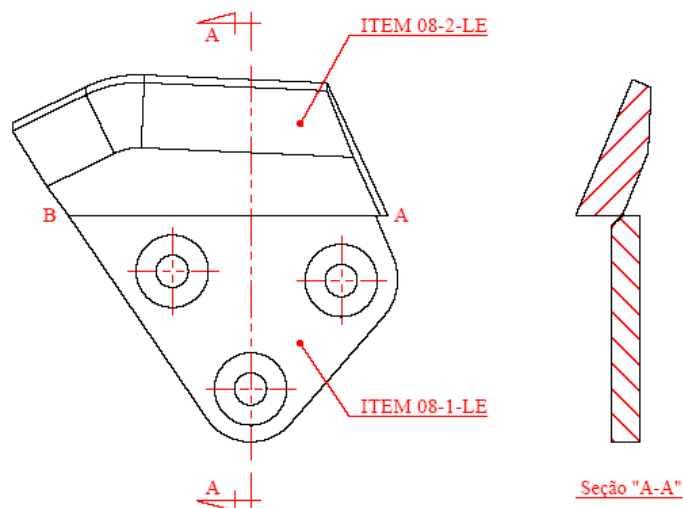


FIGURA 4.16: Subconjunto SC07.

4.1.8 Subconjunto 08 – SC08

O SC08, FIG. 4.17, compõe-se do SC01 e do SC05. O SC01 e o SC05 têm as suas bases soldadas em todo o comprimento, conforme o projeto.

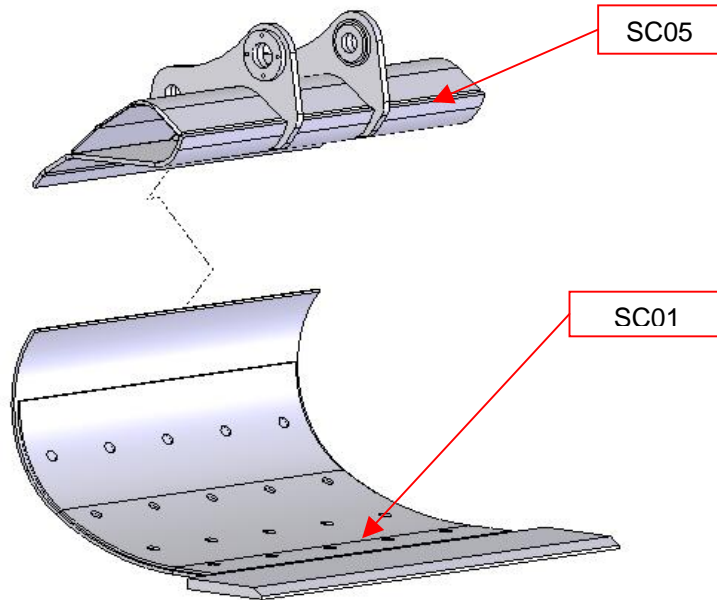


FIGURA 4.17: Vista explodida do subconjunto 08 – SC08.

Neste subconjunto serão juntas de filete, de topo e em chanfro, formada pela montagem do SC01 e SC05, como indicado na FIG. 4.18.

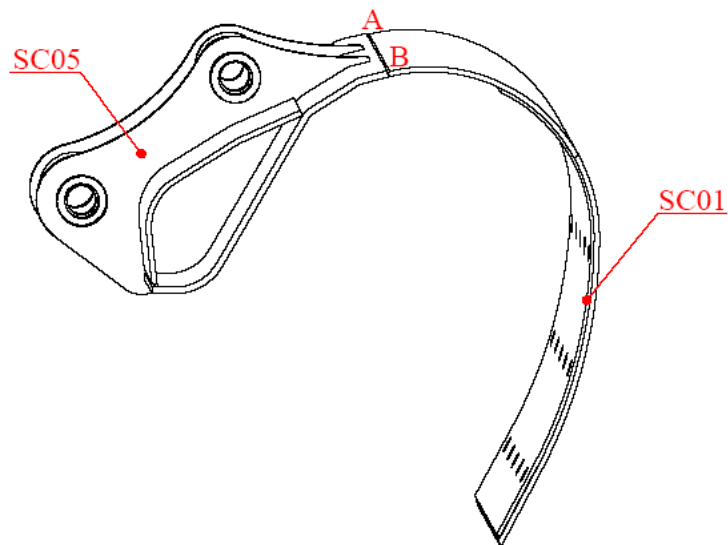


FIGURA 4.18: Subconjunto SC08.

4.1.9 Subconjunto 09 – SC09

O SC09, FIG. 4.19, compõe-se do SC08, SC06 LE e LD. O SC08 e os SC06's têm as suas bases soldadas em todo o comprimento, conforme o projeto.

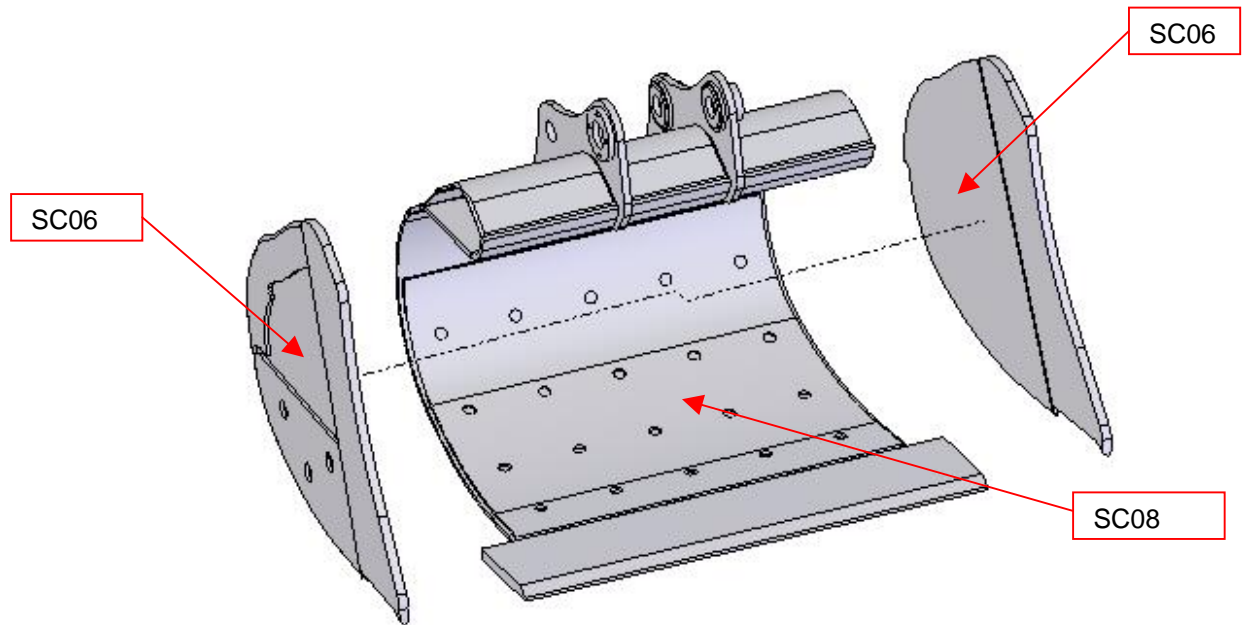


FIGURA 4.19: Vista explodida do subconjunto 09 – SC09.

Neste subconjunto serão juntas de filete, de topo e em chanfro, formada pela montagem do SC06 e SC08, como indicado na FIG. 4.20.

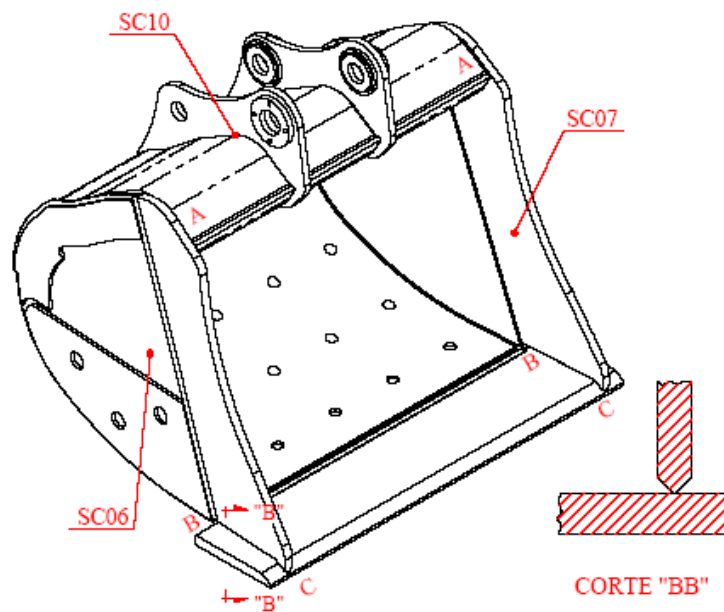


FIGURA 4.20: Subconjunto SC09.

4.1.10 Subconjunto 10 – SC10

O SC10, FIG. 4.21, compõe-se do SC07, SC09 e placas de desgaste, ITENS 23, 36, 09 LE/LD e 25.

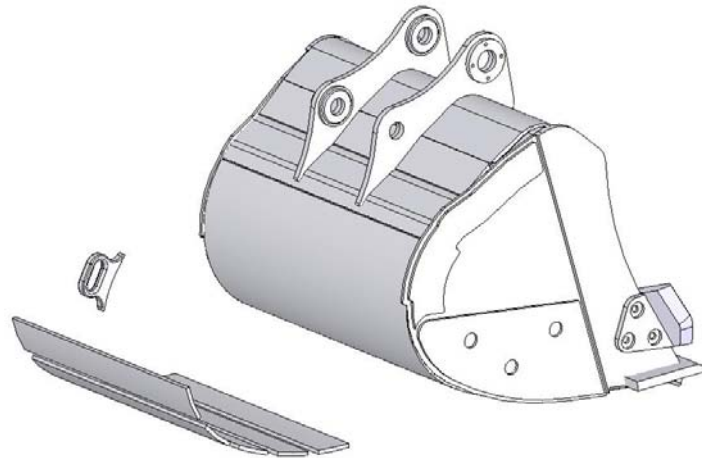


FIGURA 4.21: Vista explodida do subconjunto 10 – SC10.

Neste subconjunto serão soldadas juntas de filete, formadas pela montagem as placas de desgaste ao fundo do bojo, como indicado na FIG. 4.22.

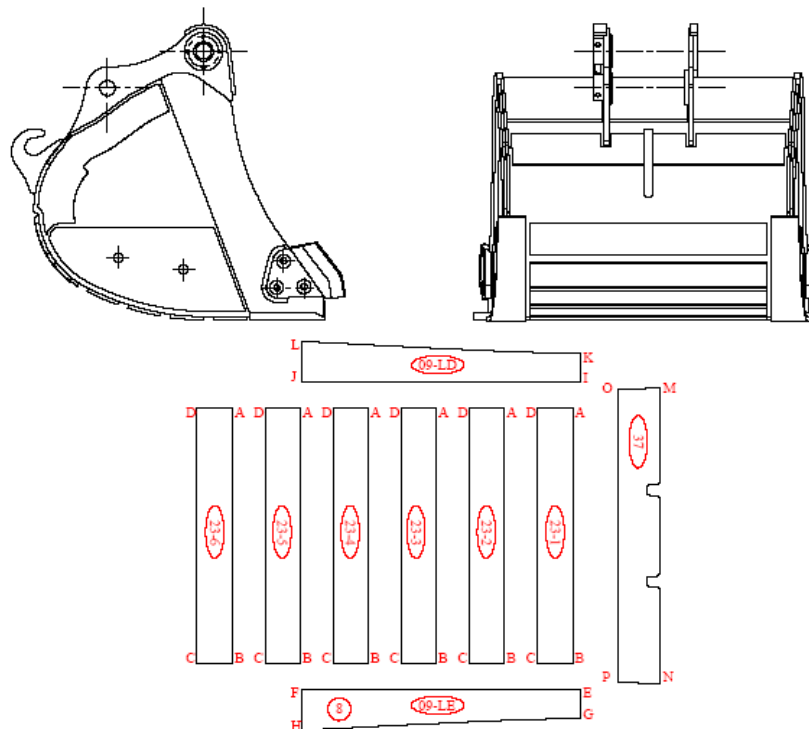


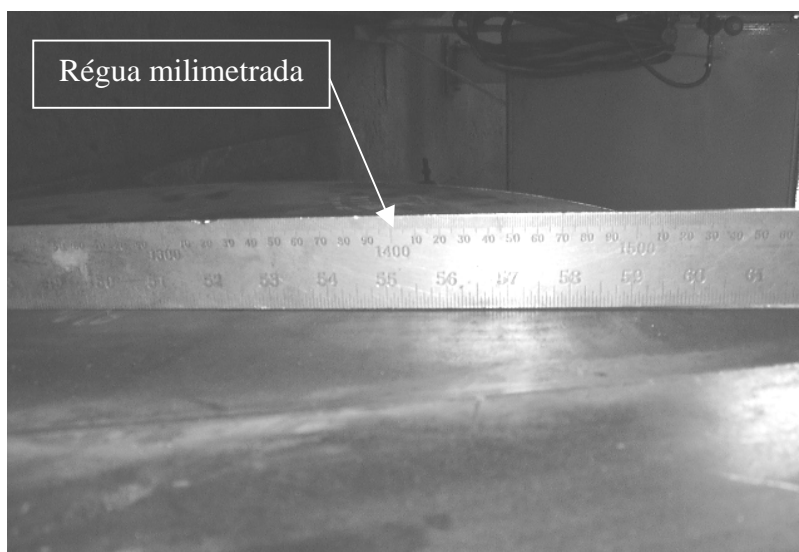
FIGURA 4.22: Subconjunto SC10.

