

André Luiz Teixeira

**COMPARAÇÃO DA DISTORÇÃO ENTRE OS
PROCESSOS DE SOLDAGEM ARCO SUBMERSO
COM 1 ARAME E COM 2 ARAMES (TANDEM) NO
AÇO ASTM AH36.**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Outubro/2012

André Luiz Teixeira

(Engenheiro Metalurgista, Escola de Minas de Ouro Preto, 2010)

**COMPARAÇÃO DA DISTORÇÃO ENTRE OS
PROCESSOS DE SOLDAGEM ARCO SUBMERSO
COM 1 ARAME E COM 2 ARAMES (TANDEM) NO
AÇO ASTM AH36.**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

Outubro/2012

*"Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo,
qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim."*

Emmanuel.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao maior de todos os republicanos

D. Pedro II.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por abrir as portas deste caminho e por me acompanhar no decorrer desta jornada.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Sérgio Duarte Brandi, por toda ajuda recebida e por seus ensinamentos, os quais me levaram a chegar ao final do início.

Agradeço ao engenheiro especialista em soldagem e grande amigo Jaime, aos tantos amigos que fiz na USP, Anderson, Dani, Luiz, André, Marcos e Xixa.

Agradeço a empresa Usiminas, em especial ao engenheiro Gustavo Batista, pela doação das chapas e a empresa Metalúrgica Atlas, em especial ao especialista em soldagem Marcos Fernandes, pela soldagem dos corpos de prova e por toda ajuda fornecida ao andamento do trabalho.

Agradeço aos funcionários da Escola Politécnica.

Agradeço aos meus pais, Eloá Teixeira e Denise Teixeira por toda ajuda, tanto emocional como financeira, sendo as primeiras pessoas a me apoiarem nesta jornada de dois anos, a Carolini pela paciência.

As minhas avós, Sinfrônia e Silvarina pelas orações dedicadas a mim.

Agradeço ao meu irmão, Carlos Eduardo Teixeira, pelas grandes palavras às quais me motivaram a buscar por mais, levando-me a cidade de São Paulo e ao final deste curso.

Agradeço a todos os grandes colegas que conheci nestes dois anos, Cléber, Gersino, Erick, Guilherme, Carlos, Taís e a todos os outros que concluíram este curso.

CURRICULUM VITAE

ANDRÉ LUIZ TEIXEIRA
Engenheiro Metalurgista – CREA 18276-D/DF

Formação

- **Escolaridade**
 - Engenharia Metalúrgica. (UFOP-2010).
- **Cursos Complementares**
 - Inspeção de Soldagem Nível 1 (NUESPI – MG 2010);

Histórico Profissional

- **Petróleo Brasileiro S.A. PETROBRAS - Abril de 2012**
 - Engenheiro de Equipamentos – Inspeção

RESUMO

O processo de fabricação de aços de alta resistência denominado lamação controlada seguida de resfriamento acelerado (em inglês, TMCP), assim como outras evoluções tecnológicas, é um dos maiores desenvolvimentos na indústria do aço. Entretanto, o tipo resfriamento acelerado é mais reconhecido devido a sua versatilidade no projeto de liga e grande melhora da soldabilidade devido ao seu mecanismo de endurecimento. Uma grande quantidade de chapas de aço de alta resistência e baixa liga tem sido produzidas pelo resfriamento acelerado do tipo TMCP e usadas em estruturas “offshore”, estruturas de prédios e dutos. Atualmente, japoneses, europeus, americanos, coreanos e agora a Usiminas possuem já em suas instalações um laminador de chapas com resfriamento acelerado. A tecnologia teve seu início na década de 1980, e estabelecida em amplitude mundial na lamação de chapas para a produção de dutos de aço no final da década de 1980. O objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo sobre a deformação causada pela soldagem de chapas topo a topo do aço AH36, obtido pela rota de fabricação com resfriamento acelerado, utilizando-se o processo arco submerso com um e dois arames.

ABSTRACT

The process of manufacture of high strength steels called Thermalmechanical controlled process (TMCP), the other technological developments, is one of the best developments in the steel industry. However, the type accelerated cooling is more recognized because of its versatility in design and large alloy improved weldability due to its mechanism of hardening. The large amount of steel plates of high strength low alloy has been produced by accelerated cooling type TMCP and structures used in offshore, buildings and pipelines. Currently, Japanese, Europeans, Americans, Koreans and Usiminas have now the plate mills with accelerated cooling. The technology got early 80's, and established in amplitude world in rolling plates for the production of steel pipelines in the late 1980s. the objective of this study is to perform a comparative study of the deformation caused by welding plates butt AH36 steel, obtained by manufacturing route with accelerated cooling, using the process submerged arc welding with one wire and two wires (Tandem).

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1 - As contribuições à resistência em um aço 0,2%C - 0,15%V como uma função do teor de manganês (Gladman et al., *Micro-alloying 75*, Union Carbide Corporation, 1975) [2]. 05

Figura 2.3.1 - Efeito do teor de carbono nas curvas de transição obtidas em ensaios de impacto de aços ferrita/perlita [2]. 08

Figura 2.4.1 - Variedade de rotas de processamento termomecânico. Laminação controlada, seguido pelo resfriamento acelerado é comumente designada processamento termomecânico controlado ou TMCP [2]. 10

Figura 2.4.2 - Entalpia de formação de carbetas, nitretos e boretos [2]. 11

Figura 2.4.3 - Tabela periódica mostrando as posições de fortes elementos formadores de carbetas. Fonte: [2]. 11

Figura 2.4.4 - Curva de solubilidade para o NbC em um aço com 0,15 C – 1,14 Mn – 0,04 Nb wt% [2]. 12

Figura 2.4.5 - Deformação crítica necessária para completar a recristalização da austenita como uma função de deformação, temperatura e tamanho de grão. Comparação do aço Nb com aço carbono [2]. 13

Figura 2.4.6 - Efeito da temperatura de fim da lamination no grão final ferrítico de uma aço microligado [2]. 14

Figura 2.5.1.1 - Esquema do processo de soldagem com arco submerso [4]. 16

Figura 2.5.1.2 - Taxa aproximada de deposição para os equipamentos normalmente usados nos processos com arco submerso em aços baixo

carbono, comparado com as taxas de deposição na soldagem com eletrodos revestidos. [4].	18
Figura 2.5.1.3 - Componentes básicos do equipamento de soldagem com arco submerso automático [4].	19
Figura 2.5.2.1 - Diferentes arranjos de equipamentos normalmente usados na soldagem com arco submerso: 1 – com eletrodo nu; 2 – geminado; 3 e 5 – tandem com dois eletrodos nus; 4 – tandem com três eletrodos nus [4].	20
Figura 2.5.2.2 - Foto tirada durante a soldagem com o processo Twin-Arc [7]	21
Figura 2.6.2.3 - Taxa de deposição do processo Twin-Arc e Arco simples para diferentes diâmetros de arames [7].	22
Figura 2.6.1 - Aspecto e Terminologia das deformações na soldagem de topo [8].	23
Figura 2.6.1.6.1 - Uso da Pré-Deformação [8].	26
Figura 2.6.1.7.1 - Preparação para chapas espessas [8].	27
Figura 2.6.1.7.2 - Sequência de soldagem do chanfro simétrico [8].	28
Figura 2.6.1.9.1 - Isotermas produzidas pela soldagem Manual e Automática [8].	29
Figura 2.6.1.9.2 - Contração Transversal de Juntas de Topo, Soldagem sem Restrição [8].	29
Figura 4.1.1 – Detalhes da geometria e as dimensões de cada chapa utilizada nos experimentos.	31
Figura 4.3.1 – Detalhes das chapas chanfradas e montadas antes da execução da soldagem.	35

Figura 4.4.1 – Dimensões do chanfro adotado com formato em "X" (duplo V) e simétrico.	36
Figura 4.5.1 – Detalhe das marcações de onde eram retirados os valores de distorção dos experimentos. O centro de cada círculo representa o ponto exato das medições.	38
Figura 4.5.2 – Detalhe do corpo de prova posicionado sob os blocos padrões e sob a mesa de desempeno para medir a deformação dos experimentos.	39
Figura 5.1.1 - Malha para medição da diluição no experimento 1.	44
Figura 5.1.2 - Malha para medição da diluição no experimento 2.	44
Figura 5.1.3 - Macrografia da junta soldada. (a) Macrografia da junta soldada do experimento 1. (b) Macrografia da junta soldada no experimento 2.	45
Figura 5.1.4 - Junta soldada com 1 arame, sequência de soldagem identificada pelo passe de raiz (a) passe seguinte de enchimento pelo lado da face (b) passe de enchimento pelo lado oposto da face (c) passe de acabamento pelo lado da face (d) passe de acabamento pelo lado oposto da face (e), ataque Nital 6%.	45
Figura 5.1.5 - Junta soldada com 2 arames, diluição do cordão em torno de 40% (a), Sequência dos passes de soldagem destacando o passe de enchimento/acabamento pelo lado da face (b), Passe de enchimento/acabamento lado oposto da face (c), ataque Nital 6%.	47
Figura 5.2.1 - Extensão da Zona Afetada pelo Calor da junta soldada com 1 arame (a). Extensão da ZAC na junta soldada com 2 arames (b), ataque Nital 6%.	49

Figura 5.2.2 - Gráfico comparativo entre os valores da extensão da ZAC e os valores de energia de soldagem utilizados no experimento 1.	51
Figura 5.2.3 - Gráfico comparativo entre os valores da extensão da ZAC e os valores de energia de soldagem utilizados no experimento 2.	52
Figura 5.2.4 - Gráfico comparativo entre o experimento 1 e o experimento 2 do total de energia de soldagem utilizada em cada experimento.	53
Figura 5.3.1 - Valores de distorção para cada ponto no passe de raiz do experimento 1.	54
Figura 5.3.2 - Valores de distorção para cada ponto no passe de enchimento do experimento 1.	56
Figura 5.3.3 - Valores de distorção para cada ponto no passe de enchimento do experimento 1.	59
Figura 5.3.4 - Valores de distorção para cada ponto no passe de acabamento do experimento 1.	62
Figura 5.3.5 - Valores de distorção para cada ponto no passe de acabamento do experimento 1.	65
Figura 5.3.6 - Valores de distorção para cada ponto no passe de acabamento do experimento 2.	67
Figura 5.3.7 - Valores de distorção para cada ponto no passe de acabamento do experimento 2.	70
Figura 5.3.8 - Valores de distorção para cada ponto no passe de acabamento do experimento 2.	72
Figura 5.3.8 - Valores de distorção para cada ponto no passe de acabamento do experimento 2.	75

Figura 5.3.9 – Gráfico comparativo dos resultados dos experimentos 1 e 2 , representados pela linhas na cor azul e vermelha, com a norma ISO 13920, representada pelas colunas na cor cinza, e com os resultados de distorção do trabalho de DA SILVA [12], representado pelas linhas nas cores verde e preto, para um chanfro em “X” assimétrico. 76

Figura 5.3.10 – Gráfico comparativo dos valores de distorção entre a classificação da Norma ISO 13920 com as médias da distorção de cada experimento e em cada comprimento. 77

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 2.5.2.1</u> - Velocidades típicas de soldagem para solda de topo em chapa com espessura de 10mm [4].	21
<u>Tabela 4.1.1</u> - Composição química segundo fabricante do eletrodo consumível utilizado na soldagem dos passes de raiz dos experimentos1 e 2.	32
<u>Tabela 4.1.2</u> – Propriedades mecânicas segundo fabricante do eletrodo consumível utilizado na soldagem dos passes de raiz dos experimentos1 e 2.	33
<u>Tabela 4.2.3</u> - Composição química segundo fabricante do eletrodo consumível utilizado na soldagem dos passes de enchimento e acabamento dos experimentos1 e 2.	34
<u>Tabela 4.2.4</u> – Propriedades mecânicas segundo fabricante do eletrodo consumível utilizado na soldagem dos passes de enchimento e acabamento dos experimentos1 e 2.	34
<u>Tabela 4.3.1</u> - Descrição dos processos utilizados em cada experimento e do tipo de identificação utilizado neste trabalho	35
<u>Tabela 4.4.1</u> – Variáveis utilizadas na execução de cada passe de solda do experimento 1	37
<u>Tabela 4.4.2</u> – Variáveis utilizadas na execução de cada passe de solda do experimento 2	37
<u>Tabela 5.1.1</u> : Energia de Soldagem para cada passe e a área da seção transversal de metal depositado.	46
<u>Tabela 5.1.2</u> : Energia de Soldagem para cada passe e área da seção transversal do cordão de solda identificada na macrografia.	52

<u>Tabela 5.2.1</u> - Energia de soldagem e extensão da ZAC do experimento 1.	52
<u>Tabela 5.2.2</u> - Valores da energia de soldagem e extensão da ZAC do experimento 2.	53
<u>Tabela 5.3.1</u> - Valores de distorção para cada ponto do experimento 1.	55
<u>Tabela 5.3.2</u> - Valores de distorção para cada ponto do experimento 1.	58
<u>Tabela 5.3.3</u> - Valores de distorção para cada ponto do experimento 1.	61
<u>Tabela 5.3.4</u> - Valores de distorção para cada ponto do experimento 1.	64
<u>Tabela 5.3.5</u> - Valores de distorção para cada ponto do experimento 1.	66
<u>Tabela 5.3.6</u> - Valores de distorção para cada ponto do experimento 2.	69
<u>Tabela 5.3.7</u> - Valores de distorção para cada ponto do experimento 2.	71
<u>Tabela 5.3.8</u> - Valores de distorção para cada ponto do experimento 2.	74

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

TMCP Tratamento Termomecânico Controlado

ASTM American Society of Testing Materials

JIS Japanese Industrial Standards

TMR Laminação Termomecânica

AC Resfriamento Acelerado

HSLA Alta Resistência Baixa Liga

SAE Society of Automotive Engineers

CE Carbono Equivalente

IIW International Institute of Welding

ZAC Zona Afetada pelo Calor

T_F Temperatura transformação austenita/ (ferrita + perlita)

T_B Temperatura transformação austenita/martensita

M_s Temperatura de formação da martensita

CCPR(+) Corrente Contínua Polaridade Reversa

CCPD(-) Corrente Contínua com Polaridade Direta

AWS American Welding Society

CA Corrente Alternada

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
CURRICULUM VITAE.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xiv
SUMÁRIO.....	xv
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 RESISTÊNCIA DOS AÇOS MICROLIGADOS.....	4
2.2 TRATAMENTO TREMOMECÂNICO DOS AÇOS.....	6
2.3 LAMINAÇÃO CONTROLADA DE AÇOS BAIXA LIGA.....	7
2.4 CONTROLE DO TAMANHO DO GRÃO DURANTE LAMINAÇÃO CONTROLADA.....	9
2.5 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARCO SUBMERSO.....	15
2.5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	15
2.5.2 ARCO SUBMERSO COM 2 ELETRODOS.....	20
2.6 DEFORMAÇÕES NA SOLDAGEM.....	22
2.6.1 FATORES DE INFLUÊNCIA.....	23
2.6.1.1 NATUREZA DO MATERIAL SOLDADO.....	23
2.6.1.2 COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA.....	24
2.6.1.3 CONDUTIBILIDADE TÉRMICA.....	24
2.6.1.4 LIMITE DE ESCOAMENTO.....	24
2.6.1.5 AÇO CARBONO X AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA.....	25
2.6.1.6 RESTRIÇÃO.....	25
2.6.1.7 QUANTIDADE DE METAL DEPOSITADO.....	26
2.6.1.8 SEQUÊNCIA DE DEPOSIÇÃO DOS PASSES.....	27
2.6.1.9 GRADIENTE DE TEMPERATURA.....	28
3. OBJETIVOS.....	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
4.1 METAL DE BASE.....	31
4.2 CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM.....	32
4.2.1 CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM PARA O PROCESSO ARAME TUBULAR	32
4.2.2 CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM PARA O PROCESSO ARCO SUBMERSO.....	33
4.3 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM.....	34
4.4 VARIÁVEIS UTILIZADAS NA SOLDAGEM.....	36
4.5 TÉCNICA UTILIZADA PARA MEDAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES.....	37
4.6 SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM.....	39
4.6.1 SEQUÊNCIA DE REALIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA DO EXPERIMENTO 1.....	39
4.6.2 SEQUÊNCIA DE REALIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA DO EXPERIMENTO 2.....	41

4.7 ENSAIO MACROGRÁFICO DAS JUNTAS SOLDADAS.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1 ANÁLISE MACROGRÁFICA DAS JUNTAS SOLDADAS.....	43
5.1.2 SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM.....	46
5.2 EXTENSÃO DA ZONA AFETADA PELO CALOR.....	50
5.3 COMPARAÇÕES ENTRE AS DISTORÇÕES.....	54
5.3.1 VALORES DE DISTORÇÃO DO EXPERIMENTO 1.....	54
5.3.2 VALORES DE DISTORÇÃO DO EXPERIMENTO 2.....	67
5.3.3 COMPARAÇÃO DOS VALORES DE DISTORÇÃO DOS EXPERIMENTOS 1 E 2 COM A NORMA ISO 13920 E COM O OUTRO TIPO DE CHANFRO.....	75
6. CONCLUSÕES.....	78
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

O processo termomecânico controlado (TMCP) é um dos maiores desenvolvimentos na indústria do aço. Ambos laminação controlada e resfriamento acelerado após a laminação controlada tem sido especificados nas normas JIS e ASTM com o nome de TMCP. Entretanto, o tipo resfriamento acelerado é mais reconhecido devido a sua versatilidade no projeto de liga e grande melhora da soldabilidade através de sua elevação de resistência por transformação. Uma grande quantidade de chapas de alta resistência e baixa liga tem sido produzidas pelo resfriamento acelerado do tipo TMCP e usadas em estruturas offshore, prédios arranha céus e dutos. Atualmente, muitos japoneses, europeus coreanos e agora a Usiminas possuem já em suas instalações um laminador de chapas com resfriamento acelerado. Começando a partir de pesquisa sobre laminação controlada nos anos 1960's, a tecnologia foi estabelecida em amplitude mundial na laminação de chapas para a produção de dutos de aço no início dos anos 1970's. Resfriamento acelerado seguido pela laminação controlada teve início com a pesquisa que durou quase uma década.