Cada subconjunto foi analisado individualmente, considerando as juntas a soldar, a forma geométrica, as condições de pré-deformação e posição de soldagem, até concluir a montagem total do conjunto da caçamba.

Considerando que o resultado esperado da aplicação da seqüência de soldagem é a redução da distorção resultante das tensões térmicas geradas durante a soldagem, contemplou-se uma avaliação qualitativa dos resultados após a conclusão de cada subconjunto, de forma a perceber os desvios ocasionados pela distorção do material. Para isso, foram utilizados gabaritos (réguas) para a verificação do empenamento, para garantir o perfil especificado no projeto da caçamba, como apresentado nas FIG. 4.23a e FIG. 4.23b, onde a tolerância de empeno adotada é de 2mm/m.



(a)



(b)

FIGURA 4.23: Verificação de empeno pós-soldagem (a) na borda (b) na lateral.

Além disso, foi utilizada uma trena milimetrada para verificar alterações nas principais dimensões definidas pelo projeto, como demonstrado na FIG. 4.24a e FIG. 4.24b, onde a tolerância de desvio adotada é de 2mm.

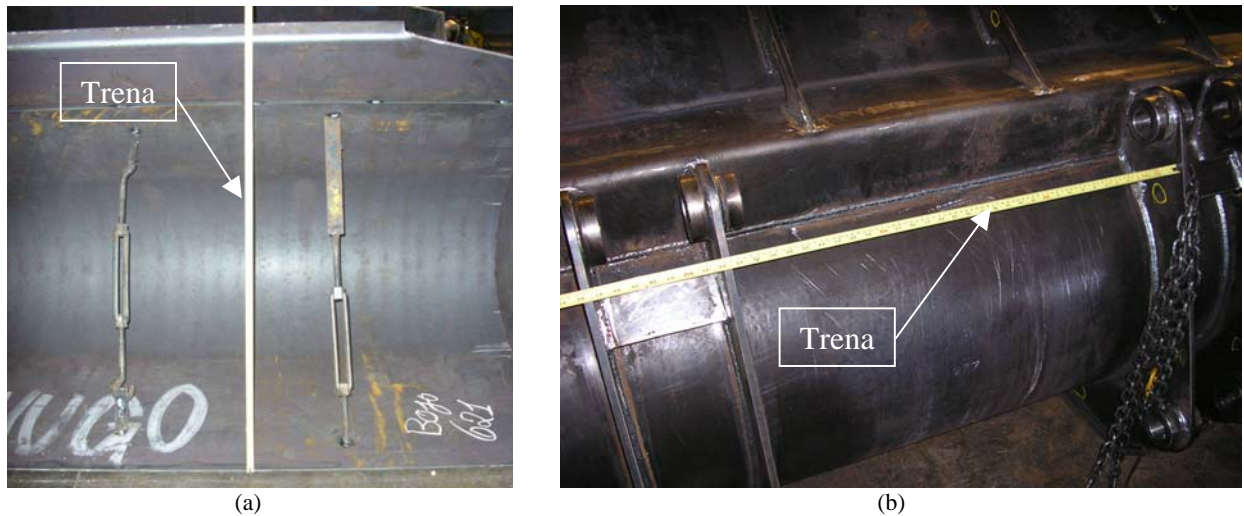


FIGURA 4.24: Verificação das dimensões (a) da abertura do bojo e (b) espaçamento entre alças.

Cada avaliação foi classificada em “SATISFATÓRIO” ou “ADMISSÍVEL” quando a distorção não provocar alterações de cunho estrutural e visual, sendo “REPROVADO” quando o contrário.

Como todo o processo de soldagem foi executado manualmente, é possível que variações de resultados ocorram. A garantia da repetibilidade do processo é menos favorável nesta condição, ao contrário do que se tem relatado quando o processo é executado por sistemas mecanizados, por exemplo os robôs.

Os parâmetros elétricos descritos, foram adquiridos durante o processo de soldagem através da leitura de um amperímetro (Corrente) e um voltímetro (Tensão). Foi considerada a experiência do soldador, tendo como orientação a aplicação do menor aporte térmico possível para se obter um bom resultado em resistência mecânica e, principalmente, reduzir ou eliminar a distorção.

Foram utilizados dispositivos e posicionadores para auxiliar a montagem e travamento das peças, para evitar empenos e facilitar a movimentação dos subconjuntos. Os posicionadores da TBM, apresentados nas FIG. 3.21 e FIG. 3.22, serviram aos propósitos descritos.

Outro recurso utilizado foi a pré-deformação da peça, próximo a junta soldada, para compensar e eliminar o empeno resultante do aporte de calor.

As seqüências desenvolvidas tiveram como base, após várias discussões, os conceitos estudados para a soldagem intercalada e simétrica, por responder de forma homogênea na distribuição de calor. Porém, como se trata da soldagem de um conjunto complexo e o objetivo é de eliminar a distorção resultante no produto final, ao montar as partes foi possível intercalar as seqüências entre elas, ou seja, para garantir a maior distribuição de calor em toda a peça, intercalou-se filetes entre duas peças que não dividem a mesma junta, mas o mesmo conjunto soldado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Toda a análise e direcionamento para encontrar a seqüência ótima de soldagem, está fundamentada cientificamente nos preceitos desenvolvidos pelos estudiosos mencionados na Revisão Bibliográfica. Porém, grande parte da colaboração técnica sobre o assunto para o desenvolvimento deste trabalho, se deve à parceria técnica e científica entre o LRSS e a TBM, entrelaçando a experiência aplicada na área de pesquisa em soldagem e o interesse no desenvolvimento do processo.

Como o desenvolvimento desta pesquisa visa a aplicação prática da metodologia da seqüência de soldagem, foram fabricadas dez caçambas, sendo que as duas primeiras foram utilizadas como um ensaio inicial para ajustar os parâmetros previamente definidos e melhorar os resultados. Para isto, foram avaliadas de forma dimensional e visual para implementar os recursos necessários para o controle total do processo.

Como parâmetro para o controle da distorção, todos os subconjuntos soldados foram avaliados nas principais dimensões, anterior a soldagem. Após a execução do processo, o subconjunto foi reavaliado, possibilitando uma análise comparativa para identificar as variações dimensionais e quantificar a magnitude destas.

Os dados são apresentados da seguinte forma:

- desenho esquemático do subconjunto;
- indicação das seqüências de soldagem por:
 - setas: identificam o sentido e a direção de soldagem para cada passe/seqüência;
 - letras e números: identificam as juntas a soldar;
 - números: identificam a ordem seqüencial dos passes de solda.
- orientações quanto ao procedimento de soldagem (parâmetros de soldagem);
- desenvolvimento de dispositivos de fixação;
- aplicação de posicionadores;
- resultados.

5.1 Descrição da montagem e soldagem dos subconjuntos da caçamba

5.1.1 Subconjunto 01 – SC01

Foram confeccionadas duas hastes de travamento posicionadas à frente do bojo, distanciadas a 400 mm da lateral cada uma, FIG. 5.1. Foram verificadas as dimensões de abertura do bojo em vários pontos com a utilização de uma trena milimetrada, como referência ao empenamento posterior a solda.

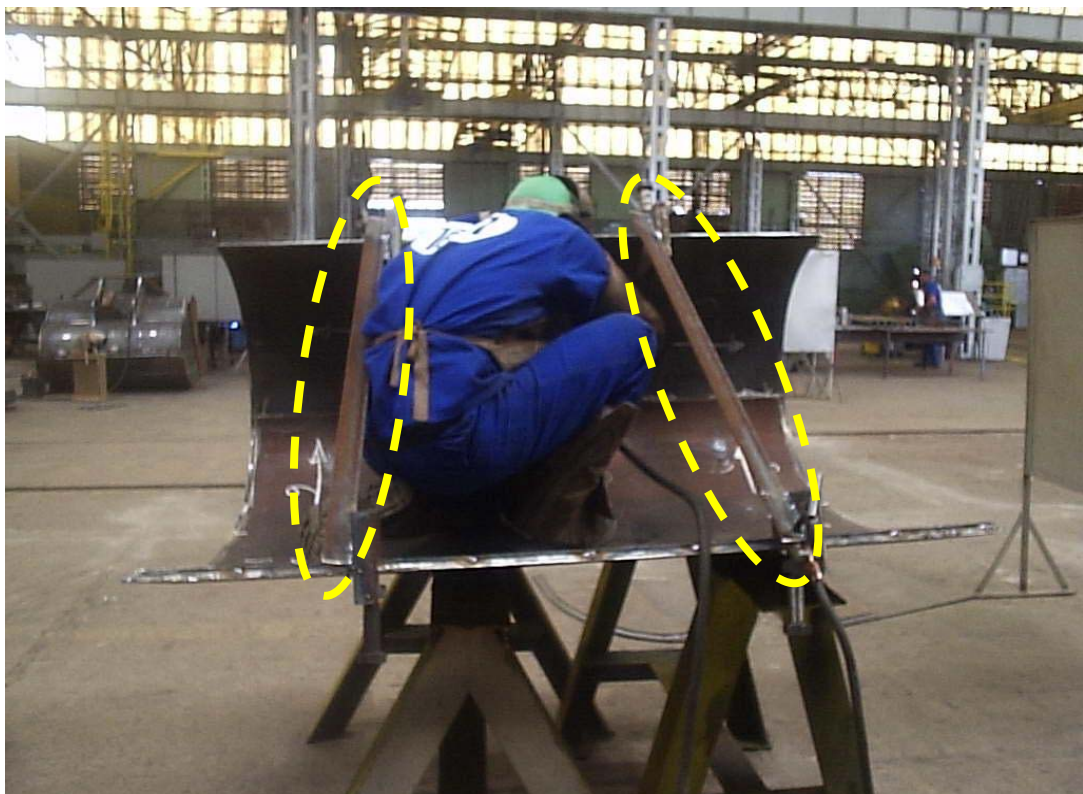


FIGURA 5.1: Dispositivo para montagem e soldagem do SC01.

A chapa de revestimento foi pré-aquecido até 260°C, na região dos bujões para soldagem posterior.

Na TAB. 5.1 são apresentados os parâmetros elétricos adquiridos na leitura dos instrumentos durante o processo.

TABELA 5.1 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC01.

Passe / Cordão	Tensão (V)	Corrente (A)
BUJÕES / C1 / C2 / C3	27	230

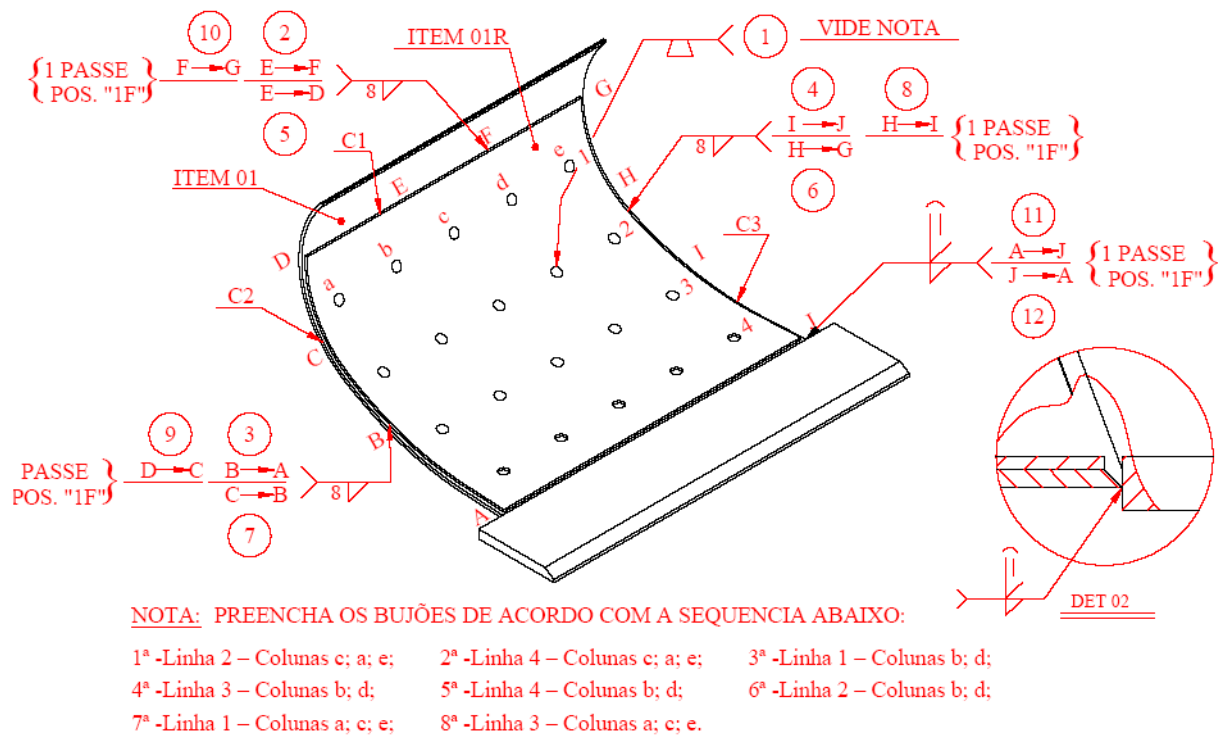


FIGURA 5.2: Seqüência de soldagem do SC01.

As juntas do subconjunto foram divididas e identificadas para facilitar a compreensão, apresentada na FIG. 5.2, tendo a seqüência dividida em duas partes. A primeira, Seqüência 01, é para a soldagem dos bujões identificados como os elementos uma matriz 4x5, onde as linhas são identificadas por números (de 1 a 4) e as colunas por letras minúsculas (de “a” a “e”). A segunda, Seqüência 02, é a soldagem das juntas lineares de filete - C1, C2, C3 e C4 - também subdivididas em 3 cordões menores cada, identificados por letras maiúsculas em suas extremidades (de “A” a “J”) e indicando o sentido da soldagem.

Para a Seqüência 01 e Seqüência 02, utilizou-se o conceito de intercalar a solda de forma simétrica para distribuir e homogeneizar gradativamente o calor em todas as regiões, sempre de dentro para fora, às extremidades das juntas.

Para facilitar a compreensão, as seqüências executadas foram as seguintes:

Seqüência 01

Preencher primeiramente os bujões, na seqüência abaixo:

- 1ª -Linha 2 – Colunas c; a; e;
- 2ª -Linha 4 – Colunas c; a; e;
- 3ª -Linha 1 – Colunas b; d;
- 4ª -Linha 3 – Colunas b; d;
- 5ª -Linha 2 – Colunas b; d;
- 6ª -Linha 4 – Colunas b; d;
- 7ª -Linha 1 – Colunas a; c; e;
- 8ª -Linha 3 – Colunas a; c; e.

Resultado 01:

Após a soldagem dos bujões foram verificadas as dimensões e concluiu-se que não houve empeno do bojo e nem do revestimento.

Seqüência 02

Esta seqüência é referente a soldagem dos filetes C1, C2, C3 e C4.

- 1ª - C1 – de E para F;
- 2ª - C2 – de B para A;
- 3ª - C3 – de I para J;
- 4ª - C1 – de E para D;
- 5ª - C3 – de H para G;
- 6ª - C2 – de C para D;
- 7ª - C3 – de H para I;
- 8ª - C2 – de D para C;
- 9ª - C1 – de F para G;
- 10ª - C4 – de A para J;
- 11ª - C4 – de J para A.

Resultado 02:

Após a soldagem dos filetes foram verificadas as dimensões e concluiu-se que não houve empeno do bojo e nem do revestimento.

5.1.2 Subconjunto 02 – SC02

O ITEM 06-LE foi posicionado na horizontal e o ITEM 07-EXT posicionado e ponteadado. Para a montagem do ITEM 07-INT, foi necessária a utilização de um calço com a mesma espessura do ITEM 07-EXT, uma vez que este já estava posicionado e ponteadado.

As juntas de filete do subconjunto foram divididas e identificadas para facilitar a compreensão, apresentada na FIG. 5.3. Como são duas arruelas, cada uma foi dividida em dois filetes – AB, BA, CD e DC.

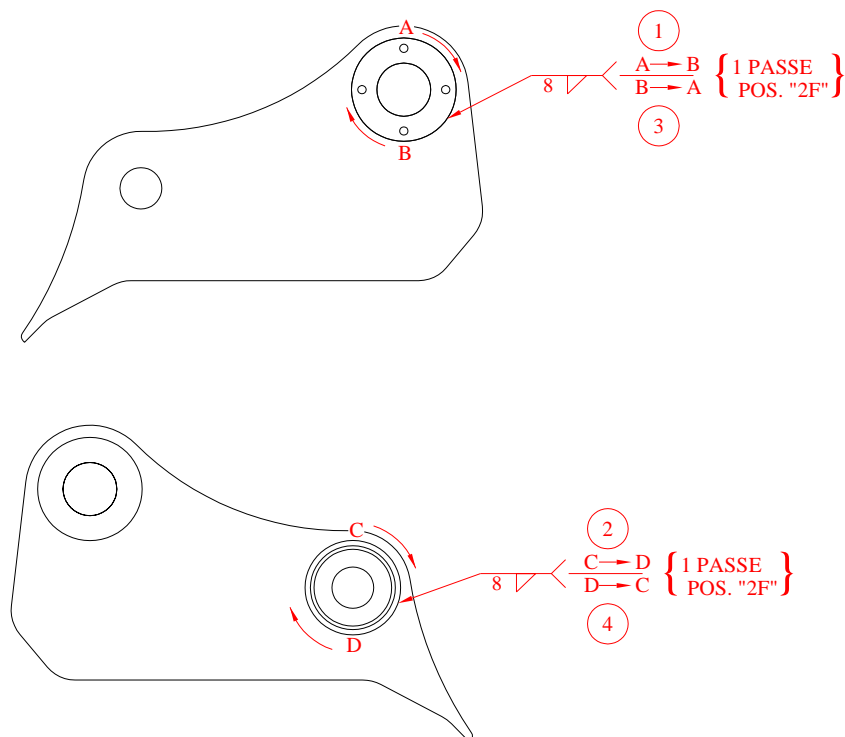


FIGURA 5.3: Seqüência de soldagem do SC02.

Para esta seqüência, utilizou-se o conceito de intercalar a solda entre as duas arruelas para distribuir e homogeneizar gradativamente o calor em todas as regiões. As seqüências foram as seguintes:

- 1^a - ITEM 07-EXT:- de A para B;
- 2^a - ITEM 07-INT:- de C para D;
- 3^a - ITEM 07-EXT:- de B para A;
- 4^a - ITEM 07-INT:- de D para C.

Na TAB. 5.2 são descritos os parâmetros elétricos adquiridos na leitura dos instrumentos durante o processo.

TABELA 5.2 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC02.

Passe / Cordão	Tensão (V)	Corrente (A)
AB / CD / BA / DC	24-27	230-240

Resultado

Após a soldagem dos filetes foram verificadas as dimensões e concluiu-se que houve empeno de 1mm/m, com resultado satisfatório às exigências de projeto.

Este empeno está associado à pequena área disponível para a distribuição de calor próxima a região de soldagem.

5.1.3 Subconjunto 03 – SC03

O ITEM 06-LD deve ser posicionado na horizontal e ter os ITEM 07-EXT-LD posicionados e ponteados. Para a montagem do ITEM 07-INT, já não será necessária a utilização de um calço, pois são duas peças de cada lado.

Na TAB. 5.3 são apresentados os parâmetros elétricos adquiridos na leitura dos instrumentos durante o processo.

TABELA 5.3 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC03.

Passe / Cordão	Tensão (V)	Corrente (A)
AB / BA / CD / DC / EF / FE / GH / HG	24-27	230-240

As juntas de filete do subconjunto foram divididas e identificadas para facilitar a compreensão, demonstrada na FIG. 5.4. São quatro arruelas, cada uma dividida em dois filetes – AB, BA, CD, DC, EF, FE, GH e HG.

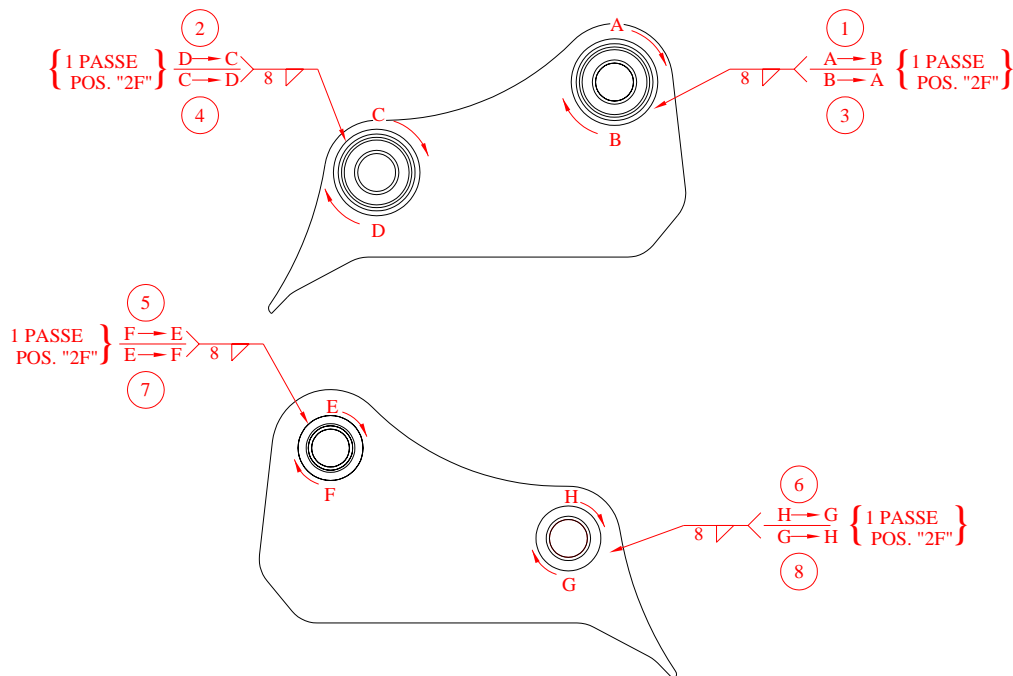


FIGURA 5.4: Seqüência de soldagem para o SC03

Para esta seqüência, utilizou-se o conceito de intercalar a solda entre as duas arruelas de um lado da alça, para distribuir e homogeneizar gradativamente o calor em todas as regiões.