Desde que resfriamento acelerado pôde melhorar o endurecimento microestrutural e possui a capacidade de produzir chapas HSLA tendo tenacidade e soldabilidade, todos fabricantes japoneses de aço equiparam as instalações de resfriamento no início dos anos 1980's. Atualmente muitos fabricantes europeus de aço também introduziram o resfriamento acelerado.

A norma ASTM define o TMCP no seu apêndice A841/A841M como: TMCP tem sido a evolução do processo de laminação controlada o qual é

conhecido e usado por um número de anos. TMCP é a nova geração da laminação controlada. TMCP produz granulação fina no aço pela combinação de composição química e controle de processos de manufatura integrados desde o reaquecimento até o resfriamento pós-laminação, atingindo as propriedades mecânicas especificadas para a espessura requerida de chapa. TMCP requer controle acurado de ambas temperatura e redução na laminação. TMCP pode incorporar dois processos, laminação termomecânica (TMR) a resfriamento acelerado (AC). Atualmente TMCP é usualmente referido como processo tipo resfriamento acelerado. Maior parte do resfriamento acelerado é aplicado ininterruptamente através do campo da temperatura de transformação, tipicamente 800 – 500° C, seguido de resfriamento ao ar até temperatura ambiente. Algumas vezes o resfriamento acelerado é continuamente aplicado até a temperatura ambiente ou abaixo de 300° C para aços de química enxuta ou carbono muito baixo ou carbono equivalente muito baixo.

Estudos na laminação controlada começaram no meio dos anos 1960's a partir do ponto de recristalização da austenita. Este trabalho fundamental levou à sua aplicação prática na laminação de chapas para produção em massa de dutos de aço no ártico desde o início dos anos 1970's. Projetos de linhas no Alasca e Sibéria contribuíram para o estabelecimento da tecnologia de produção.

Estudos sobre resfriamento acelerado depois de laminação controlada de chapas iniciaram no fim da década de 1970's e identificou os efeitos metalúrgicos e vantagens fundamentais do processo de resfriamento acelerado. Resfriamento acelerado após laminação controlada é uma forma mais completa

de processamento termomecânico o qual controla cada estágio do processo de laminação de chapas, que é reaquecimento, laminação e resfriamento final. Isto oferece uma nova possibilidade que a resistência é aumentada sem sacrificar tenacidade na condição de como resfriado. Este efeito leva a uma redução na adição de liga ao encontro do grau de resistência requerido do aço. Redução do teor de carbono ou carbono equivalente através do processo de resfriamento acelerado é mais atrativo para chapas de aço nos quais soldabilidade é um dos requisitos mais importantes [1].

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 RESISTÊNCIA DOS AÇOS MICROLIGADOS.

Nos modernos aços micro-ligados, existe pelo menos três mecanismos de endurecimento os quais contribuem para a resistência final destes materiais. A parcela de contribuição relativa a cada um é determinada pela composição do aço e, igualmente importante, os detalhes do tratamento termomecânico ao qual o aço é sujeito [2].

Primeiramente, existe os incrementos de endurecimento por solução sólida do manganês, silício e nitrogênio não combinado. Segundo, como contribuição muito substancial para o limite de escoamento o componente do tamanho do grão, a magnitude de cada grão é bastante sensível à história termomecânica detalhada. Finalmente, um incremento típico, endurecimento por dispersão [2]. As contribuições para aumento da resistência de aços com 0,2% carbono, 0,2% silício, 0,15% vanádio e 0,015% nitrogênio como uma função do aumento do teor de manganês estão mostradas esquematicamente na figura 2.1.1 [2].

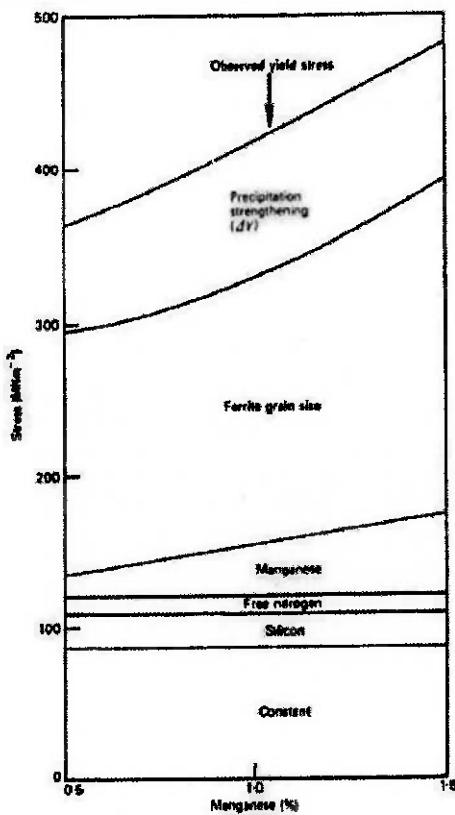


Figura 2.1.1 - As contribuições à resistência em um aço 0,2%C - 0,15%V como uma função do teor de manganês [2].

O efeito da temperatura de fim para laminação é importante na determinação do tamanho do grão e, portanto no nível de resistência alcançada para um aço particular. Está se tornando comum laminar através do campo de transformação até a condição ferrítica completa, e então obter estruturas finas de subgrão na ferrita, as quais provêm uma contribuição adicional para a resistência, alternativamente, a laminação é finalizada abaixo da transformação de austenita para ferrita ($\gamma \rightarrow \alpha$), e a natureza das transformações é alterada pelo aumento da taxa de resfriamento.

As lentes taxas de resfriamento geram resistências mais baixas quando comparado com as taxas de resfriamento mais rápidas impostas pelo

resfriamento por spray de água e seguida de laminação. A rota pode mudar a ferrita da estrutura equiaxial para Widmanstatten cuja densidade de discordâncias é muito maior. O resultado é um aço com propriedades mecânicas melhoradas e, em muitos casos, o ponto exato do escoamento pode ser suprimido. Isto possui vantagens práticas na fabricação de chapas de aço, manufatura de tubo, onde uma curva tensão deformação contínua é preferida [2].

2.2 TRATAMENTO TERMOMECÂNICO DOS AÇOS.

O tratamento termomecânico envolve a aplicação simultânea de calor e um processo de deformação a uma liga, com objetivo de mudar sua forma e sua microestrutura. Assim, a laminação a quente de metais, um processo industrial já bem estabelecido, é um tratamento termomecânico o qual desempenha um papel importante como parte do processamento de vários aços [3].

Segmentos de aços fundidos são continuamente introduzidos na sequencia de laminação a uma temperatura tipicamente no campo de 1200-1300°C. Eles são então progressivamente laminados em uma variedade de formas a depender da aplicação. A deformação leva a quebrar a microestrutura grosseira inicial pela repetida recristalização do aço enquanto na condição austenítica, e pela gradual redução da segregação química introduzida durante a fundição. Também, as inclusões não-metálicas, óxidos, sulfetos e silicatos, são quebradas, algumas deformadas e distribuídas pelo aço de uma maneira mais uniforme e refinada [3].

O processo de laminação a quente é uma operação altamente controlada, bilhões de toneladas de aço são produzidas anualmente usando-se equipamentos controlados por computadores, resultando em impressionantes níveis de produtividade e reproduzibilidade [3].

As composições de aços baixa liga são cuidadosamente escolhidas para prover ótima propriedades mecânicas quando a deformação à quente é completado subsequente resfriamento. Este processo, no qual os parâmetros de laminação (temperatura, deformação, número de passes de laminação, temperatura de fim, etc) são predeterminados e precisamente definidos, é chamado laminação controlada. Processo de grande importância na obtenção de propriedades mecânicas confiáveis em aços para dutos, pontes, prédios e uma grande variedade de outros produtos [2].

2.3 LAMINAÇÃO CONTROLADA DE AÇOS BAIXA LIGA.

Antes da segunda guerra mundial, a resistência em aços baixa liga laminados à quente era alcançada pela adição de carbono até 0,4wt% e manganês até 1,5%, dando tensões de escoamento de $350\text{-}400\text{ MNm}^{-2}$.

Entretanto, tais aços são essencialmente agregados ferrita-perlita, os quais não possuem tenacidade adequada para muitas aplicações modernas. De fato, a tenacidade, avaliada pela transição dúctil/frágil, diminui dramaticamente com o teor de carbono, aumentando-se o volume de perlita no aço, curvas de transição dúctil/frágil estão representadas em função dos teores de carbono na figura 2.3.1. Mais adiante, com a introdução da soldagem como importante técnica de fabricação, os altos teores de carbono levam a sérios problemas de

trincamento, os quais podiam ser eliminados pelo uso de aços baixo carbono. A grande vantagem de produzir nestes aços um tamanho de grão ferrítico fino logo se tornou aparente, então a laminação controlada na condição austenítica foi gradualmente introduzida para se atingir a resistência desejada [1].

Foram encontrados tamanhos de grão ferrítico fino no aço, pela adição de pequenas concentrações (<0,1wt%) de elementos de liga, como o nióbio, titânio e vanádio, e também alumínio. Na adição de tais elementos aos aços com 0,03-0,008% C e até 1,5% Mn, tornou-se possível produzir um material de granulação fina com limites de escoamento entre 450 e 550 MN m⁻², e temperaturas de transição dúctil/frágil baixas como -70°C. Tais aços são agora denominados como alta resistência baixa liga (HSLA) ou aços microligados [2].

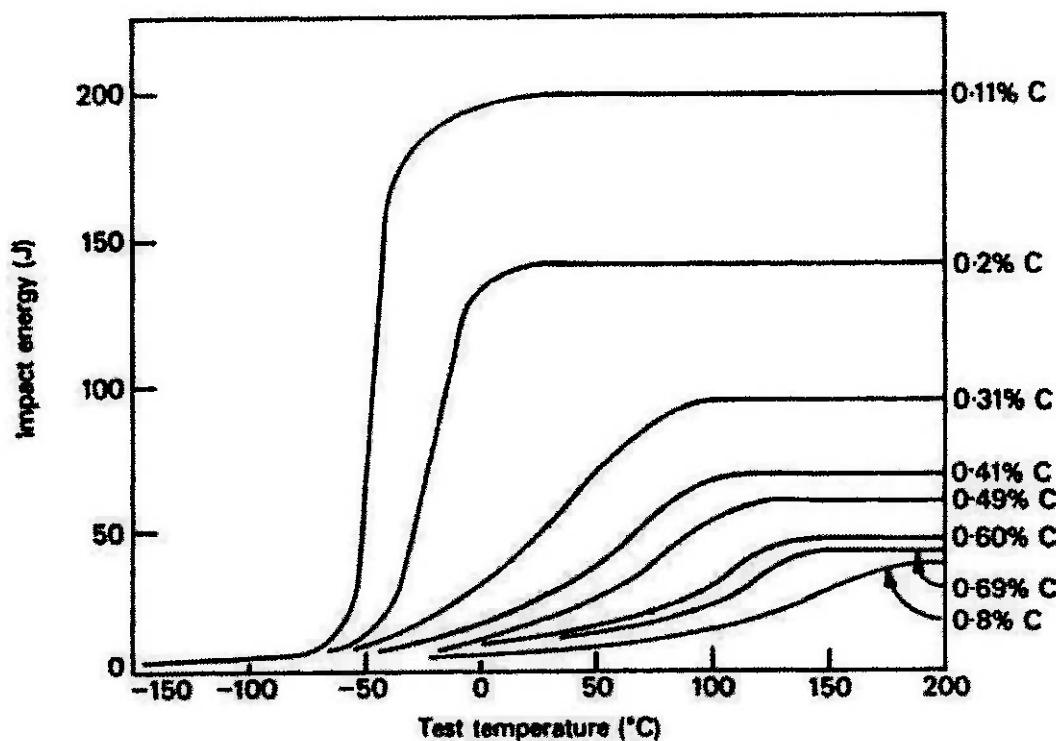


Figura 2.3.1 - Efeito do teor de carbono nas curvas de transição obtidas em ensaios de impacto de aços ferrita/pearlita [2].

2.4 CONTROLE DO TAMANHO DO GRÃO DURANTE LAMINAÇÃO CONTROLADA.

O mecanismo primário de refino de grão na laminação controlada é a recristalização da austenita durante a deformação a quente, conhecido como *recristalização dinâmica*. Esse processo é claramente influenciado pela temperatura e grau de deformação durante cada passe através do laminador [3].

Contudo, as altas temperaturas envolvidas na laminação a quente levam a um marcante crescimento de grão, com o resultado limitado do refino do grão durante trabalho subsequente.

A situação é enormemente melhorada se partículas finas são introduzidas na matriz austenítica. As partículas são usualmente encontradas nos contornos de grão. Um pequeno comprimento do contorno do grão é substituído pela partícula e a energia interfacial garante uma configuração estável, existindo um tamanho crítico da partícula da qual abaixo a ancoragem do contorno do grão é efetiva [2].

A figura 2.4.1 relaciona esquematicamente as mudanças microestruturais durante a laminação com a rota de fabricação do material.

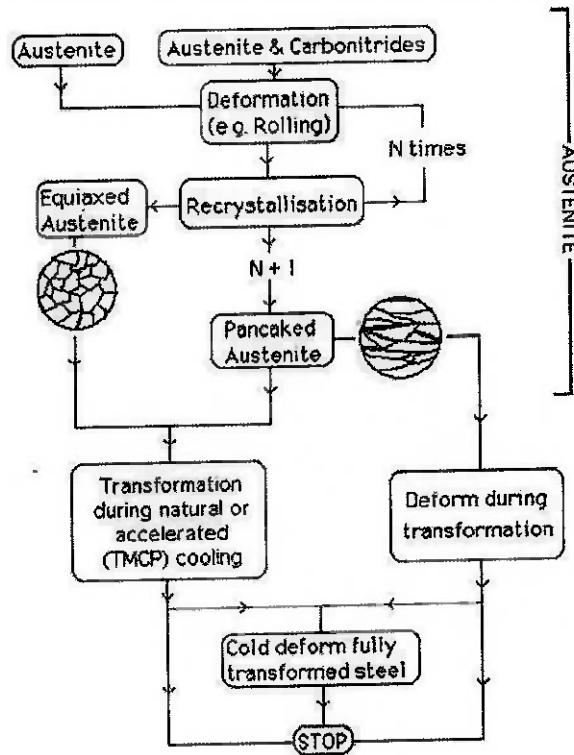


Figura 2.4.1 - Variedade de rotas de processamento termomecânico.

Laminação controlada, seguido pelo resfriamento acelerado é comumente designada processamento termomecânico controlado ou TMCP [2].

O controle do tamanho do grão em altas temperaturas requer o máximo possível de precipitados finos no contorno do grão, e um o qual não irá dissolver completamente na austenita, mesmo nas mais altas temperaturas de trabalho (1200-1300°C). Os melhores elementos refinadores de grão são fortes formadores de carbeto e nitretos, como o nióbio, titânio e vanádio, também alumínio o qual forma somente um nitreto. Ambos os elementos carbono e nitrogênio estão presentes nos aços de laminação controlada, os nitretos são ainda mais estáveis que os carbeto, como mostra a figura 2.4.2.

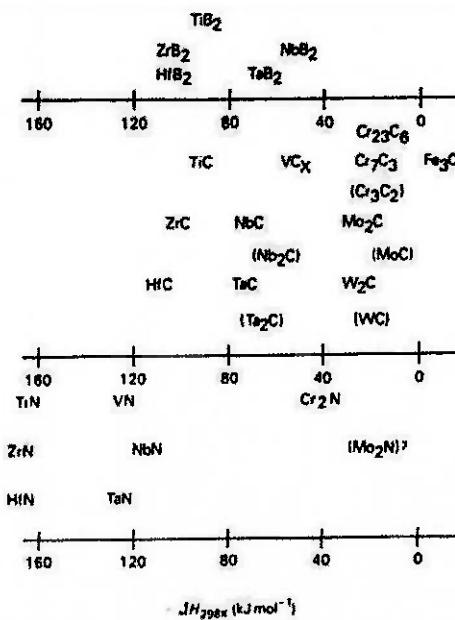


Figura 2.4.2 - Entalpia de formação de carbeto, nitretos e boretos [2].

Igualmente importante é o grau da solubilidade que tais compostos estáveis possuem na austenita. É essencial que haja suficiente solubilidade sólida nas mais altas temperaturas austenitzantes para permitir que precipitação fina ocorra durante a laminação controlada em temperaturas as quais diminuem a medida que a laminação procede. A figura 2.4.3 mostra a posição de fortes elementos formadores de carbeto e nitretos na tabela periódica.

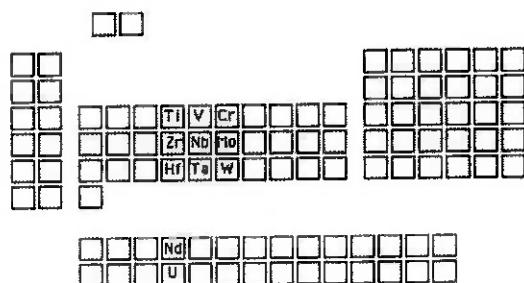


Figura 2.4.3 - Tabela periódica mostrando as posições de fortes elementos formadores de carbeto [2].

Todos estes compostos possuem uma pequena solubilidade, mas que aumenta no espaço de temperatura entre 900-1000°C, figura 2.4.4.

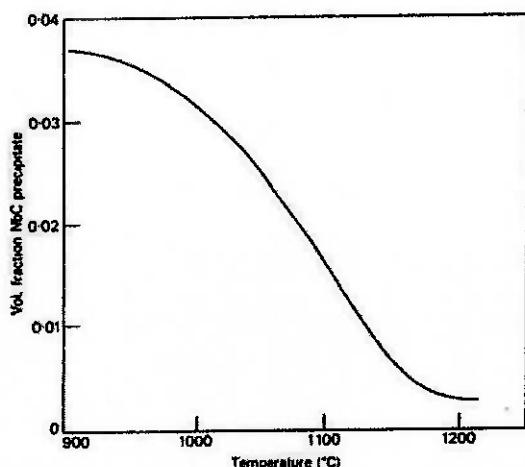


Figura 2.4.4 - Curva de solubilidade para o NbC em um aço com 0,15 C – 1,14 Mn – 0,04 Nb wt% [2].

Em contraste, os carbeto de cromo e molibdênio possuem solubilidades muito mais altas, as quais asseguram que irão normalmente solubilizar completamente na austenita, se a temperatura for alta o suficiente, e não irão precipitar até a temperatura estar bem abaixo do limite crítico para crescimento de grão.

Pode ser que seja restrinido algum crescimento por uma dispersão residual, o refinamento principal é alcançado durante a laminação à medida que a temperatura progressivamente cai, e são precipitados carbo-nitretos finos na austenita. Estes novos precipitados irão:

- Aumentar a deformação, para uma dada temperatura, a qual a recristalização irá começar, figura 7.
- Restringir o movimento dos contornos dos grãos recristalizados.

Deve-se ter em mente que a austenita pode recristalizar várias vezes durante a laminação controlada e o efeito total disto será um refinamento do grão austenítico no tempo que o aço atingi a temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \alpha$, figura 2.4.5.

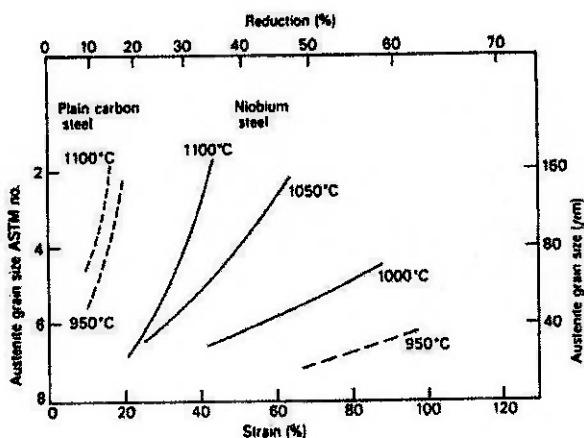


Figura 2.4.5 - Deformação crítica necessária para completar a recristalização da austenita como uma função de deformação, temperatura e tamanho de grão. Comparação do aço Nb com aço carbono [2].

Nos estágios posteriores da deformação da austenita, em baixas temperaturas, a recristalização pode não ocorrer com o resultado que grãos austeníticos alongados e planificados pela laminação e podem transformar diretamente em ferrita. Nos estágios finais da laminação controlada, crescimento de grão austenítico pode ser mais adiante suprimido pelo rápido resfriamento para a temperatura final, a qual permite que a transformação $\gamma \rightarrow \alpha$ tome lugar subcriticamente, abaixo da Ar_1 , na austenita a qual é ainda deformada. Está se tornando prática comum continuar a laminação através da transformação $\gamma \rightarrow \alpha$ e mesmo na região totalmente ferrítica. Tais tratamentos levam a tamanhos de grãos mais finos, e maiores tensões de escoamento no

produto acabado, figura 2.4.6, mas impõem um fator de carga muito maior nos laminadores.

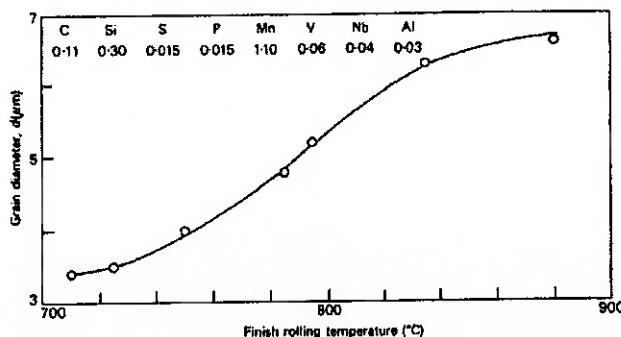


Figura 2.4.6 - Efeito da temperatura de fim da laminação no grão final ferrítico de um aço microligado [2].

Como resultado do uso combinado da laminação controlada e dispersão fina de carbonitretos em aços baixa liga tem sido possível obter tamanhos de grãos ferríticos entre 5 e 10 μm , em prática comercial. A relação de Hall-Petch entre tamanho do grão e limite de escoamento é bastante relevante para aços microligados [2]. A relação entre o tamanho do grão e o limite de escoamento está mostrada na figura 2.4.7.

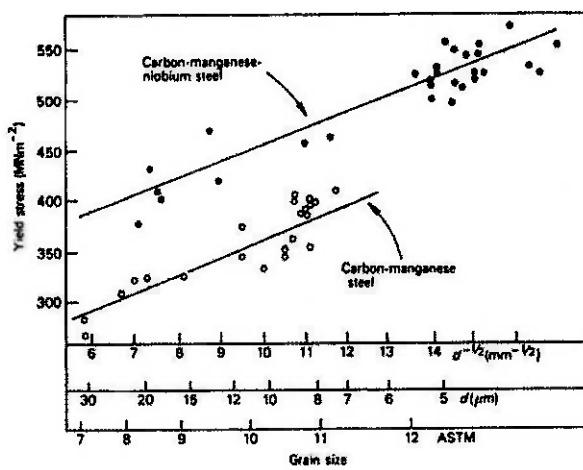


Figura 2.4.7 - Efeito do tamanho de grão na tensão de escoamento de um aço carbono-manganês-nióbio [2].

2.5 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARCO SUBMERSO.

Neste processo estabelece-se um arco elétrico entre o arame-eletrodo e o material a ser soldado, com a característica de ter o arco totalmente submerso em uma camada de fluxo, não sendo então visível.

A soldagem com o arco submerso avança sem ocorrência de faíscas, luminosidades e respingos, presentes na maior parte dos processos de soldagem com arco aberto. Na forma de grânulos o fluxo age como fundente, protegendo de contaminações o metal de solda, líquido; atua ainda como isolante térmico, concentrando o calor, na parte sólida.

O processo permite alto grau de automatização, sendo o arame-eletrodo continuamente alimentado no cabeçote ou pistola de soldagem, conferindo a esse tipo de processo rapidez e economia comparando-o aos demais processos de soldagem com arco elétrico.

No Brasil, a soldagem com arco submerso é utilizada largamente na indústria de equipamentos metálicos como tubos, navios, perfis, plataformas marítimas, trocadores de calor e toda série de equipamentos pesados, assim como na recuperação de peças, como cilindros de laminação e peças rodantes de tratores [4].

2.5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS.

Durante a soldagem, o calor produzido pelo arco elétrico funde parte do fluxo juntamente com a ponta do eletrodo, a figura 2.5.1.1 mostra esquematicamente o processo de soldagem com arco submerso. A zona de

soldagem sempre fica envolta e protegida pelo fluxo escorificante, sobrepondo-se ainda por uma camada de fluxo não fundido. O eletrodo permanece um pouco acima do metal de base, e o arco elétrico se desenvolve nesta posição. A medida que o eletrodo se desloca ao longo da junta, o fluxo fundido sobrenada e se separa do metal de solda fundido na forma de uma escória. Uma vez que o metal de solda tem um ponto de fusão mais elevado que a escória, solidifica-se, enquanto a escória ainda permanece líquida, protegendo também o metal de solda recém solidificado, que é muito reativo com o oxigênio e nitrogênio da atmosfera. Com o resfriamento posterior, remove-se o fluxo não fundido, e a escória rapidamente se destaca do metal de solda [5].

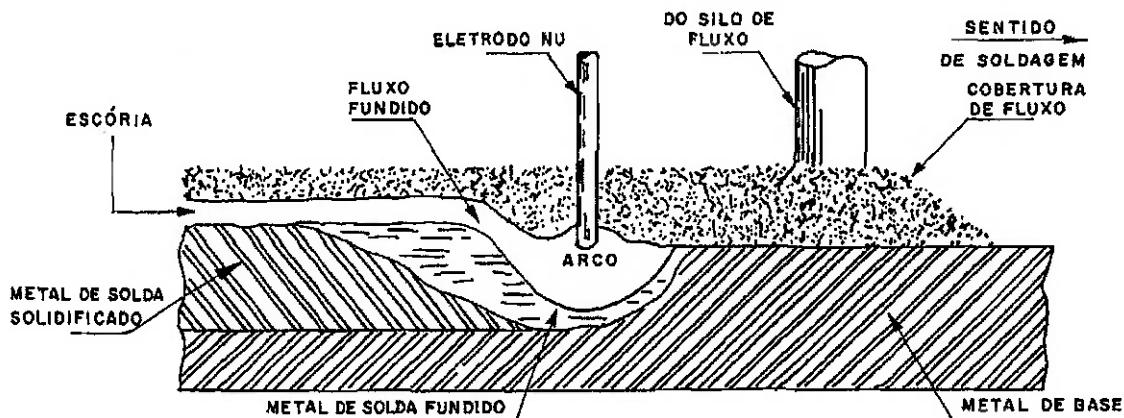


Figura 2.5.1.1 - Esquema do processo de soldagem com arco submerso [5].

O processo de soldagem com arco submerso pode ser semi ou totalmente automático, e em ambos os casos o eletrodo é alimentado mecanicamente a partir de um rolo para a pistola ou cabeçote de soldagem enquanto se funde. A alimentação do fluxo é independente, caindo por gravidade imediatamente à frente do eletrodo ou de forma concêntrica em relação a ele. Desta forma, tanto o fluxo como o eletrodo podem ser alterados

a qualquer momento. Esta é a diferença fundamental em relação à soldagem com eletrodos revestidos, onde o eletrodo metálico e o seu revestimento de fluxo não são separáveis.

Outra diferença na soldagem com arco submerso em relação aos demais processos de soldagem diz respeito às amplas faixas de intensidades de correntes, tensão e velocidades de avanço que podem ser usadas. Cada variável destas pode ser controlada separadamente, no entanto todas elas devem operar em conjunto, produzindo soldas que estão de acordo com as propriedades desejáveis. Cada fator destes influencia o perfil do cordão de solda, as propriedades do metal de solda, assim como a limpeza e a aparência da junta [4].

Para soldagem com arco submerso, os fluxos são projetados para suportar as elevadas correntes de soldagem usadas no processo. Os fluxos possuem a função de proteger a poça de solda contra a ação da atmosfera, atuar como desoxidantes, limpando o metal de solda e ainda podem modificar a composição química do metal de solda. Dependendo do método de fabricação, os fluxos podem ser aglomerados ou fundidos.

Os fluxos aglomerados são constituídos de compostos minerais finamente moídos, como óxidos de manganês, silício, alumínio, titânio, zircônio ou cálcio e desoxidantes como ferro-silício, fero-manganês ou ligas similares e ainda um agente aglomerante e então sinterizado em temperaturas da ordem de 600 a 900° C [5].

Os fluxos fundidos são constituidos dos mesmos compostos minerais em relação aos fluxos aglomerados, porém com os componentes fundidos em forno

para formar um "vidro metálico" que, após o resfriamento, é reduzido a partículas granulares, com dimensões requeridas para assegurar as características apropriadas de soldagem.

O elevado rendimento aparece também como característica do processo com arco submerso, praticamente não há perdas de metal por projeção, permite o uso de correntes de intensidade elevadas, acima de 2000 A que, aliado às altas densidades de corrente, 60 a 100 A/mm² oferecem ao processo elevada taxa de deposição. A figura 2.5.1.2 mostra a relação da corrente com a taxa de deposição [5].