As seqüências foram as seguintes:

- 1ª - ITEM 07-EXT-LD: de A para B;
- 2ª - ITEM 07-EXT-LD: de D para C;
- 3ª - ITEM 07-EXT-LD: de B para A;
- 4ª - ITEM 07-EXT-LD: de C para D;
- 5ª - ITEM 07-INT: de F para E;
- 6ª - ITEM 07-INT: de H para G;
- 7ª - ITEM 07-INT: de E para F;
- 8ª - ITEM 07-INT: de G para H.

- Resultado

Após a soldagem dos filetes foram verificadas as dimensões e concluiu-se que houve empeno de 1mm/m, resultado satisfatório às exigências de projeto.

Este empeno está associado à pequena área disponível para a distribuição de calor próxima a região de soldagem.

5.1.4 Subconjunto 04 – SC04

Foi realizado um procedimento de solda deste subconjunto, sem travamento e posicionadores. Conseqüentemente, o resultado não foi satisfatório. Houve empeno das extremidades do complemento do bojo e o fechamento entre as alças, fazendo-se necessário o desempenho do subconjunto. Além da dificuldade de manuseio do subconjunto com a ponte rolante, para posicionar para a soldagem, demandando tempo em excesso. Sendo assim, foram realizadas alterações no procedimento e o desenvolvimento de dispositivos.

Foi confeccionado um dispositivo de travamento entre as alças e o complemento do bojo, destacado na FIG. 5.5, para minimizar o empeno e o fechamento do subconjunto soldado e evitar o retrabalho de desempenho.

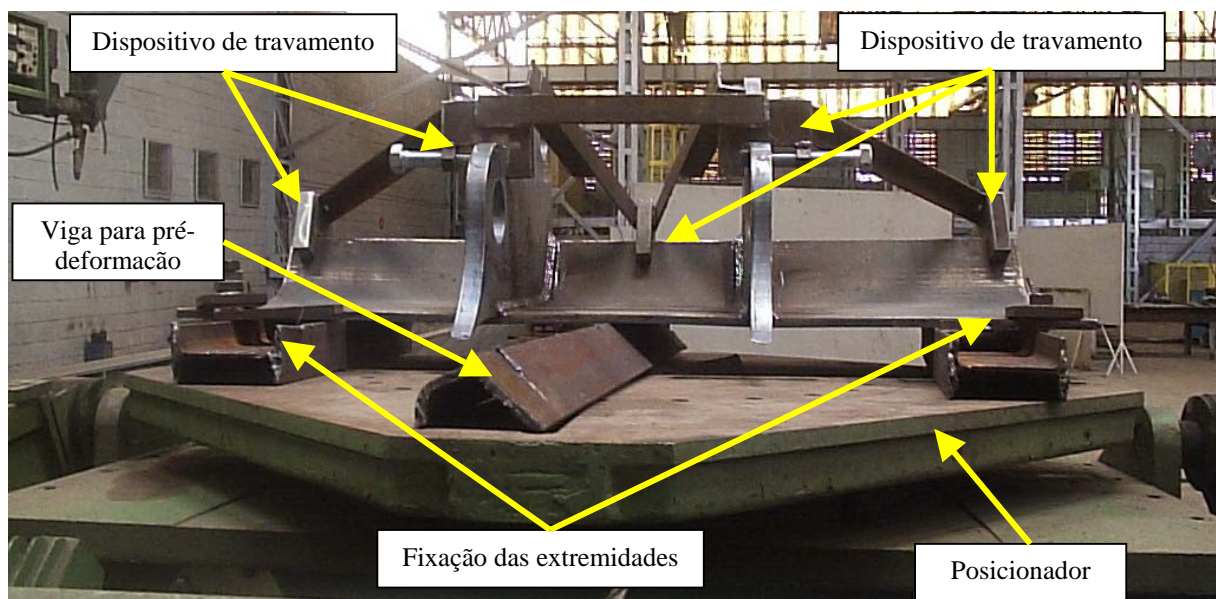


FIGURA 5.5: Dispositivo de fixação do SC04.

O SC04 foi montado no posicionador rotativo, para facilitar o manuseio para melhoria do acesso às juntas a serem soldadas, FIG. 5.5 e FIG. 5.6. Dessa forma, o soldador realiza a solda sempre na posição plana horizontal e favorece a formação do cordão de solda com maior controle da posição da tocha e velocidade de avanço.

Foi utilizado um perfil “L” montado sob o centro da viga para pré-deformá-la ao fixar as extremidades, conforme pode ser visualizado na FIG. 5.5.



FIGURA 5.6: Subconjunto SC04 acoplado ao posicionador para soldagem

Foram verificadas as dimensões em vários pontos entre as alças como referência a empenamento posteriormente a solda.

Na TAB. 5.4 são apresentados os parâmetros elétricos adquiridos na leitura dos instrumentos durante o processo.

TABELA 5.4 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC04.

Passe / Cordão	Tensão (V)	Corrente (A)
AB / DC / AC	35-37	210-220

O SC04, assim como os anteriores, teve as juntas subdivididas – AB, CD e AC – a mesma divisão para as duas alças, FIG. 5.7.

A seqüência foi desenvolvida de forma a equilibrar as tensões sobre as alças, por isso cada cordão teve um semelhante executado no outro lado da junta e no mesmo sentido. O passe AB é iniciado a 50mm do início da curvatura para evitar que esta sofra alguma alteração na conformação.

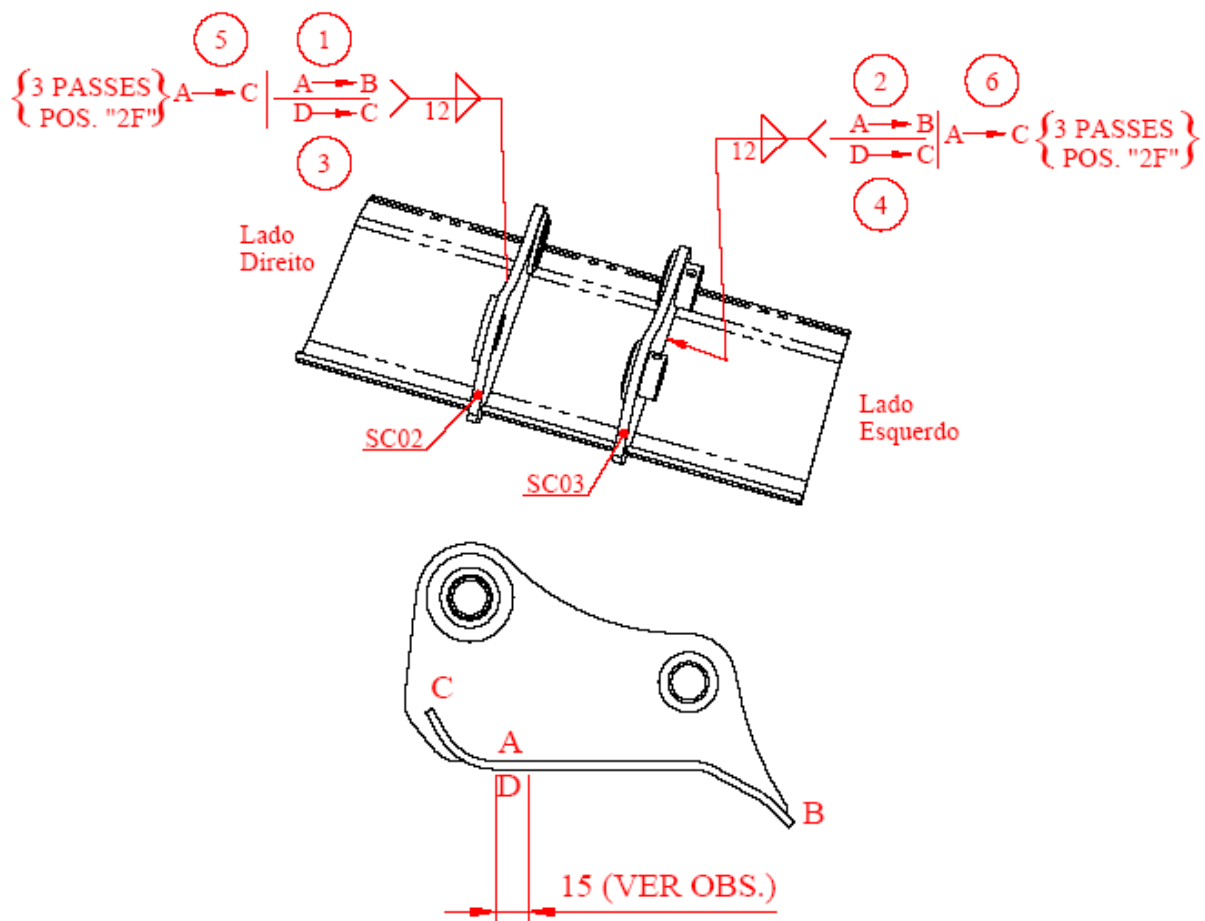


FIGURA 5.7: Seqüência de soldagem do Subconjunto SC04

A seqüência foi a seguinte:

- 1ª - ITEM 35/SC02: lado direito de A para B;
- 2ª - ITEM 35/SC02: lado esquerdo de A para B;
- 3ª - ITEM 35/SC03: lado direito de A para B;
- 4ª - ITEM 35/SC03: lado esquerdo de A para B;

- 5ª - ITEM 35/SC02: lado direito de D para C;
- 6ª - ITEM 35/SC02: lado esquerdo de D para C;
- 7ª - ITEM 35/SC03: lado direito de D para C;
- 8ª - ITEM 35/SC03: lado esquerdo de D para C;
- 5ª - ITEM 35/SC02: de A para C;
- 6ª - ITEM 35/SC03: de A para C.

Resultado:

Após a soldagem dos filetes foram verificadas as dimensões e concluiu-se que houve redução considerável do empeno, de 30mm/m para 2mm/m, sendo satisfatório e admissível para o projeto.

5.1.5 Subconjunto 05 – SC05

O SC05 foi montado no posicionador, com o dispositivo de travamento utilizado no SC04. Desta forma, a posição é garantida uma vez que na soldagem do subconjunto anterior o resultado alcançado foi positivo.

Na TAB. 5.5 são apresentados os parâmetros elétricos adquiridos na leitura dos instrumentos durante o processo.

TABELA 5.5 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC05.

Passe / Cordão	Tensão média (V)	Corrente média (A)
AB / CD / DC / EB / EC / FD / FA	35-37	210-220

No SC05, utilizou-se o mesmo conceito desenvolvido no SC04. Seccionou-se os filetes de forma a dividir ao máximo a concentração de calor e distribuir as tensões térmicas geradas para equilibrar e minimizar as contrações, FIG. 5.8.

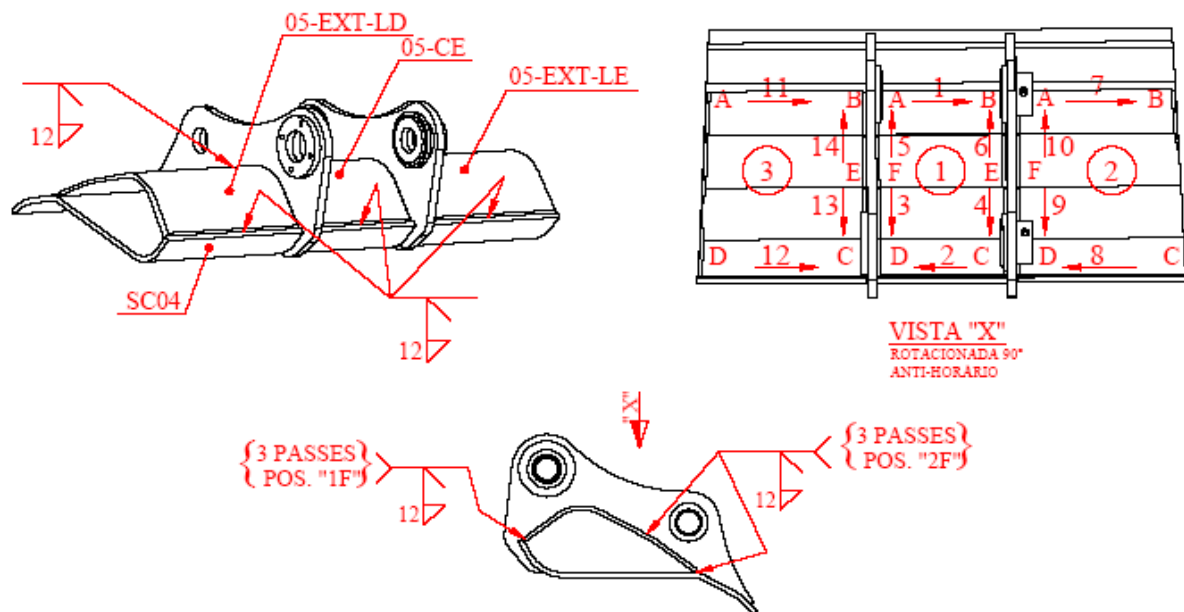


FIGURA 5.8: Seqüência de soldagem do Subconjunto SC05

Como são três peças soldadas, FIG. 5.8, definiu-se que a primeira a ser soldada seria a do meio (05-CE) e posteriormente as duas laterais. O calor tende a ser conduzido por toda a peça até suas extremidades, provocando um pseudo-pré-aquecimento. Primeiramente foram executadas as soldas das juntas da viga com o complemento – AB e CD – em sentidos contrários. A seguir foram executadas as soldas das juntas da viga com as alças – FD, EC, FA e EB, intercalando-as entre as alças, no sentido de dentro para fora. Posteriormente, foi realizada a solda da viga esquerda (05-EXT-LE), fazendo a mesma seqüência anterior. Idem para a solda da viga direita (05-EXT-LD). Deve-se salientar, que o sentido das soldas foram definidos em função do calor já distribuído.