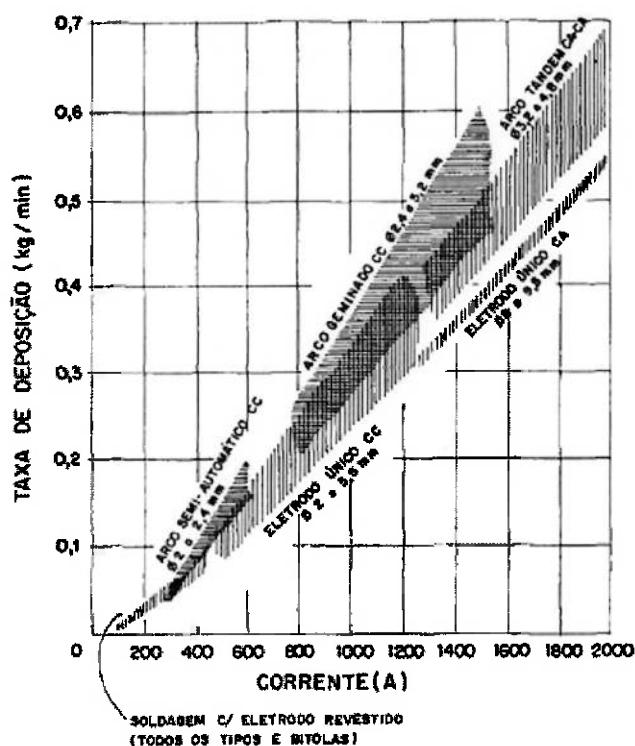


Figura 2.5.1.2 - Taxa aproximada de deposição para os equipamentos normalmente usados nos processos com arco submerso em aços baixo carbono [5].

A posição de soldagem é a grande limitação do arco submerso, o processo não permite a soldagem fora da posição plana ou horizontal. De fato, a ação da força da gravidade, a qual sustenta a camada de fluxo sobre a poça de fusão, impossibilita a soldagem fora de posição [5]. A figura 2.5.1.3 mostra os componentes básicos do equipamento para soldagem com arco submerso.

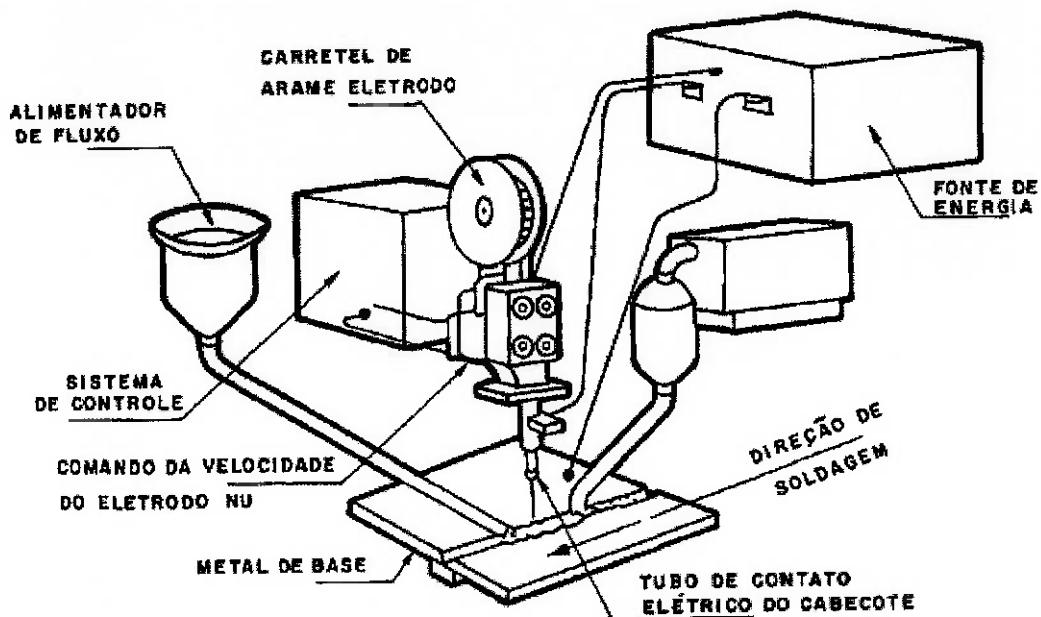


Figura 2.5.1.3 - Componentes básicos do equipamento de soldagem com arco submerso automático [5].

2.5.2 ARCO SUBMERSO COM 2 ELETRODOS.

No processo com dois eletrodos, como o nome já diz há dois eletrodos soldando simultaneamente, cada um acoplado em cabeçote diferente, formando arcos elétricos distintos, ligados a uma fonte de energia separada. A diferença na soldagem Twin-Arc é que utiliza-se duplo-aramo eletrodo conectados em paralelo em única fonte de energia. Formando um único arco

elétrico, a corrente de soldagem divide-se igualmente entre os dois arames, e a tensão de arco é a mesma para ambos [5]. Os arames posicionados em linha geram uma alta taxa de deposição, arames posicionados transversalmente geram uma baixa penetração. A principal evolução é o uso de arames com pequeno diâmetro possibilitando uma alta densidade de corrente [6]. A figura 2.5.2.1 mostra diferentes arranjos de alimentação de arame para o processo com arco submerso.

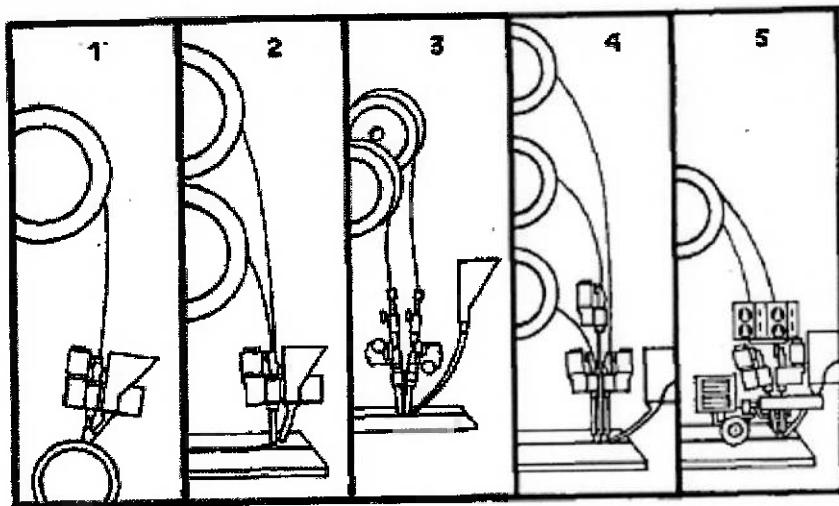


Figura 2.5.2.1 - Diferentes arranjos de equipamentos normalmente usados na soldagem com arco submerso: 1 – com eletrodo nu; 2 – geminado; 3 e 5 – tandem com dois eletrodos nus; 4 – tandem com três eletrodos nus [5].

A figura 2.5.2.2 mostra os arcos na soldagem Twin-Arc.



Figura 2.5.2.2 - Foto tirada durante a soldagem com o processo Twin-Arc [6].

A tabela 2.5.2.1 mostra velocidades típicas para os diferentes processos de soldagem e diferentes arranjos de eletrodos para o processo com arco submerso.

Tabela 2.5.2.1 - Velocidades típicas de soldagem para solda de topo em chapa com espessura de 10mm [5].

Processo de solda	Velocidade de soldagem (cm/min)
Eletrodo manual	10
Arame tubular semi-automático	25
Arco submerso semi-automático	37
Arco submerso automático (1 arame)	45
Arco submerso geminado	55
Arco submerso tandem (2 arames)	75
Arco submerso tandem (3 arames)	115

A figura 2.5.2.3 mostra um gráfico comparativo entre a taxa de deposição do processo Twin-Arc e Arco Submerso com 1 arame.

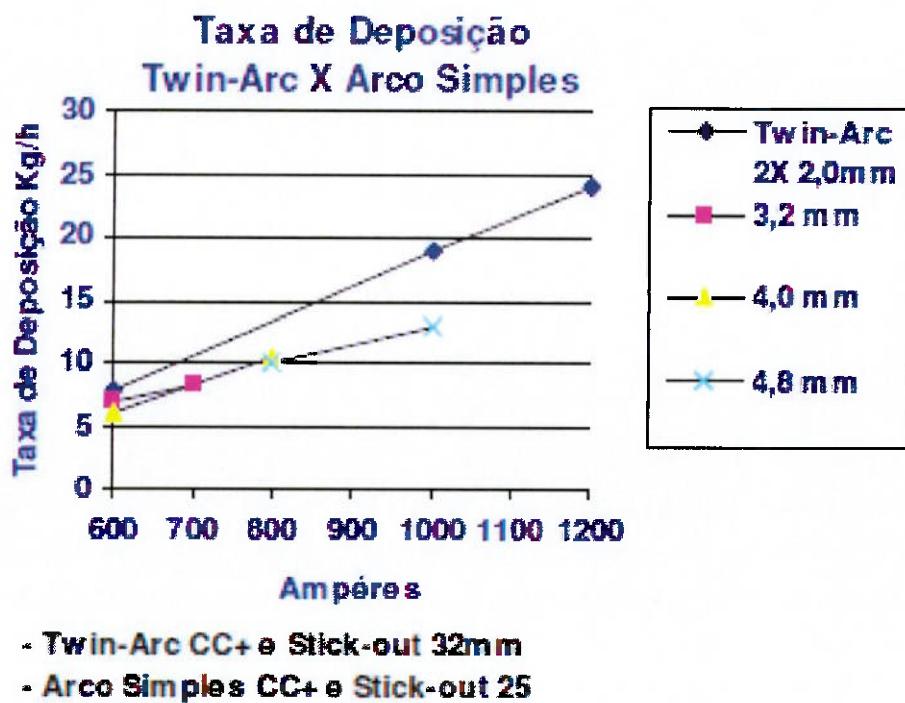


Figura 2.5.2.3 - Taxa de deposição do processo Twin-Arc e Arco simples para diferentes diâmetros de arames [6].

2.6 DEFORMAÇÕES NA SOLDAGEM.

No decorrer do processo de soldagem caso a estrutura soldada não apresente suficiente rigidez haverá então deformação tendendo a aliviar as tensões residuais. Estas deformações são proporcionais à extensão da zona plastificada. Na soldagem as deformações se apresentam sob diversas formas diferentes. A figura 2.6.1 mostra tipos de deformações que podem ocorrer na soldagem de topo [7].

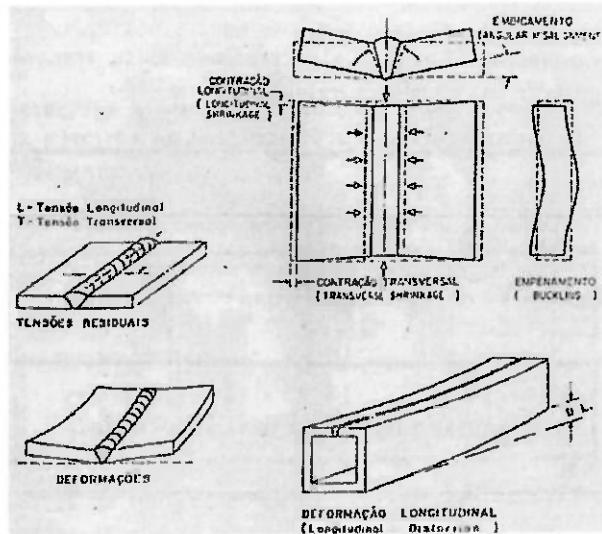


Figura 2.6.1 - Aspecto e Terminologia das deformações na soldagem de topo [7].

2.6.1 FATORES DE INFLUÊNCIA.

A seguir será apresentada de maneira sucinta os fatores que influenciam na deformação causada pela soldagem.

2.6.1.1 NATUREZA DO MATERIAL SOLDADO.

A falta de uniformidade na distribuição do calor em uma estrutura durante a sua soldagem, aquecimento e resfriamento, é a principal responsável pelo aparecimento das tensões residuais e consequentes deformações. O estado de deformação final de uma estrutura soldada é, em resumo, influenciada pelo seu grau de rigidez e pela extensão da zona plastificada durante a soldagem. Assim, diversas propriedades físicas e mecânicas do material: coeficiente de expansão térmica, condutibilidade térmica, limite de

escoamento, módulo de elasticidade, etc. afetarão o grau de deformação da estrutura soldada [7].

2.6.1.2 COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA.

Materiais com alto coeficiente de expansão térmica apresentam, para determinada variação de temperatura, elevada expansão e contração, resultando na soldagem, maiores deformações do que os materiais de menor coeficiente de expansão térmica [7].

2.6.1.3 CONDUTIBILIDADE TÉRMICA.

A alta condutibilidade térmica de metais e ligas como o alumínio e o cobre, dissipam a energia da soldagem com maior facilidade do que os metais e ligas metálicas com baixa condutibilidade térmica assim como os aços inoxidáveis e as ligas de níquel. Desta forma, os materiais de baixa condutibilidade térmica apresentarão maior zona plastificada e, consequentemente, maior deformação em soldagem [7].

2.6.1.4 LIMITE DE ESCOAMENTO.

As tensões residuais em soldagem podem atingir o limite de escoamento do material na temperatura ambiente. Quanto maior for o limite de escoamento do material, na região soldada, maior será o nível de tensões residuais que poderá atuar deformando a estrutura soldada [7].

2.6.1.5 AÇO CARBONO X AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA.

Neste caso a única propriedade que influencia significativamente a deformação é o limite de escoamento. Portanto, uma estrutura construída em aço de alta resistência necessitará de menores espessuras e apresentará um maior nível de tensões residuais do que a mesma construção em aço carbono. Consequentemente a estrutura construída em aço de alta resistência provavelmente apresentará maior deformação na soldagem [7].

2.6.1.6 RESTRIÇÃO.

O grau de restrição das peças durante a soldagem, aquecimento e resfriamento, será, em resumo, o fator determinante do nível de intensidade das tensões residuais. Sendo então que quanto maior for o grau de restrição durante a soldagem menor será a deformação e mais elevado será o nível das tensões residuais.

Por este aspecto é sempre interessante utilizar o mínimo de restrição, fazendo-se uso quando possível, de pré-deformação, mostrado esquematicamente na figura 2.6.1.6.1.

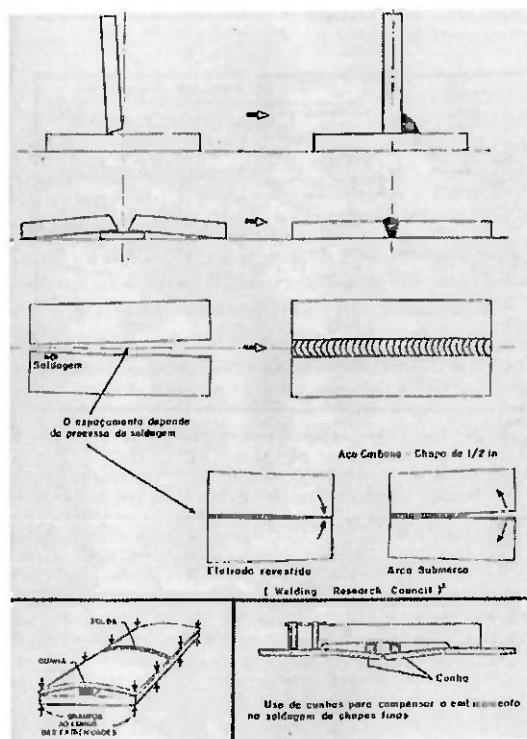


Figura 2.6.1.6.1 - Uso da Pré-Deformação [7].

Pré-aquecendo o metal base aumenta-se a contração pelo alargamento da zona plastificada, entretanto, proporciona um resfriamento mais regular o que tende a reduzir as deformações. O número de passes pode aumentar a contração, mas, à medida que a solda é depositada, o grau de restrição tende a conter esta tendência [7].

2.6.1.7 QUANTIDADE DE METAL DEPOSITADO.

A medida que se aumenta a quantidade de metal depositado durante o processo de soldagem aumenta-se também a energia que é transferida para a peça e, consequentemente, haverá uma maior extensão da zona plastificada e uma maior deformação devido a soldagem.