Para facilitar a compreensão, abaixo está listada a seqüência realizada.

Cada seqüência foi alternada entre os passes:

1º passe: **Seq I - Seq II - Seq III**

2º passe: **Seq II - Seq III - Seq I**

3º passe: **Seq I - Seq II - Seq III**

Seq I – Executou a soldagem para o ITEM 05-CE, observando a seqüência:

- 1^a - ITEM 05/SC04: de A para B;
- 2^a - ITEM 05/SC04: de C para D;
- 3^a - ITEM 05/SC04: de F para D;
- 4^a - ITEM 05/SC04: de E para C;
- 5^a - ITEM 05/SC04: de F para A;
- 6^a - ITEM 05/SC04: de E para B.

Seq II – Executou a soldagem para o ITEM 05-EXT-LD, observando a seqüência:

- 1^a - ITEM 05/SC04: de A para B;
- 2^a - ITEM 05/SC04: de C para D;
- 3^a - ITEM 05/SC04: de E para D;
- 4^a - ITEM 05/SC04: de E para A.

Seq III – Executou a soldagem para o ITEM 05-EXT-LE, observando a seqüência:

- 1^a - ITEM 05/SC04: de A para B;
- 2^a - ITEM 05/SC04: de D para E;
- 3^a - ITEM 05/SC04: de C para D;
- 4^a - ITEM 05/SC04: de C para B.

Resultado:

Após a soldagem dos filetes foram verificadas as dimensões e concluiu-se que houve pouco empeno, porém, sendo satisfatório e admissível para o projeto, FIG. 5.9.



FIGURA 5.9: Vista da viga já soldada.

5.1.6 Subconjunto 06 – SC06

No procedimento para o SC06, o qual estava sem travamento, o primeiro resultado não foi satisfatório, pois ocorreu empeno da lateral ao longo do filete maior ao centro da lateral, como é possível visualizar na FIG. 5.10. Para solucionar o problema, foram aplicados os recursos descritos.

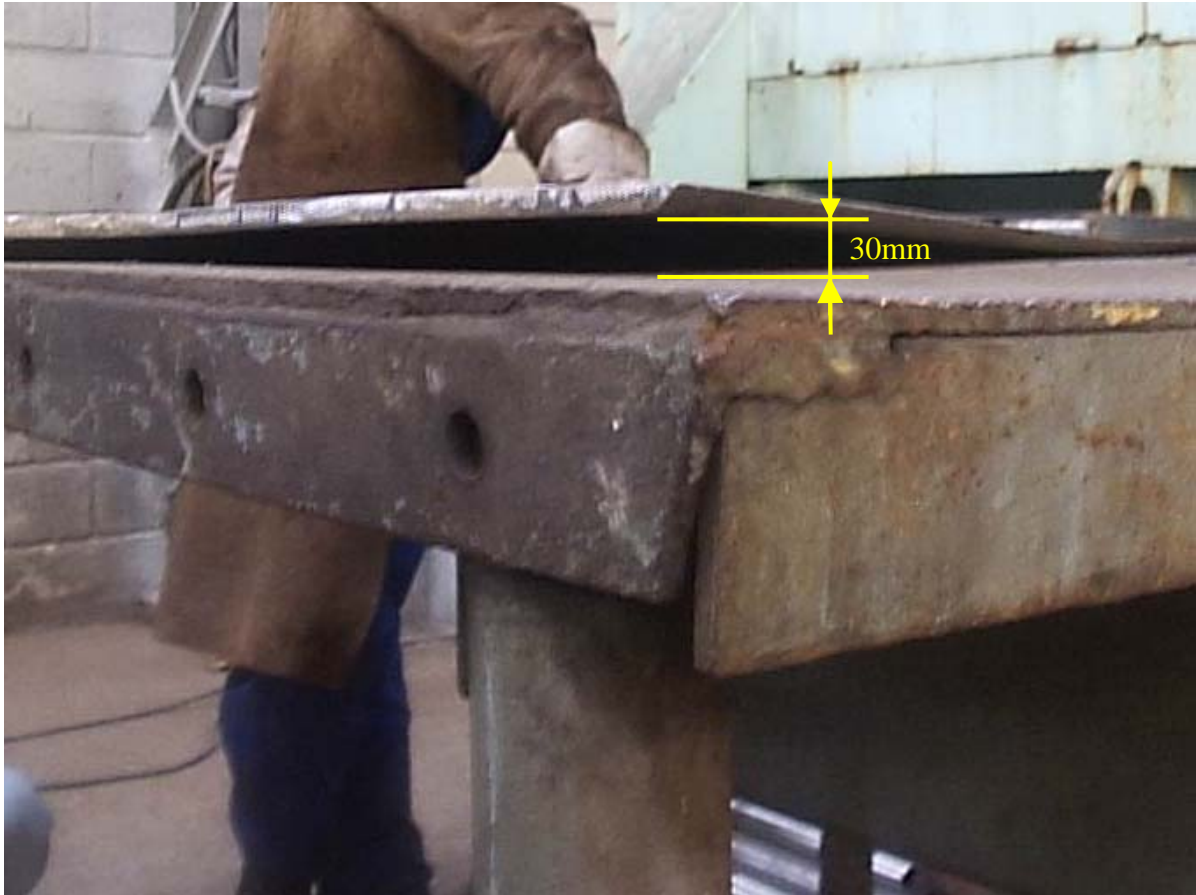


FIGURA 5.10: Lateral empenada após soldagem sem seqüência e fixação

Foram fixados à mesa de soldagem travamentos de cunha (“cachorro”) em vários pontos da lateral e foi aplicada uma pré-deformação ao longo da junta central, uma barra de 10mm, para reduzir o empeno longitudinal da lateral, demonstrados na FIG. 5.11.

A intenção de pré-deformar e restringir os movimentos da lateral visa o retorno a posição ideal no momento em que as cunhas forem retiradas, uma vez que já se sabe qual o resultado quando a solda é executada e a peça está livre.

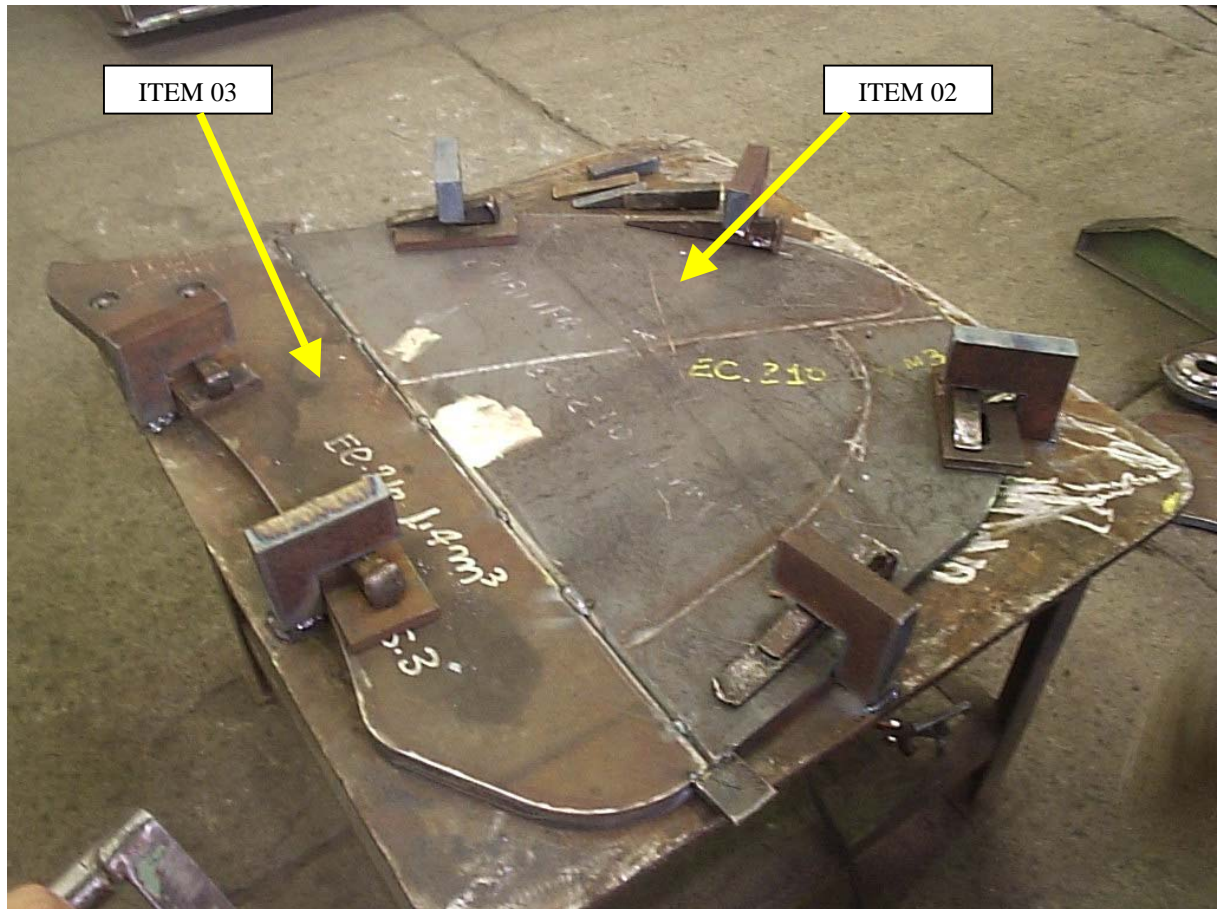


FIGURA 5.11: Mesa de fixação para a soldagem do SC06

Na TAB. 5.6 são apresentados os parâmetros elétricos adquiridos na leitura dos instrumentos durante o processo.

TABELA 5.6 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC06.

Passe / Cordão	Tensão (V)	Corrente (A)
TODOS	35-37	210-220

Aplicando o conceito de intercalar a solda, a seqüência de soldagem foi dividida em mais cordões para distribuir e homogeneizar com mais eficácia o calor aplicado. Partindo sempre do centro e buscando as extremidades. Desta forma o calor gera as tensões térmicas a favor, equilibrando-as e eliminando as distorções. Para determinar a ordem, foi adotado o princípio das extremidades opostas até fechar todo o circuito, mantendo o balanceamento entre estas e a distribuição de calor.

Na FIG. 5.12 pode-se acompanhar a seqüência realizada na soldagem, pela numeração detalhada e o sentido do cordão conforme a seta, exatamente.