As distorções advindas do processo de soldagem podem ser minimizadas, pela redução ao mínimo possível da quantidade de metal de adição depositado, desde que seja possível adotar as seguintes medidas preventivas: reduzir o reforço da solda; utilizar chanfros com abertura e espaçamento pequenos, compatíveis com a penetração completa; não havendo contra-indicação do ponto de vista metalúrgico, optar por eletrodos com diâmetro maior; para chapas espessas, reduzir o ângulo de abertura e aumentar o espaçamento ou utilizar a preparação do tipo U, porém, neste caso, normalmente a menor deformação é obtida com a adoção de chanfros duplos, duplo V ou duplo U; quando haver a possibilidade utilizar soldas intermitentes [7]. A figura 2.6.1.7.1 mostra diferentes tipos de chanfros.

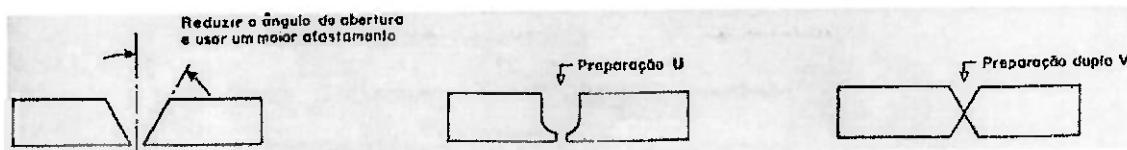


Figura 2.6.1.7.1 - Preparação para chapas espessas [7].

2.6.1.8 SEQUÊNCIA DE DEPOSIÇÃO DOS PASSES.

A sequência de soldagem, ou seja, a maneira de como o metal de adição é depositado, pode ser estabelecida de tal forma a minimizar o grau de distorção total ao final do processo de soldagem. Visando uma diminuição na deformação gerada, é interessante a utilização de chanfros duplos, duplo V ou duplo U. É possível equilibrar ou compensar os esforços de contração soldando-se em ambos os lados. Os chanfros podem ser simétricos ou

assimétricos. Na soldagem multipasse se verificará também uma variação do grau de restrição durante a deposição de cada passe [7]. A figura 2.6.1.7.2 mostra a compensação da distorção do passe anterior pelo seguinte.

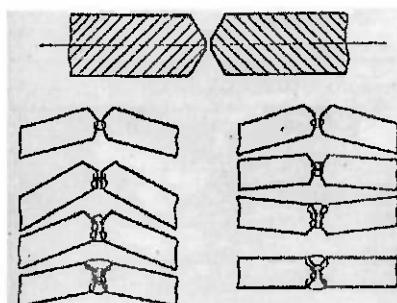


Figura 2.6.1.7.2 - Sequência de soldagem do chanfro simétrico [7].

2.6.1.9 GRADIENTE DE TEMPERATURA.

Na maior parte das vezes escolhe-se o processo de soldagem pela sua regularidade e raramente é escolhido tendo em vista às deformações como principal fator, geralmente opta-se por um processo tal que forneça um gradiente de temperatura no qual resulte na menor extensão da zona plastificada.

Os processos automáticos possibilitam a soldagem com alta velocidade e, comparativamente aos processos manuais, normalmente provocam menores deformações devido a: maior quantidade de metal que é depositada por passe, acarretando menor número de passes para completar a junta soldada; maior é a regularidade da soldagem obtendo-se, devido à sua continuidade, uma distribuição mais uniforme de temperatura. A figura 2.6.1.9.1 mostra comparativamente a soldagem manual e automática em relação às isotermas produzidas.

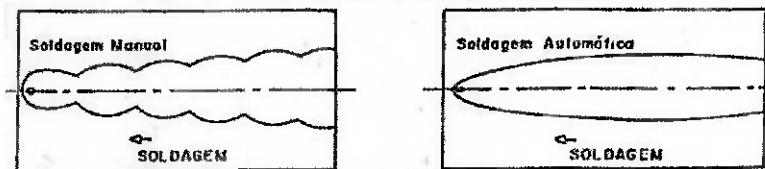


Figura 2.6.1.9.1 - Isotermas produzidas pela soldagem Manual e Automática [7].

O pré-aquecimento, proporcionará um resfriamento mais regular porém não devemos esquecer que ele aumentará a contração devido ao alargamento da zona plastificada. Desta forma, espera-se obter a menor deformação em soldagem utilizando-se um processo de soldagem automático e a máxima velocidade compatível com a deposição de cada passe [7]. A figura 2.6.1.9.2 mostra a relação da contração transversal com a seção transversal da zona fundida em uma soldagem de topo sem restrição.

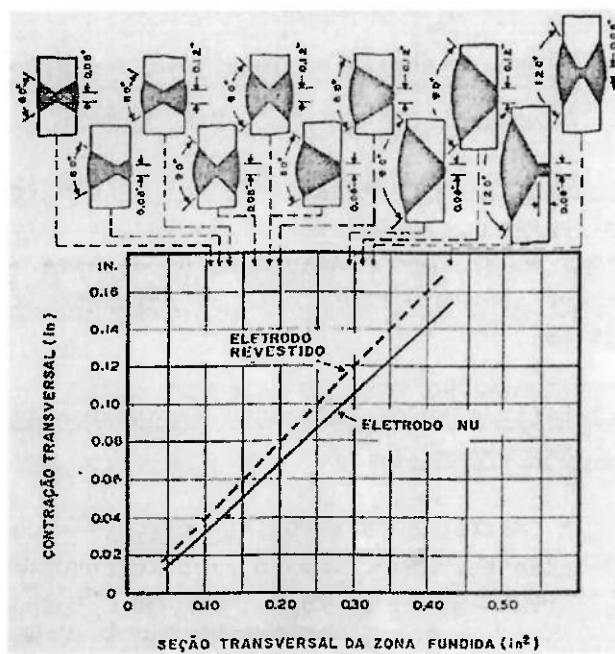


Figura 2.6.1.9.2 - Contração Transversal de Juntas de Topo, Soldagem sem Restrição [7].

3. OBJETIVOS.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo entre o processo de soldagem arco submerso utilizando um arame e o processo de soldagem arco submerso utilizando a técnica Tandem, com dois arames, em juntas de topo do aço AH36, este sendo obtido pela rota de fabricação de laminação controlada seguida de resfriamento acelerado, a qual foi recentemente instalada no Brasil.

4. MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1 METAL DE BASE.

As chapas utilizadas como metal de base neste trabalho foram doadas pela empresa Usiminas® e foram fabricadas pelo processo TMCP. Cada chapa utilizada apresentava a dimensão de 500,00 mm de comprimento, 300,00 mm de largura e 20,50 mm de espessura, conforme mostra a figura 4.1.1.

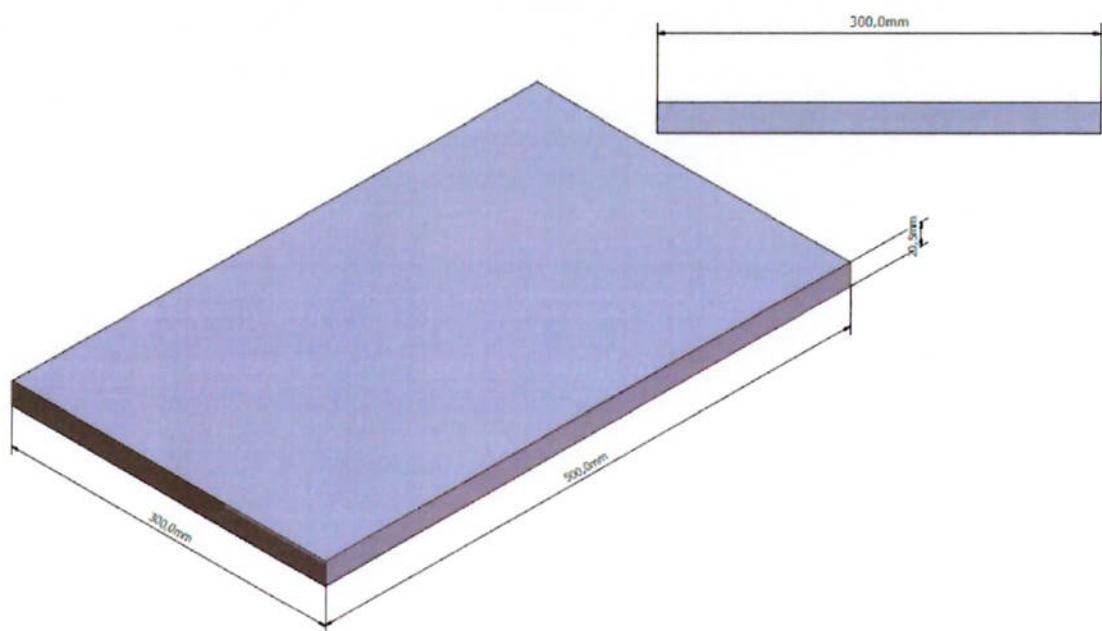


Figura 4.1.1 – Detalhes da geometria e as dimensões de cada chapa utilizada nos experimentos.

Os corpos de prova utilizados foram retirados de uma chapa de 6,00 metros de comprimento e 3,00 metros de largura com o processo de corte oxigás e quando necessário foi retida a zona afeta pelo calor (ZAC) por meio de

usinagem. O sentido de laminação está sempre no maior comprimento (500,00 mm).

Na tabela 4.1.1 pode-se observar a composição química das chapas utilizadas de acordo a norma ASTM A131 [8].

Tabela 4.1.1 - Composição química da chapa AH36 utilizada exigida pela norma ASTM A131.

Composição Química do Aço AH36 segundo a norma ASTM A131													
C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	V	Ti	Cu	Cr	Ni	Mo	Ceq
0,18	0,9-1,60	0,10-0,50	0,035	0,035	0,015	0,02-0,05	0,05-0,10	0,02	0,35	0,20	0,40	0,08	0,38

4.2 CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM.

Todos os consumíveis utilizados na execução da soldagem dos corpos de prova são fabricados no Brasil.

4.2.1 CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM PARA O PROCESSO ARAME TUBULAR.

Para execução da soldagem do passe de raiz, tanto do experimento 1 como do experimento 2, foi utilizado eletrodo tubular com diâmetro de 1,20 mm que exige a proteção gasosa de 100%CO₂.

O eletrodo tubular utilizado segue a especificação da norma AWS A5.20/A5.20M “Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding”,

classificado como E71T1-C [9]. A sua composição química e a suas propriedades mecânicas são mostradas nas tabelas 4.2.1 e 4.2.2.

Tabela 4.2.1 - Composição química segundo fabricante do eletrodo consumível utilizado na soldagem dos passes de raiz dos experimentos 1 e 2.

Composição Química do Consumível Segundo o Fabricante (%)										
Forma	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu
Depositado	0,04	1,3	0,6	0,025	0,025	0,2	0,5	0,2	0,05	0,3

Tabela 4.2.2 - Propriedades mecânicas segundo fabricante do eletrodo consumível utilizado na soldagem dos passes de raiz dos experimentos 1 e 2.

Propriedades Mecânicas do Consumível Segundo o fabricante	
Limite de Resistência (MPa)	510-640
Limite de Escoamento (MPa)	420
Alongamento (%)	22
Média do Ensaio de Impacto 0°C (J)	54

4.2.2 CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM PARA O PROCESSO ARCO SUBMERSO.

Para execução da soldagem dos passes de enchimento e acabamento, tanto do experimento 1 como do experimento 2, foi utilizado eletrodo sólido com diâmetro de 3,98 mm com a proteção da poça de fusão sendo executada por um fluxo neutro.

O eletrodo sólido utilizado segue a especificação da norma AWS A5.17/A5.17M "Specification for Carbon Steel Electrode sand Fluxes for Submerged Arc Welding", classificado como 107 F7P2 EM12K E71T1-C [10].A

sua composição química e a suas propriedades mecânicas são mostradas nas tabelas 4.2.3 e 4.2.4.

Tabela 4.2.3 - Composição química segundo fabricante do eletrodo consumível utilizado na soldagem dos passes de enchimento e acabamento dos experimentos 1 e 2.

Composição Química do Consumível Segundo o Fabricante (%)						
Forma	C	Mn	Si	S	P	Cu
Depositado	0,04	1,6	0,54	0,007	0,029	0,06

Tabela 4.2.4 – Propriedades mecânicas segundo fabricante do eletrodo consumível utilizado na soldagem dos passes de enchimento e acabamento dos experimentos 1 e 2.

Propriedades Mecânicas do Consumível Segundo o Fabricante	
Limite de Resistência (MPa)	585
Limite de Escoamento (MPa)	484
Alongamento (%)	22
Média do Ensaio de Impacto -29°C (J)	39

4.3 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM.

Foram utilizados quatro (4) chapas nos experimentos, onde cada par de chapa formou uma junta que foi soldada. Uma junta foi denominada experimento 1 e a outra junta foi denominado experimento 2. Pode-se observar na figura 4.4.1 as chapas chanfradas e montadas antes da execução da soldagem.

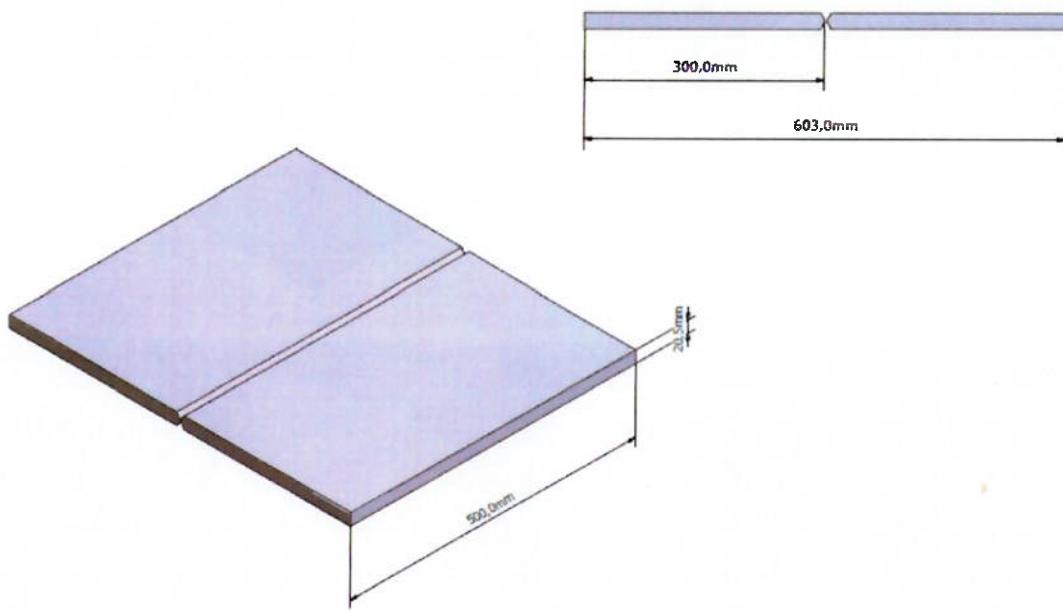


Figura 4.3.1 – Detalhes das chapas chanfradas e montadas antes da execução da soldagem.

Em cada experimento foi executado um procedimento de soldagem e que são descritos na tabela 4.3.1. A soldagem das chapas foi executada pela empresa Metalúrgica Atlas® sob o acompanhamento do aluno.

Tabela 4.3.1 - Descrição dos processos utilizados em cada experimento e do tipo de identificação utilizado neste trabalho.

JUNTA	PROCESSOS DE SOLDAGEM UTILIZADOS	IDENTIFICAÇÃO
Experimento 1	Arame Tubular + Arco Submerso	EXP1
Experimento 2	Arame Tubular + Arco Submerso Tandem 2 Arames	EXP2

4.4 VARIÁVEIS UTILIZADAS NA SOLDAGEM.

Em ambos os experimentos a soldagem foi executada na posição plana e foi utilizado o mesmo tipo de geometria de junta, sendo esta mostrada na figura 4.4.1.