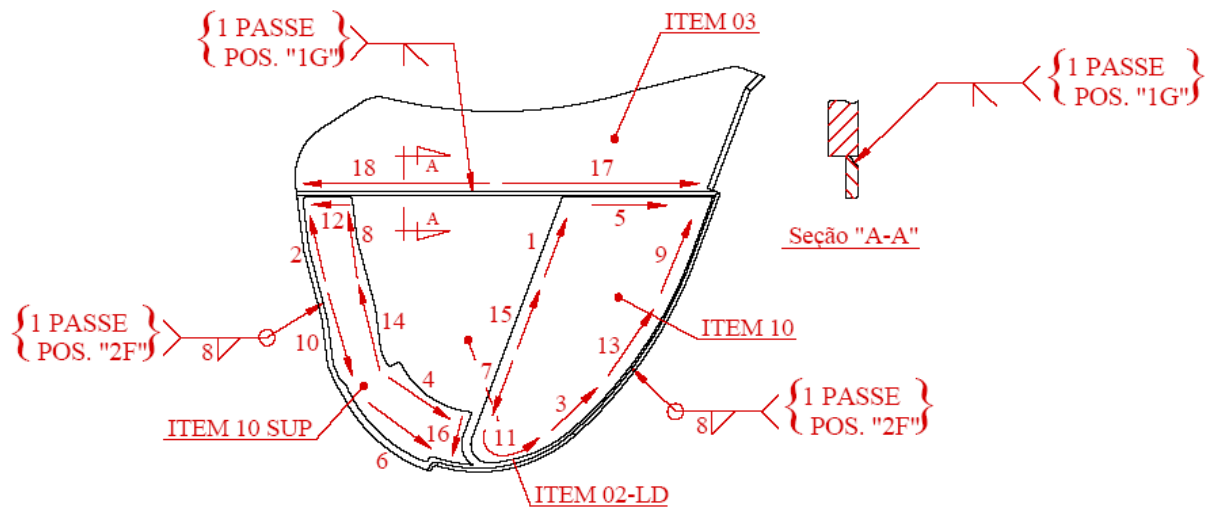


FIGURA 5.12: Seqüência de soldagem para o SC06

Resultado:

Após a soldagem dos filetes foi verificado o grau de empeno e concluiu-se que houve peças com empeno mínimo sendo satisfatório e admissível para o projeto e outras com grau de empeno zero.

5.1.7 Subconjunto 07 – SC07

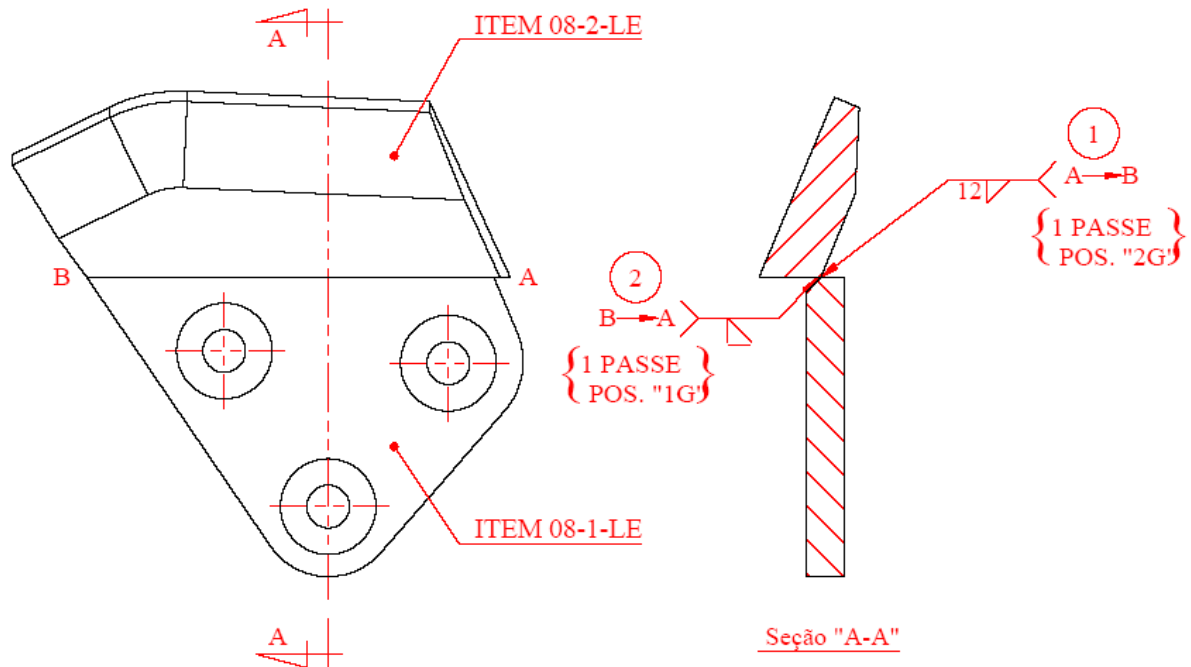
O ITEM 08-1 deve ser posicionado na horizontal para o posicionamento do ITEM 08-2. Eles devem ser posicionados e ponteados, verificando o lado correto indicado no desenho.

Por se tratar de uma peça pequena, o único cuidado que se teve ao especificar a seqüência de soldagem foi o de garantir o sentido de soldagem para os dois lados. Uma vez iniciada a soldagem no ponto A e finalizada no ponto B, ao realizar a solda do outro lado da junta, o ponto A estará mais frio, devendo então iniciar pelo ponto B para se equilibrar as tensões térmicas atuantes no momento, como especificado na FIG. 5.13.

Na TAB. 5.7 são descritos os parâmetros elétricos adquiridos na leitura dos instrumentos durante o processo.

TABELA 5.7 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC07.

Passe / Cordão	Tensão (V)	Corrente (A)
AB	35-37	210-220



Nota: Usar o mesmo procedimento para o lado oposto.

FIGURA 5.13: Seqüência de soldagem para o SC07

Resultado:

Após a soldagem foi verificado o grau de empeno, sendo satisfatório e admissível para o projeto.

5.1.8 Subconjunto 08 e 09 – SC08 e SC09

O SC08 compõe-se do SC01 (bojo e revestimento), SC05 (viga do complemento do bojo) e SC06 (laterais esquerda e direita).

Para os subconjuntos SC01 e SC05 a soldagem foi feita utilizando as laterais como travamento, ou seja, soldou-se as laterais (SC06) primeiro, Seqüência 01, e somente após a soldagem das laterais é que foi executada a soldagem da viga (SC05), Seqüência 02.

Os três subconjuntos citados acima foram ponteados de modo a manter as peças em sua real posição de projeto. Após o ponteamto, visto que as peças se encontravam travadas, as mesmas foram soldadas conforme a seqüência.

Este método aplicado, utilizando as próprias partes para travar o conjunto, foi possível uma vez que as outras partes já se apresentavam soldadas e rígidas, com menos riscos de empenamento pós-soldagem. Mesmo assim, foram desenvolvidas seqüências específicas, sempre considerando os métodos utilizados anteriormente distribuindo o calor homogeneamente, pois essa restrição pelos próprios subconjuntos pode provocar tensões residuais prejudiciais ao conjunto concluído.

Seqüência 01:

A Seqüência 01, demonstrada na FIG. 5.14, foi realizada primeiramente externamente de A para B e de C para B, tanto do lado esquerdo quanto do lado direito, sempre na posição horizontal plana. Posteriormente foi realizada internamente de B para A e de B para C, iniciando no primeiro lado soldado anteriormente.

Na TAB. 5.8 são descritos os parâmetros elétricos adquiridos na leitura dos instrumentos durante o processo.

TABELA 5.8 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC09.

Passe / Cordão	Tensão (V)	Corrente (A)
AB / BC	35-37	210-220

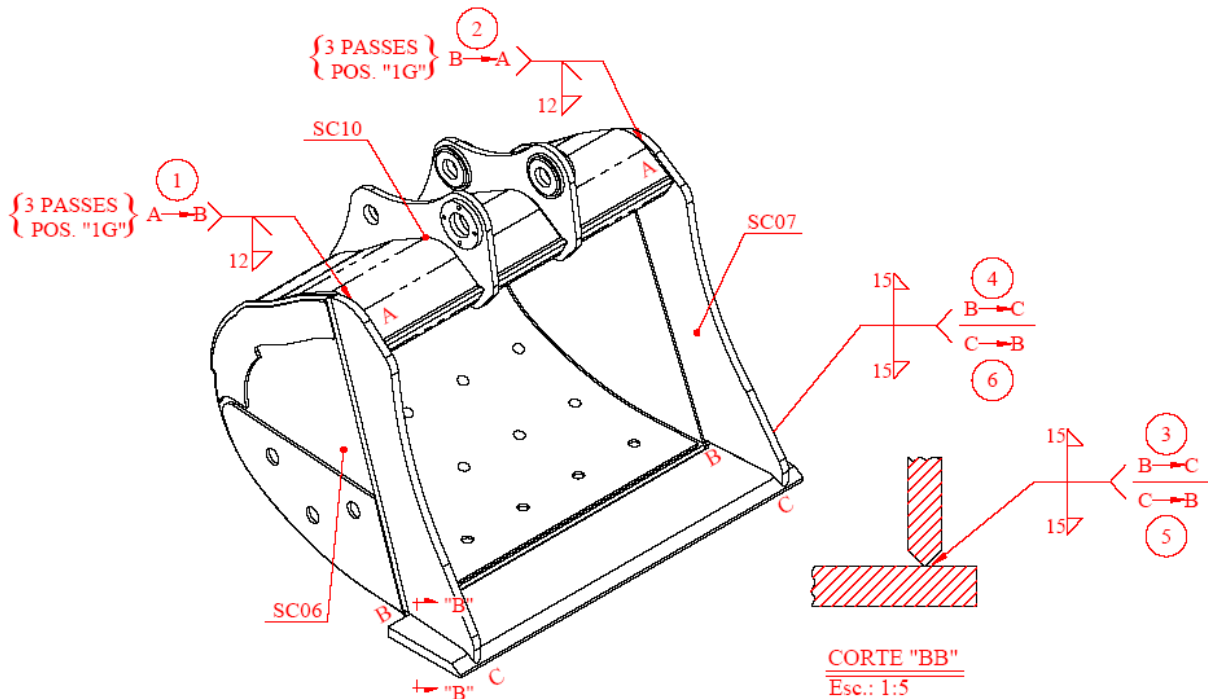


FIGURA 5.14: seqüência de soldagem para o SC09

Resultado 01:

Após a soldagem dos filetes foi verificado o grau de empeno sendo satisfatório e admissível para o projeto, pois, apesar de ter sido notado um pequeno empeno das laterais, empeno este também notado e em maior grau quando a caçamba foi soldada pelo processo anterior e ainda, foi possível constatar que tal empeno era facilmente controlado quando as laterais apresentavam o ITEM 03 em sua montagem.

Seqüência 02:

A Seqüência 02, soldagem da viga com o bojo, é realizada em um passe só de cada lado. Inicialmente soldou-se internamente de A para B. posteriormente externamente de B para A, ambos na posição horizontal plana, como demonstrado na FIG. 5.15.

Na TAB. 5.9 são descritos os parâmetros elétricos adquiridos na leitura dos instrumentos durante o processo.

TABELA 5.9 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC08.