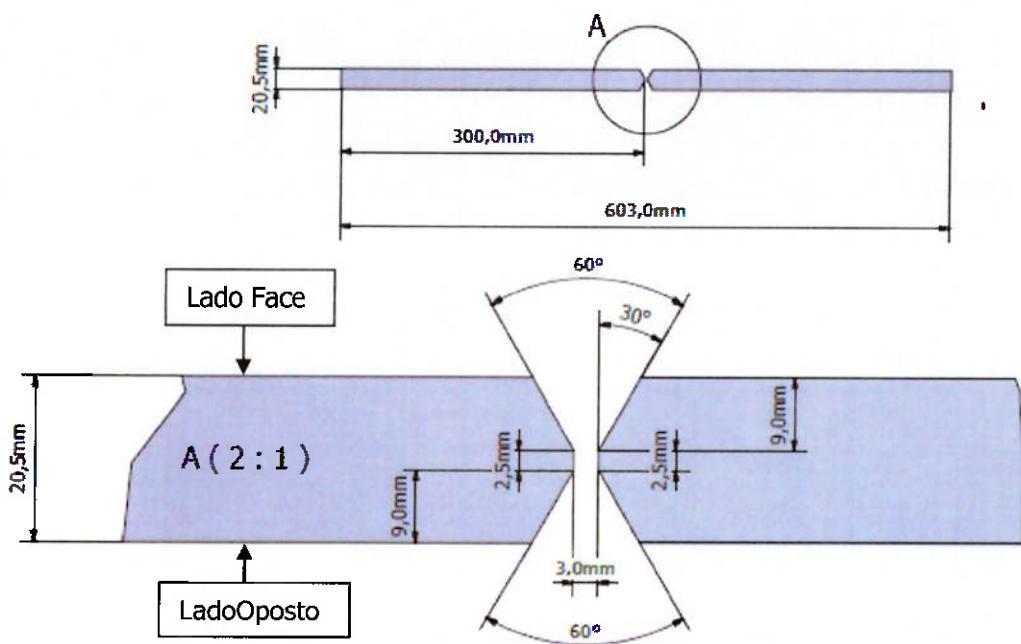


Figura 4.4.1 – Dimensões do chanfro adotado com formato em "X" (duplo V) e simétrico.

Para o experimento 1 foi adotado o processo de soldagem arame tubular, com proteção gasosa de 100% de CO₂, para execução do passe de raiz e o processo arco submerso, com um arame, para os passes de enchimento e acabamento. A soldagem com arco submerso utilizou corrente direta (CCD). Na tabela 4.4.1 é possível observar as variáveis utilizadas durante a soldagem deste.

Tabela 4.4.1 – Variáveis utilizadas na execução de cada passe de solda do experimento 1.

EXPERIMENTO 1	Passe de Raiz	Passe de Enchimento lado Face	Passe de Enchimento lado Raiz	Passe de Acabamento lado Face	Passe de Acabamento lado Raiz
Processo de Soldagem	Arame Tubular	Arco Submerso (CCD)	Arco Submerso (CCD)	Arco Submerso (CCD)	Arco Submerso (CCD)
Tensão (v)	27	34	34,5	34	32
Corrente (A)	140	468	420	620	650
Velocidade de Soldagem (mm/s)	3,57	5,48	5,06	5,43	3,96
Eficiência do Processo	0,8	1	1	1	1
Energia (J/mm)	847,1	2903,9	2861,8	3878,7	5252,0

Para o experimento 2 foi adotado o processo de soldagem arame tubular, com proteção gasosa de 100% de CO₂, para execução do passe de raiz e o processo arco submerso com a técnica Tandem com dois arames para os passes de enchimento e acabamento. A soldagem com o processo arco submerso utilizou no primeiro arame corrente contínua direta (CCD) e no segundo arame corrente alternada (CA). Na tabela 4.4.2 é possível observar as variáveis utilizadas durante a soldagem deste.

Tabela 4.4.2 – Variáveis utilizadas na execução de cada passe de solda do experimento 2.

EXPERIMENTO 2	Passe de Raiz	Passe de Enchimento/Acabamento Face		Passe de Enchimento/Acabamento Raiz	
Processo de Soldagem	Arame Tubular	1º Arame (CCD)	2º Arame (CA)	1º Arame (CCD)	2º Arame (CA)
Tensão (v)	27	29,5	32	29	33
Corrente (A)	140	620	540	620	540
Velocidade de Soldagem (mm/s)	3,42	8,83	8,83	8,83	8,83
Eficiência do Processo	0,8	1	1	1	1
Energia (J/mm)	884,2	2071,3	1957,0	2036,2	2018,1

4.5 TÉCNICA UTILIZADA PARA MEDAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES.

Os corpos de prova foram divididos em vinte pontos iguais em um dos lados no maior comprimento e em dez pontos iguais em um dos lados de menor comprimento, conforme mostra figura 4.5.1, para medição das deformações.

Os equipamentos que foram utilizados para realização das medições de distorção dos corpos de provas foram os mesmos em todo o experimento. O paquímetro universal com escala de 0,02 mm e um bloco padrão. Todas as medições foram executadas sobre uma mesa de desempeno que normalmente é utilizada na sala de metrologia.

A medição se iniciava com o posicionado de quatro blocos padrões de 10,0mm de altura sob a mesa de desempeno e o corpo de prova era posicionado sob os blocos padrões de uma maneira que a deformação gerada na peça não interferisse na medição. A montagem do corpo de prova para realização das medidas de distorção são mostradas na figura 4.5.2.

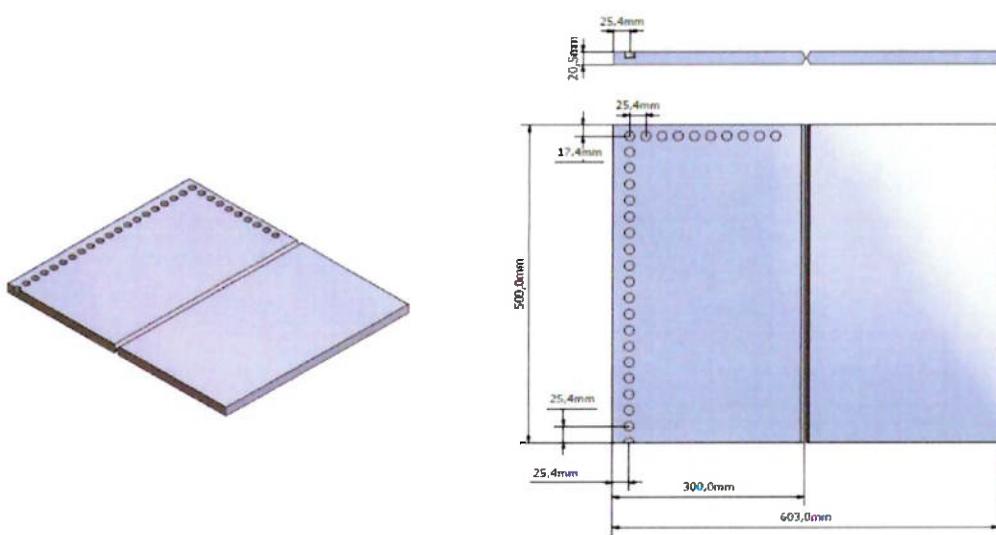


Figura 4.5.1 – Detalhe das marcações de onde eram retirados os valores de

distorção dos experimentos. O centro de cada círculo representa o ponto exato das medições.

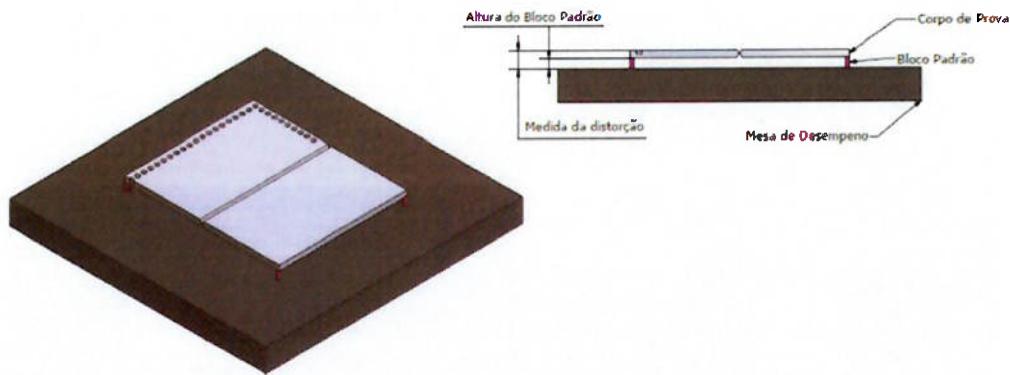


Figura 4.5.2 – Detalhe do corpo de prova posicionado sob os blocos padrões e sob a mesa de desempenho para medir a deformação dos experimentos.

4.6 SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM.

A sequência de soldagem utilizada para a realização dos experimentos também está relacionada com a medição da distorção nos experimentos. Toda a soldagem dos experimentos foi executada na posição plana.

4.6.1 SEQUÊNCIA DE REALIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA DO EXPERIMENTO 1.

A soldagem foi iniciada com a realização do passe de raiz pelo lado denominado Lado Face, mostrado na figura 4.4.1, com o processo arame tubular com proteção gasosa de 100% de CO₂. Não foi realizado pré-

aquecimento e após a execução do cordão de solda era esperado o corpo de prova chegar a temperatura ambiente, aproximadamente 27 °C, para poder realizar as medições de deformação do mesmo.

O segundo cordão de solda foi realizado no Lado Face após a limpeza da superfície do cordão da raiz por esmerilhamento. Foi utilizado o processo de soldagem arco submerso para realizar o passe de enchimento e foi executada com a peça a temperatura ambiente. As medições de deformação foram realizadas a temperatura ambiente após a peça resfriar ao ar.

O terceiro cordão de solda foi realizado no Lado Oposto sob o cordão da raiz. Antes da soldagem do passe de enchimento do Lado Oposto foi realizado uma limpeza por esmerilhamento na junta soldada a fim de retirar qualquer escória. Foi utilizado o processo arco submerso para execução deste cordão de solda de enchimento e foi realizada com a peça a temperatura ambiente. As medições de deformação foram realizadas a temperatura ambiente após a peça resfriar ao ar.

O quarto cordão de solda foi realizado no Lado Face sob o cordão de enchimento. A soldagem do passe de acabamento do Lado Face foi realizada com a peça a temperatura ambiente e foi utilizado o processo arco submerso para execução deste cordão de solda de acabamento. As medições de deformação foram realizadas a temperatura ambiente após a peça resfriar ao ar.

O quinto cordão de solda foi realizado no Lado Oposto sob o cordão de enchimento. A soldagem do passe de acabamento do Lado Oposto foi realizada com a peça a temperatura ambiente e foi utilizado o processo arco submerso

para execução deste cordão de solda de acabamento. As medições de deformação foram realizadas a temperatura ambiente após a peça resfriar ao ar.

4.6.2 SEQUÊNCIA DE REALIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA DO EXPERIMENTO 2.

A soldagem foi iniciada com a realização do passe de raiz pelo lado denominado Lado Face, mostrado na figura 4.4.1, com o processo arame tubular com proteção gasosa de 100% de CO₂. Não foi realizado pré-aquecimento e após a execução do cordão de solda era esperado o corpo de prova chegar a temperatura ambiente, aproximadamente 27 °C, para poder realizar as medições de deformação do mesmo.

O segundo cordão de solda foi realizado no Lado Face após a limpeza da superfície do cordão da raiz por esmerilhamento. Foi utilizado o processo de soldagem arco submerso Tandem com dois arames para realizar o passe enchimento e acabamento e este foi executado com a peça a temperatura ambiente. As medições de deformação foram realizadas a temperatura ambiente após a peça resfriar ao ar.

O terceiro cordão de solda foi realizado no Lado Oposto sob o cordão da raiz. Antes da soldagem do passe de enchimento e acabamento do Lado Oposto foi realizada uma limpeza por esmerilhamento na junta soldado a fim de retirar qualquer escória. Foi utilizado o processo arco submerso Tandem com dois arames para execução deste cordão de solda de enchimento e foi realizada com

a peça a temperatura ambiente. As medições de deformação foram realizadas a temperatura ambiente após a peça resfriar ao ar.

No experimento 2 só foi possível realizar 3 camadas de solda devido os passos de enchimento e acabamento serem executados com o processo de soldagem arco submerso Tandem com dois arames.

4.7 ENSAIO MACROGRÁFICO DAS JUNTAS SOLDADAS.

Foram realizados ensaios de macrografias nas juntas soldadas do experimento 1 e do experimento 2.

O objetivo do ensaio foi mensurar a extensão da zona afetada pelo calor, a área final de cada passe e a diluição da junta soldada, que podem ser observadas por esta técnica. Foi utilizado o reagente Nital com concentração de 6%.

Todas as medidas foram realizadas com auxílio de uma lupa estereoscópica da marca Carl Zeiss® e o software Axio Vision®.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

5.1 ANÁLISE MACROGRÁFICA DAS JUNTAS SOLDADAS.

Para a junta soldada com 1 arame, experimento 1, observou-se uma diluição em torno de 33%, ou seja, o metal de base participa do cordão de solda contribuindo com 33% do total. Para a junta soldada com 2 arames observou-se uma diluição em torno de 39%, este acréscimo na participação do metal base no cordão soldado deve-se ao fato de ao serem somadas a energia de soldagem dos dois arcos abertos, um em cada arame, no experimento 2 é gerado um fornecimento de calor bastante superior aquela em comparação com o processo com 1 arame. A figura 5.1.1 e 5.1.2 mostra como foi mensurado a diluição a partir das imagens macrográficas.

O resultado da maior quantidade de calor com maior taxa de deposição é uma penetração bastante superior, ao mesmo tempo, o maior calor fornecido acarretou em fusão de maior volume de metal base, em comparação com a técnica que utiliza 1 arame apenas. A figura 5.1.3 mostra as macrografias das juntas soldadas dos experimentos 1 e 2, primeiro com 1 arame, onde foram necessários 5 passes, e depois o cordão realizado com 2 arames, onde foram necessários 3 passes.

Foi observado nas imagens macrográficas, figura 5.1.3, de ambos os experimentos uma linha de tom de cinza escuro no centro do corpo de prova que aparenta uma grande probabilidade de ser segregação oriunda do processo de fabricação.

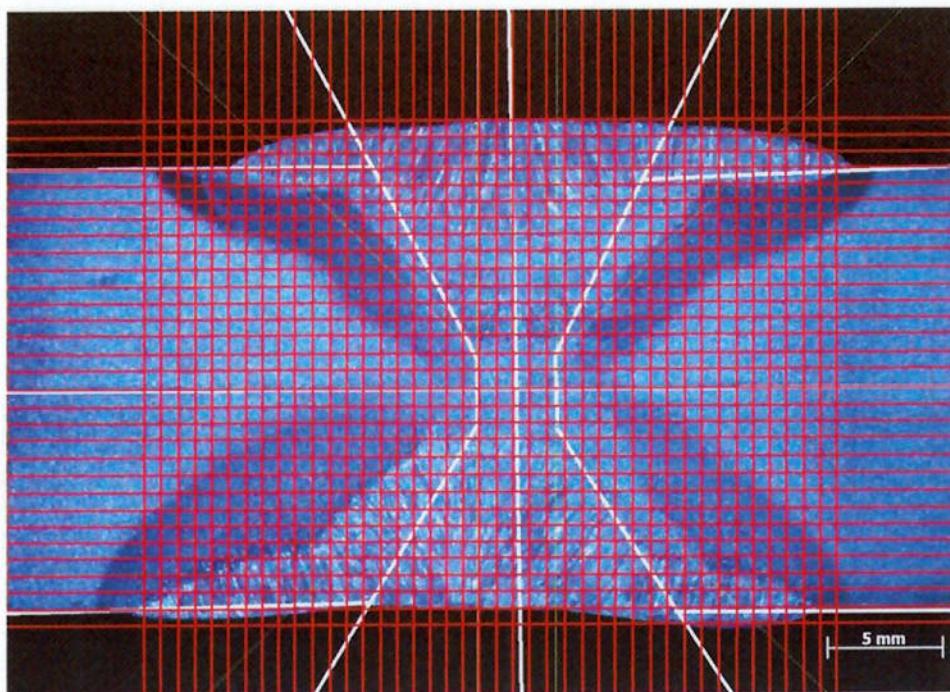


Figura 5.1.1 - Malha para medição da diluição no experimento 1.