Passe / Cordão	Tensão (V)	Corrente (A)
AB	35-37	210-220

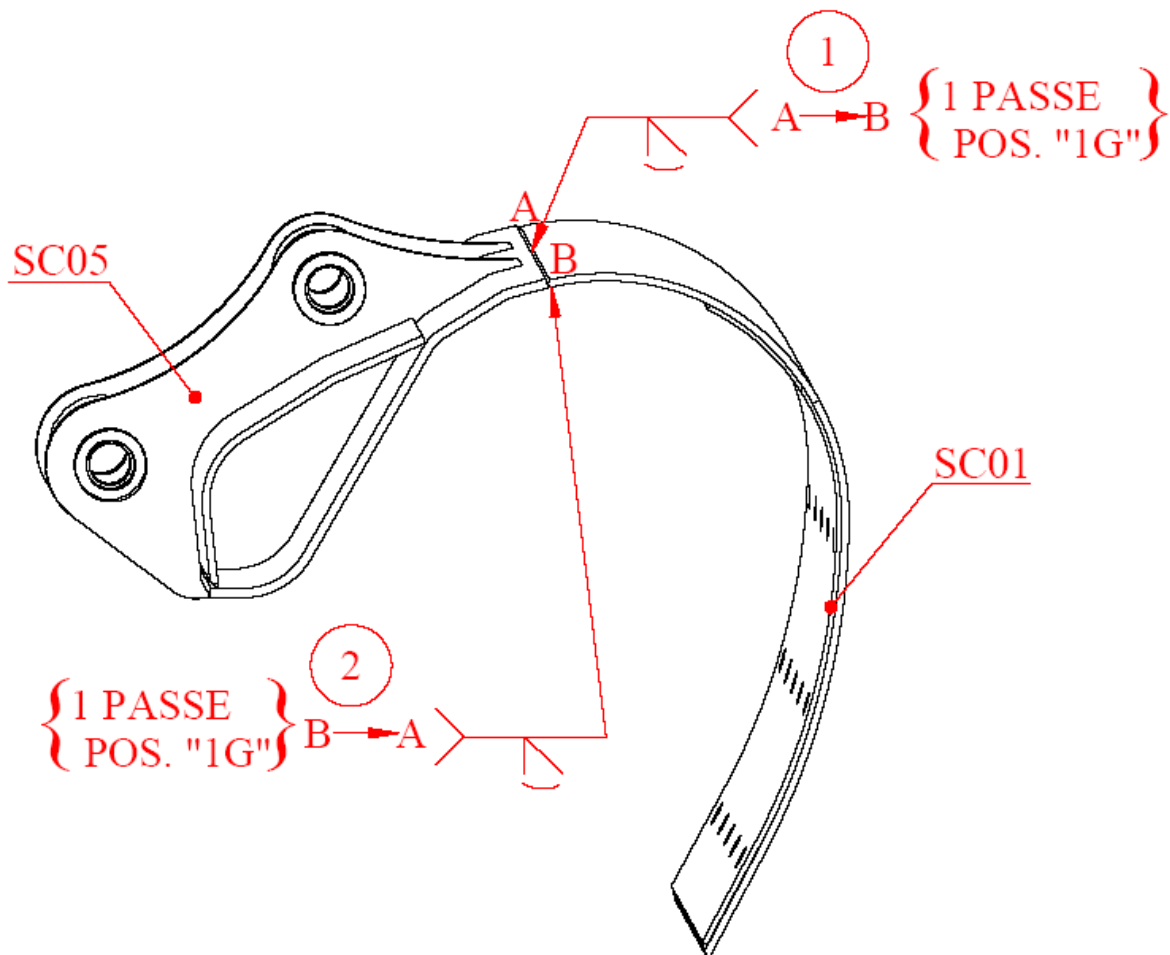


FIGURA 5.15: seqüência de soldagem para o SC08

Resultado 02:

Após a soldagem dos filetes foi verificado o fechamento do bojo e viga. Como as laterais já haviam sido soldadas, com o objetivo de enrijecer o conjunto soldado, não ocorreu variação dimensional nesta fase, sendo satisfatório o resultado.

Como comparação, a FIG. 5.16 apresenta o resultado da soldagem realizada pela seqüência de soldagem especificada neste estudo. Neste caso, é perceptível o ótimo resultado sem distorções no conjunto soldado.



FIGURA 5.16: Montagem do conjunto SC09 de acordo com a seqüência

Já a FIG. 5.17 apresenta o resultado da soldagem aleatória, sem seqüência de soldagem já no segundo houve a necessidade de desempenar as partes distorcidas, sendo necessário utilizar recursos pós-fabricação para a correção da distorção, como aquecimentos e travamentos.

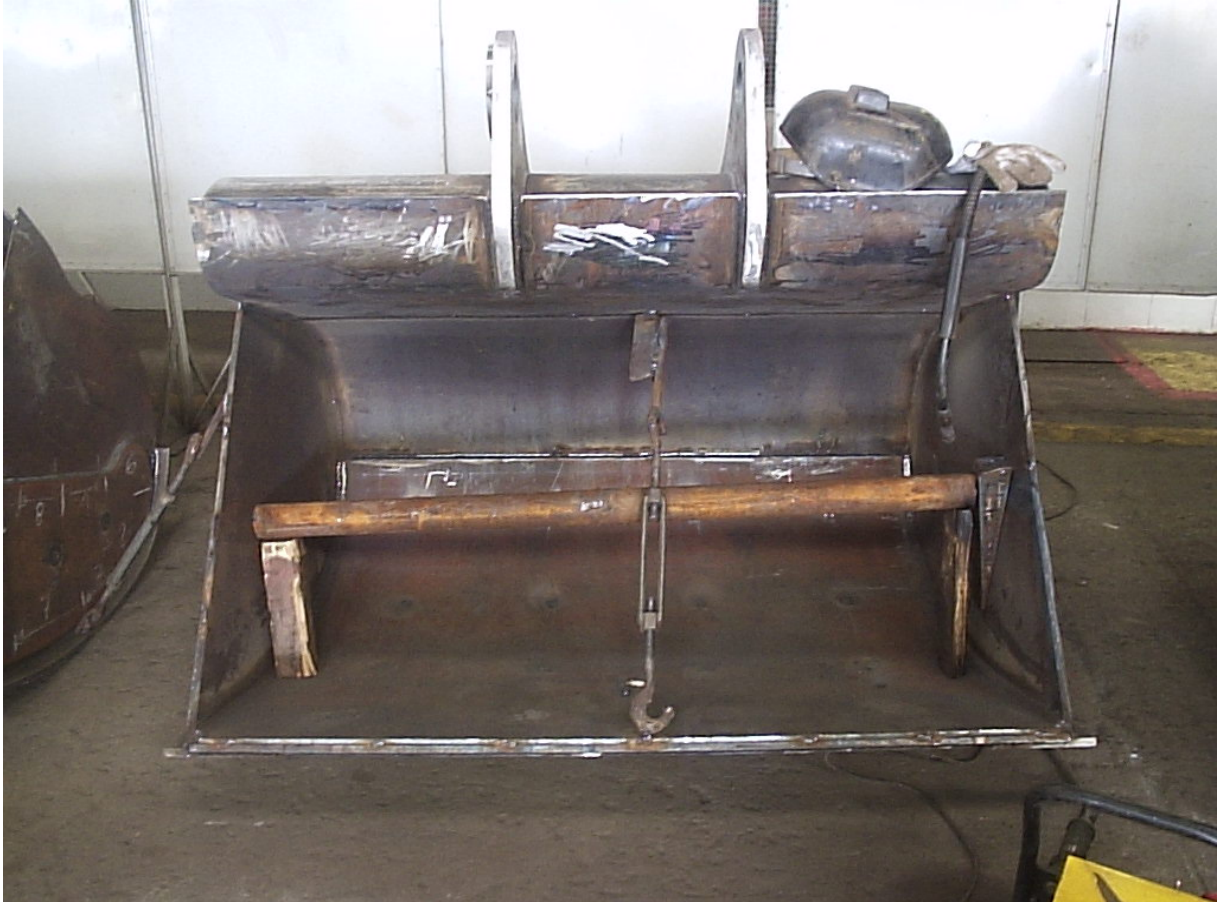


FIGURA 5.17: Montagem do conjunto SC09 feito pelo processo anterior

5.1.9 Subconjunto 10 – SC10

O SC10 compõe-se do SC09 e de todos os revestimentos externos à caçamba.

Os revestimentos foram ponteados de modo a manter as peças em sua real posição de projeto.

Seqüência de Soldagem

Neste caso, foi considerado o mesmo raciocínio de rigidez aplicado no subconjunto anterior. Uma vez já tendo as partes principais do conjunto soldadas e rígidas, garantiu-se assim a restrição a distorção provocada pelas tensões térmicas. Porém, a mesma preocupação na geração de tensões residuais foi considerada e justificando a elaboração de uma seqüência de

soldagem eficiente na prevenção destas, que podem vir a prejudicar o produto final em sua utilização em campo. Sendo assim, a seqüência previu as mesmas condições de distribuição de calor e equilíbrio das tensões térmicas atuantes, soldando intercalada e simetricamente, como demonstrado na FIG. 5.18.

Primeiramente foram soldados os itens 23 de A para B e de C para D, seguindo a seqüência de 1 a 6, como identificado na FIG. 5.18. Posteriormente foram soldadas as laterais de D para A e de C para B na mesma seqüência de 1 a 6. Logo após foi soldado o item 37 de M para N, de O para P, de P para N e de O para M. Posteriormente, foram soldados os itens 09 direito e esquerdo, utilizando a seqüência para o lado esquerdo de E para F, de G para H, de G para E e de H para F. A seqüência para o lado direito é de I para J, de K para L, de K para I e de L para J.

Na TAB. 5.10 são descritos os parâmetros elétricos adquiridos na leitura dos instrumentos durante o processo.

TABELA 5.10 – Parâmetros elétricos de soldagem para o SC10.

Passe / Cordão	Tensão (V)	Corrente (A)
TODOS	35-37	210-220

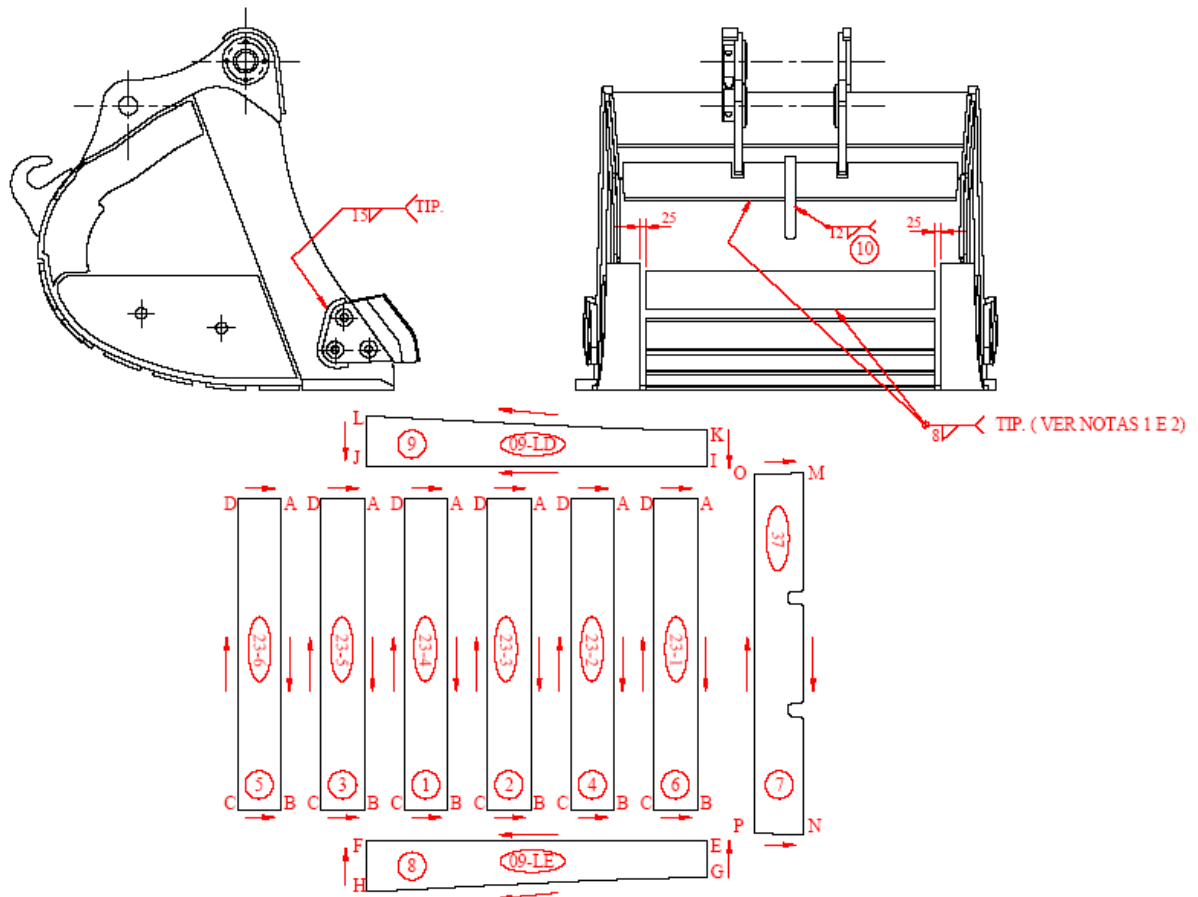


FIGURA 5.18: Seqüência de soldagem para o SC10

Resultado:

O resultado encontrado foi bastante satisfatório visto que as caçambas já se encontravam praticamente prontas, ou seja, sua estrutura já se encontrava rígida o bastante para não sofrer qualquer deformação.