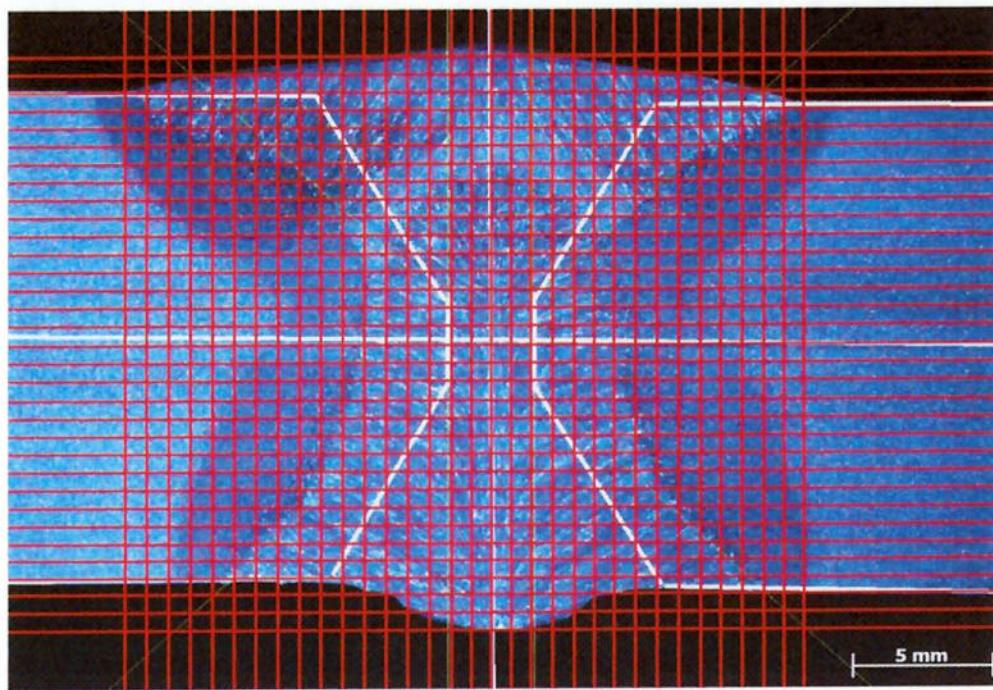
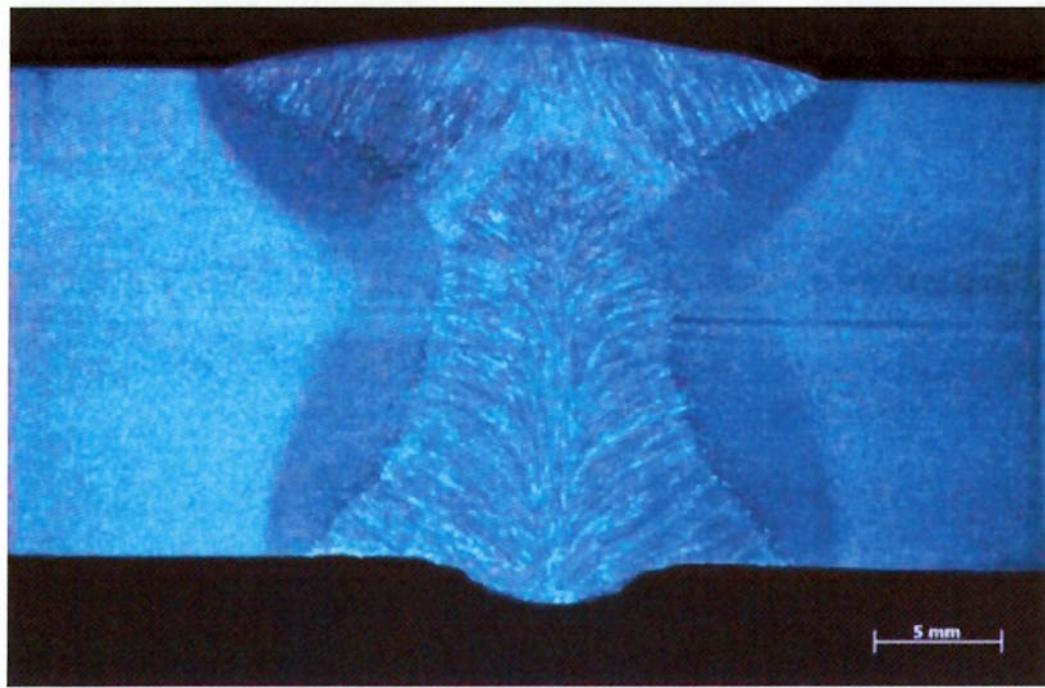


Figura 5.1.2 - Malha para medição da diluição no experimento 2.



(a) Experimento 1



(b) Experimento 2

Figura 5.1.3 - Macrografia da junta soldada. (a) Macrografia da junta soldada do experimento 1. (b) Macrografia da junta soldada no experimento 2.

5.1.2 SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM

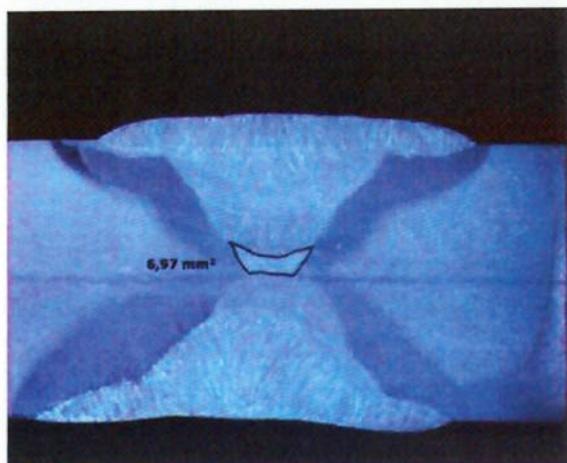
A sequência de soldagem, alternando-se os lados pelo qual a soldagem foi conduzida, contribuiu para uma menor distorção geral ao término dos cordões.

A sequência de soldagem para o experimento 1 (1 arame) está identificada através da figura 5.1.4 onde foram destacados cada passe de soldagem, a medida que se prosseguia o processo de soldagem alternava-se o lado pelo qual a soldagem era realizada.

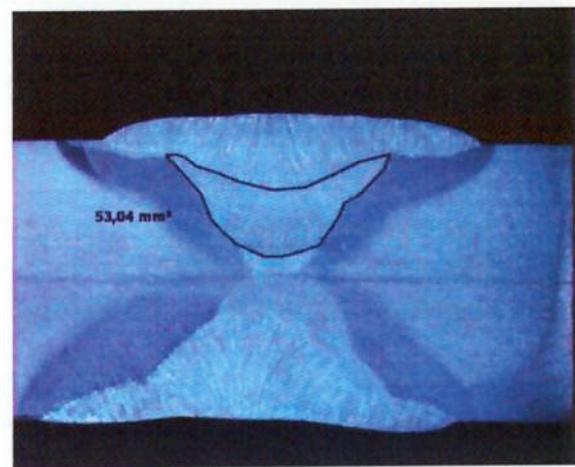
É possível observar as maiores áreas para os passes de acabamento, uma vez que parte do metal depositado anteriormente sofre nova fusão e juntam-se ao novo passe de soldagem que se forma. Os valores da energia de soldagem e da área da seção transversal identificadas na figura 5.1.4 são mostrados na tabela 5.1.1.

Tabela 5.1.1: Energia de Soldagem para cada passe e a área da seção transversal de metal depositado.

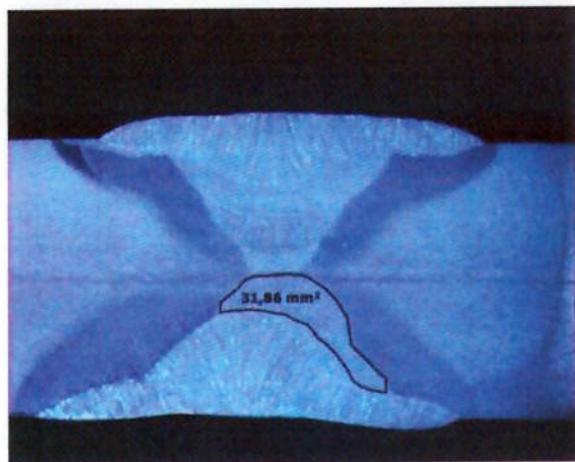
Tipo de Passe	Energia de Soldagem (J/mm)	Área Seção Depositada (mm ²)
Passe de Raiz	847,1	6,97
Passe de Enchimento Lado Face	2903,9	53,04
Passe de Enchimento Lado Oposto	2861,8	31,86
Passe Acabamento Lado Face	3878,7	89,08
Passe Acabamento Lado Raiz	5252	125,88



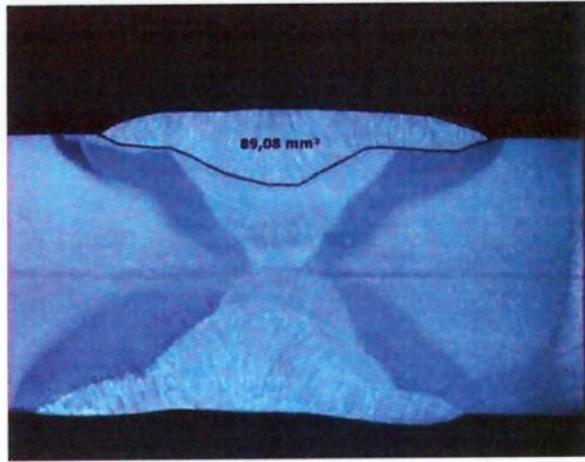
(a)



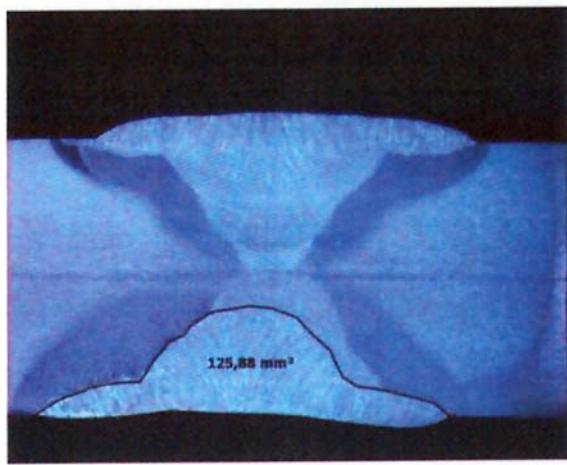
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.1.4 - Junta soldada com 1 arame, sequência de soldagem identificada pelo passe de raiz (a) passe seguinte de enchimento pelo lado da face (b) passe de enchimento pelo lado oposto da face (c) passe de acabamento pelo lado da face (d) passe de acabamento pelo lado oposto da face (e), ataque Nital 6%.

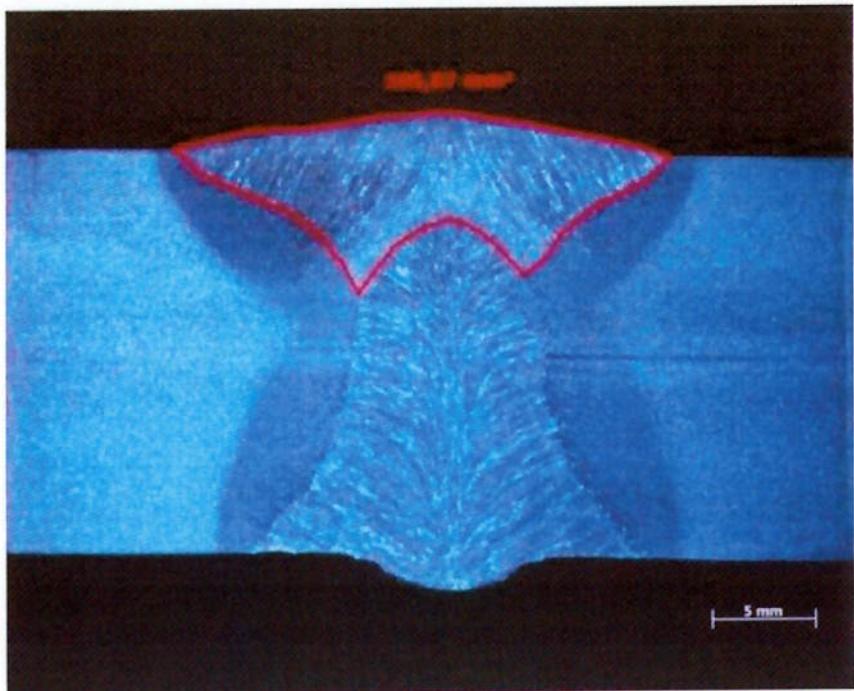
A mesma sequência de soldagem que foi realizada para o experimento 1 foi também realizada para o experimento 2, porém, o preenchimento da junta foi alcançado com uma menor quantidade de cordões de solda. A maior taxa de deposição e o maior fornecimento de calor, referentes à técnica Tandem com 2 arames, determinaram o menor número de passes de soldagem necessários para o completo preenchimento da junta em comparação com a técnica com 1 arame.

O resultado obtido para o experimento 2 foi uma junta cujos passes de enchimento/acabamento, realizados em ambos os lados, promoveram a fusão completa de todo o passe de raiz. Visto como uma vantagem, a total fusão do passe de raiz demonstra-se como um método preventivo, contra o problema de falta de fusão.

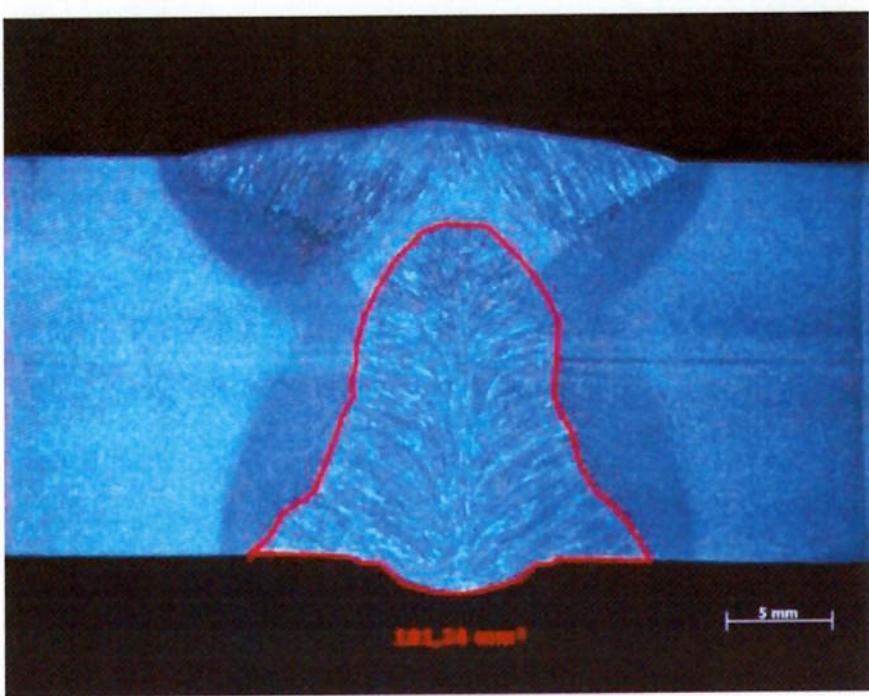
A sequência de soldagem para o experimento 2 (2 arames) está identificada na figura 5.1.5, onde foram destacados os passes de enchimento/acabamento. A tabela 5.1.2 mostra a energia de soldagem e a respectiva área da seção identificada na macrografia.