As FIG. 5.19 e FIG. 5.20 apresentam a caçamba finalizada e pintada.



FIGURA 5.19: Montagem da caçamba finalizada. (Vista Frontal)



FIGURA 5.20: Montagem da caçamba finalizada. (Vista Lateral)

6 CONCLUSÕES

A partir do desenvolvimento deste trabalho, realizado em parceria entre o Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação e a TBM Máquinas e Equipamentos LTDA, com o objetivo de garantir as características dimensionais e funcionais através do estudo de seqüências ótimas de soldagem para conjuntos complexos, pode-se concluir que:

A seqüência de soldagem tem um efeito considerável na distorção por solda, reduzindo-a e até eliminando-a, o que possibilita ganhos em produtividade e economia, uma vez que a recuperação por desempenho não se faz necessária, inclusive, contribuindo visualmente no resultado final. Ou seja, o objetivo desta pesquisa foi alcançado.

Conjuntos complexos e de diferentes configurações geométricas soldadas, podem obedecer várias seqüências de soldagem disponíveis que dependem das restrições que ocorrem durante o procedimento de soldagem. O próprio conjunto pode ser responsável em restringir as contrações causadas pelas tensões térmicas geradas durante a soldagem. O uso de subconjuntos é prático, produtivo e permite várias possibilidades de seqüências de soldagem.

Em comprimentos longos de juntas de solda, deve-se dividir ao máximo o cordão de solda para realizá-lo pelo método da seqüência intercalada e simétrica, que se inicia do centro para as extremidades. Porém, essa divisão deve ser aliada à produtividade. Além disso, ao realizar as emendas das divisões, deve-se atentar para a preparação do cordão, realizando o acabamento nas extremidades a serem unidas por continuidade do passe posterior, a chamada “unha”. Esta medida evita problemas como inclusões e descontinuidades nestes pontos.

O pré-aquecimento é uma ferramenta que contribui muito para o bom desenvolvimento da seqüência de soldagem, uma vez que se objetiva a homogeneização do calor distribuído na região de solda e periferias e, ainda, garantir a prevenção da formação de trincas a quente e a frio, determinado pela análise do carbono equivalente (CEq).

Sempre que a seqüência de soldagem não solucionar por completo o problema da distorção, a pré-deformação poderá ser utilizada, uma vez que já se sabe o resultado da soldagem com a peça livre de restrições.

Como os critérios avaliados e utilizados para o desenvolvimento das seqüências de soldagem apresentaram ótimos resultados, é viável desenvolver um algoritmo para modelar e determinar seqüências ótimas de soldagem para conjuntos complexos com o objetivo de reduzir as distorções causadas pelo processo de soldagem.

Com os resultados obtidos a partir da metodologia de estudo das seqüências de soldagem, é determinante afirmar que o objetivo descrito foi alcançado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função dos ótimos resultados alcançados e visando a melhoria constante na área metal-mecânica, que ainda apresenta uma grande variedade de parâmetros a serem estudados, são propostos temas para trabalhos futuros que venham a complementar este estudo.

- Monitorar e quantificar a evolução da distorção em diferentes materiais e diferentes geometrias, com seqüências diferentes de soldagem;
- Analisar os resultados de forma estatística e limitar os fatores determinantes no processo de distorção do componente soldado;
- Desenvolver um algoritmo para analisar seqüências de soldagem para diferentes geometrias e complexas;
- Realizar as seqüências de soldagem desenvolvidas por um sistema robotizado, monitorando a repetibilidade do processo e otimizando a produtividade, uma vez que, tendo a seqüência de soldagem e implementando-a no sistema robotizado, a execução é contínua sem o problema da fadiga que afeta o ser humano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, Tony. Thermal distortion in aluminum welded structures. *Welding Journal*: p. 28 – 30, Fev. 2003.

AWS. *Welding Handbook; Welding technology*. Miami: American Welding Society, 8° ed. V.1: p. 223 – 264, 1987.

AWS. Prevention and control of weld distortion. *Welding Journal* 80 (10): p. 97 – 100, Out. 2001.

AWS. *Structural Welding Code: Steel – ANSI / AWS D1.1-90*. Miami: American Welding Society, 12ª ed., 1990.

Bezerra, A. C., Scotti, A., Rade, D. A. Efeito do preaquecimento sobre tensões residuais de soldagem. *Soldagem & Inspeção, ABS, São Paulo*, 11 (1): p. 54 – 61, Ago. 1998.

Bohn, H. G. Controlling distortion. P: 217 – 228.

Cullison, A. Stress relief basics. *Welding Journal*, 80 (9): p. 49, Set. 2001.

Doumanidis, C. C. A model for in-process control of thermal properties during welding. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 111: p. 40 – 50, Mar. 1989.

Duffy, D.K., “Distortion removal in structural weldments”, M.S. Thesis, M.I.T., Mar. 1970.

Easterling, K., *Introduction the Physical Metallurgy of Welding*, Butterworth-Heinemann, 2° ed, 1992.

Irving, Bob. Why heat treating is crucial in welded fabrication. *Welding Journal*: 41 – 45, Fev. 1999.

Jung, G.H. and Tsai, C.L. Fundamental studies on the effect of distortion control plans on angular distortion in fillet welded T-joints. *Welding Journal* 83 (7): 213-s – 223-s, Jul. 2004.

Kim, Y. C. and Park, J. U. and Imoto, I. Characteristics of distortion generated by welding under static loading. *Welding Journal* 82 (9): 248-s – 251-s, Set. 2003.

Kinsey, A. J. The welding of structural steels without preheat. *Welding Journal: Welding Research Supplement* 79 (4): 79-s – 88-s, Abr. 2000.

Lombera, G., et al., Computational and Experimental Determination of Temperature Distribution in Arc Welding. ASM International: Recent Trends in Welding Science and Technology, Gatlinburg, Tennessee, Maio 1989.

Lucas, B. Et al. Distorção: Prevenção pelas técnicas de fabricação. *Soldagem & Inspeção, ABS, São Paulo*, 4 (8): p. 21 – 23, Ago. 1998.

Lucas, B. Et al. Distorção: técnicas corretivas. *Soldagem & Inspeção, ABS, São Paulo*, 4 (9): p.11– 13, Set. 1998.

Machado, I. G. Cálculo no tempo de resfriamento na soldagem. *Soldagem & Inspeção* 4 (8): *Soldagem & Tecnologia*: p. 25 – 26, ABS, São Paulo, Ago. 1998.

Manning, R.M. The importance of preheat/postheat in repair welding. *Welding Journal*: p. 27 - 34, Mai. 1983.

Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q. *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2005.

Masubuchi, K. Analysis of welded structures- residual stresses, distortion and their consequences. Oxford, England / New York, USA: Pergamon Press, 1980.

Masubuchi, K. “Research activities examine residual stresses and distortion in welded structures”, *Welding Journal*: p. 41 – 47, Dec. 1991.

Matsui, S. “Investigation of shrinkage, restraint stresses and cracking in arc welding” Ph.D. Thesis at Osaka University, 1964 (in Japanese) *input* Masubuchi, 1980.

Michaleris, P. and Deo, M. V. Experimental verification of distortion analysis of welded stiffeners. *Journal of Ship Production*, Abr. 2002.

Michaleris, P. and Sun, X. Finite element analysis of thermal tensioning techniques mitigating weld buckling distortion. *Welding Journal*: p.451-s – 456-s, Nov. 1997.

Michaleris, P. and DeBiccari, A. Prediction of welding distortion. *Welding Journal*: p.172-s – 181-s, Abr. 1997.

Modenesi, P.J. “Efeitos mecânicos do ciclo térmico”, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, 2001.

Murugan, V. Vel and Gunaraj, V. Effects of process parameters on angular distortion of gas metal arc welded structural steel plates. *Welding Journal* 84 (11): p. 165-s – 171-s, Nov. 2005.

Nikulin, J. G. and Taniguchi, C. Modelagem matemática da distribuição de temperaturas nos processos de soldagem e operações a chama. *Soldagem & Materiais*, 5 (1): Suplemento de pesquisa: p. 45 – 50, Jan./Mar. 1993.

Qian, Y. Y., X. MA. and F. Yoshida. The stress field characteristics in the surface mount solder joints under temperature cycling, temperature effect and its evaluation. *Welding Journal* 81(6): Suplemento de pesquisa: p. 85-S – 89-S, Jun. 2002.

Rogana, W. G. Monitoramento da distorção angular em solda sobre chapa engastada de aço carbono. XXV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Belo Horizonte, 1999.

SENAI-SP. Soldagem. Org. Selma Ziedas e Ivaniza Tatini. São Paulo, 1997.

Teng, Tso-Liang and Chang, Peng-Hsiang and Tseng, Wen-Cheng. Effect of welding sequences on residual stresses. *Computers and Structures* 81: p. 273-286, Elsevier Science Ltd, 2003. Disponível no site: <http://www.sciencedirect.com/>.

Wainer, Emílio. Soldagem: Processos e Metalurgia. 2ª edição, São Paulo, Edgar Blücher, 1992.

Withers, P. J. and Bhadeshia, H. K. D. H. Residual stress – Part 1 – Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, vol. 17: p. 355–365, Abr. 2001.

Yurioka, N., Suzuki, H., Ohshita, and Saito, S. Determination of necessary preheating temperature in steel welding. *Welding Journal*: p. 147-s – 153-s, Jun. 1983.

ANEXOS

A.1: Cálculo do Carbono Equivalente dos metais utilizados segundo o IIW (International Institute of Welding), TAB. 11.

METAL DE BASE				
Material USI SAR 50 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA(%)				
Fe:	C: 0,22	Si: 0,25	Mn: 1.33	P: 0,015
S: 0,008	Cu: 0,03	Cr: 0,28	Ni: 0,04	Mo: 0,01
V: 0,006	Al: 0,045	Nb: 0,002	Ti: 0,017	Sn: 0,001
N: 0,0048	B: 0,0019	Ca: 0,0013		CE: 0,39354
Material USI SAR 60 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA(%)				
Fe:	C: 0,15	Si: 0,29	Mn: 1,47	P: 0,018
S: 0,007	Cu: 0,01	Cr: 0,19	Ni: 0,02	Mo: 0,01
V: 0,069	Al: 0,038	Nb: 0,031	Ti: 0,019	Sn: 0,001
N: 0,0039	B: 0,0002	Ca: 0,0019		CE: 0,43778
Material USI SAR 80 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA(%)				
Fe:	C: 0,15	Si: 0,29	Mn: 1,47	P: 0,018
S: 0,007	Cu: 0,01	Cr: 0,19	Ni: 0,02	Mo: 0,01
V: 0,069	Al: 0,038	Nb: 0,031	Ti: 0,019	Sn: 0,001
N: 0,0039	B: 0,0002	Ca: 0,0019		CE: 0,535173
Material USI AR 360 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA(%)				
Fe:	C: 0,22	Si: 0,25	Mn: 1.33	P: 0,015
S: 0,008	Cu: 0,03	Cr: 0,28	Ni: 0,04	Mo: 0,01
V: 0,006	Al: 0,045	Nb: 0,002	Ti: 0,017	Sn: 0,001
N: 0,0048	B: 0,0019	Ca: 0,0013		CE: 0,481193
Material USI AR 400 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA(%)				
Fe:	C: 0,22	Si: 0,25	Mn: 1.33	P: 0,015
S: 0,008	Cu: 0,03	Cr: 0,28	Ni: 0,04	Mo: 0,01
V: 0,006	Al: 0,045	Nb: 0,002	Ti: 0,017	Sn: 0,001
N: 0,0048	B: 0,0019	Ca: 0,0013		CE: 0,505293

Fonte: Certificado de Inspeção USIMINAS.