Tabela 5.1.2: Energia de Soldagem para cada passe e área da seção transversal do cordão de solda identificada na macrografia.

Tipo de Passe	Energia de Soldagem (J/mm)	Área Seção Depositada (mm ²)
Passe de Raiz	884,2	0
Passe de Enchimento/Acabamento Lado Face	4028,3	106,87
Passe de Enchimento/Acabamento Lado Oposto	4054,3	181,24



(a)



(b)

Figura 5.1.5 - Junta soldada com 2 arames, diluição do cordão em torno de 40% (a), Sequência dos passes de soldagem destacando o passe de enchimento/acabamento pelo lado da face (b), Passe de enchimento/acabamento lado oposto da face (c), ataque Nital 6%.

5.2 EXTENSÃO DA ZONA AFETADA PELO CALOR.

A partir das imagens das macrografias das juntas soldadas dos experimentos 1 e 2 foi realizado a medição da extensão da zona afetada pelo calor (ZAC) em ambos os experimentos, a maneira e a região onde foram feitas as medições está mostrada na figuras 5.2.1.

Na tabela 5.2.1 é mostrado os valores de energia de soldagem utilizado para cada cordão de solda e a extensão da ZAC do mesmo. Na figura 5.2.2 é mostrado uma comparação entre o valor de extensão total da ZAC versus a quantidade de energia de soldagem utilizada.

A região da zona afetada pelo calor, apresentada pela junta soldada com 1 arame, possuiu o caráter mais heterogêneo, os passes de soldagem, em parte, sofreram fusão pelo passe acima seguinte.

No experimento 1 o valor da extensão da ZAC foi executada para cada cordão de solda. Neste, figura 5.2.1 (a), pode ser observado que a região com menor extensão da ZAC esta na superfície da chapa que foi gerada pelo passe de acabamento, tanto do lado face como do lado oposto, sendo menor que os valores do passe de raiz.

Os passes de enchimentos, lado face e lado oposto, apresentam valores intermediários de extensão da ZAC e os maiores valores são observados sob o passe de acabamento. Esses grandes valores da extensão da ZAC é devido o acabamento ter sido executado com apenas um passe, provavelmente, uma camada de acabamento com dois ou três passes teria uma menor extensão da ZAC. Também para esses maiores valores da extensão da ZAC pode-se notar

claramente uma região onde sofreu o ciclo térmico dos passos de enchimento e posteriormente sofreu com os ciclos térmicos dos passos de acabamento.

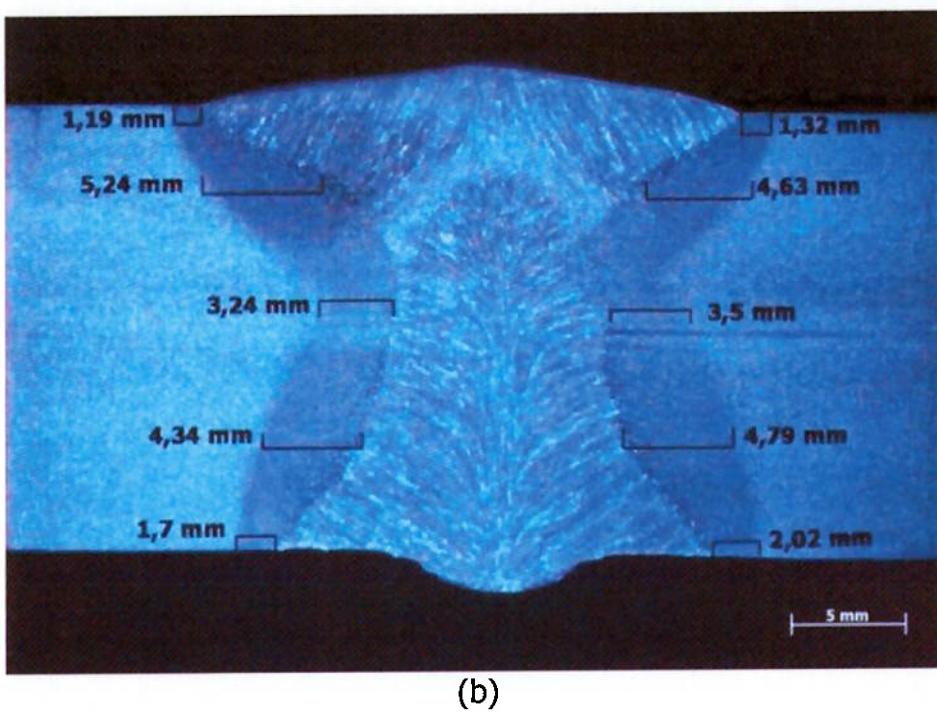
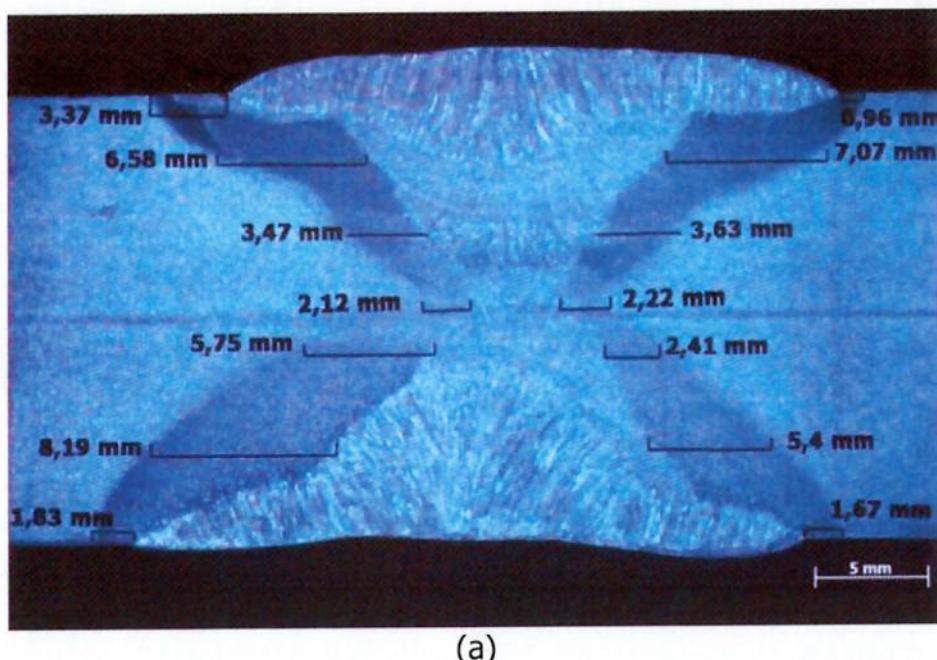
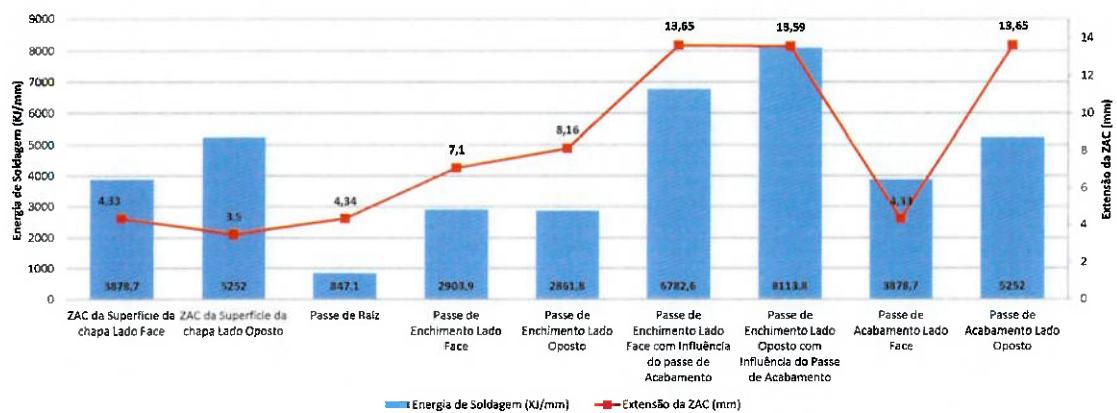


Figura 5.2.1 - Extensão da Zona Afetada pelo Calor da junta soldada com 1 arame (a). Extensão da ZAC na junta soldada com 2 arames (b), ataque Nital 6%.

Tabela 5.2.1 - Energia de soldagem e extensão da ZAC do experimento 1.

Tipo de Passe	Extensão da ZAC (mm)		Energia de Soldagem (KJ/mm)
	Lado Esquerdo	Lado Direito	
ZAC da Superfície da chapa Lado Face	3,37	0,96	3878,7
ZAC da Superfície da chapa Lado Oposto	1,83	1,67	5252
Passe de Raiz	2,12	2,22	847,1
Passe de Enchimento Lado Face	3,47	3,63	2903,9
Passe de Enchimento Lado Oposto	5,75	2,41	2861,8
Passe de Enchimento Lado Face com Influência do passe de Acabamento	6,58	7,07	6782,6
Passe de Enchimento Lado Oposto com Influência do Passe de Acabamento	8,19	5,4	8113,8
Passe de Acabamento Lado Face	3,37	0,96	3878,7
Passe de Acabamento Lado Oposto	6,58	7,07	5252

**Figura 5.2.2** – Gráfico comparativo entre os valores da extensão da ZAC e os valores de energia de soldagem utilizados no experimento 1.

Para o experimento 2 a tabela 5.2.2 demonstra os valores de energia de soldagem utilizado para cada cordão de solda e a extensão da ZAC do mesmo. Na figura 5.2.3 é mostrado uma comparação entre o valor de extensão total da ZAC versus a quantidade de energia de soldagem utilizada.

A região da zona afetada pelo calor, apresentada pela junta soldada com a técnica Tandem com 2 arames, demonstra um caráter mais homogêneo, os

passes de soldagem, em parte, são bem definidos pelo fato de apresentarem grande penetração.

No experimento 2 o valor da extensão da ZAC foi executada para cada cordão de solda. Neste, figura 5.2.1 (b), pode ser observado que a região com menor extensão da ZAC está na superfície da chapa que foi gerada pelo passe de enchimento/acabamento, tanto do lado face como do lado oposto, sendo menor que os valores do passe de raiz.

Os maiores valores para extensão da ZAC são encontrados sob os passes de enchimento/acabamento. Estes valores só são influenciados pela quantidade de energia utilizada na soldagem dos mesmos.

Tabela 5.2.2 - Energia de soldagem e extensão da ZAC do experimento 2.

Tipo de Passe	Extensão da ZAC Experimento 2		Energia de Soldagem (kJ/mm)
	Lado Esquerdo	Lado Direito	
Passe de Raiz	3,24	3,5	884,2
ZAC da Superfície da chapa Lado Face	1,19	1,32	4028,3
Passe de Enchimento/Acabamento Lado Face	5,24	4,63	4028,3
ZAC da Superfície da chapa Lado Oposto	1,7	2,02	4054,4
Passe de Enchimento/Acabamento Lado Oposto	4,34	4,79	4054,4

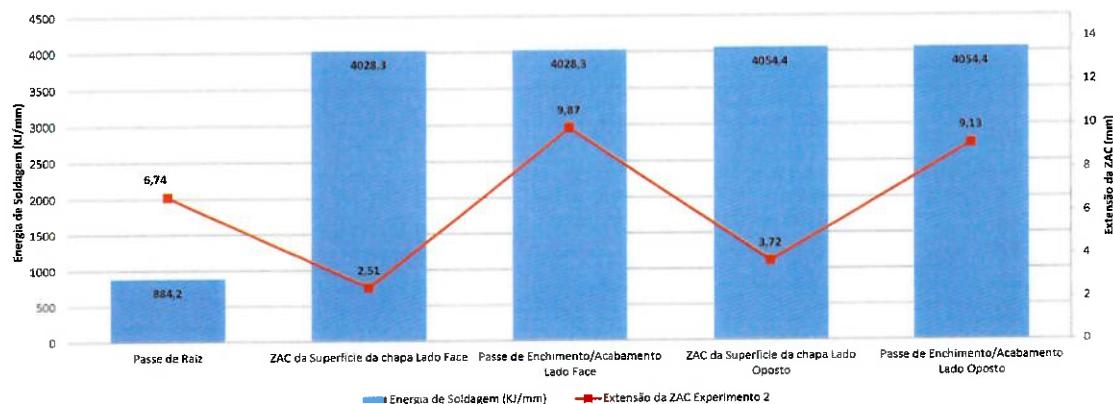


Figura 5.2.3 - Gráfico comparativo entre os valores da extensão da ZAC e os valores de energia de soldagem utilizados no experimento 2.

Realizando uma comparação entre os experimento 1 e 2 podemos observar uma maior extensão da ZAC para o experimento 1. Mesmo utilizando uma menor quantidade de energia de soldagem para cada passe ao realizar a soma do total da energia, mostrado na figura 5.2.4, utilizado na execução de todos os cordões de solda podemos observar que o experimento 2 que utilizou o processo de soldagem Arco Submerso com a técnica Tandem (2 arames) apresenta uma redução na extensão da ZAC.

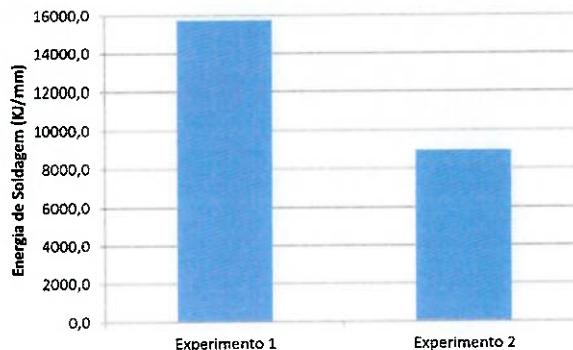


Figura 5.2.4 – Gráfico comparativo entre o experimento 1 e o experimento 2 do total de energia de soldagem utilizada em cada experimento.

5.3 COMPARAÇÕES ENTRE AS DISTORÇÕES.

5.3.1 VALORES DE DISTORÇÃO DO EXPERIMENTO 1.

Para realização das análises de distorção do experimento 1 foi considerado o valor nominal da espessura dos corpos de prova em cada ponto, podendo ser acrescido o valor de distorção quando tender para o lado face ou decrescido o valor da distorção quando o corpo de prova tender para o lado oposto.

Os valores de distorção do passe de raiz são observados na tabela 5.3.1 onde é demonstrada a distorção de cada ponto do maior comprimento (500,0 mm) e do menor comprimento (300,0 mm).

Tabela 5.3.1 – Valores de distorção para cada ponto do experimento 1.

Passe de Raiz (Experimento 1)				
Maior Comprimento (500,0 mm)		Menor Comprimento (300,0 mm)		Energia de Soldagem Utilizada
Ponto de Medição	Valor (mm)	Ponto de Medição	Valor (mm)	
P1	20,8	P1	20,9	847,1
P2	20,9	P2	20,9	
P3	20,8	P3	20,7	
P4	20,8	P4	20,7	
P5	20,7	P5	20,7	
P6	20,9	P6	20,7	
P7	20,8	P7	20,7	
P8	20,8	P8	20,6	
P9	20,9	P9	20,3	
P10	21,0	P10	20,7	
P11	20,9	Média	20,66	
P12	21,0	Desv. Padrão	0,16	
P13	20,9			
P14	20,9			
P15	21,0			
P16	21,3			
P17	21,0			
P18	21,1			
P19	21,3			
P20	21,3			
Média	20,96			
Desv. Padrão	0,17			

Para melhorar a visualização dos dados da tabela 5.3.1 foi desenvolvido um gráfico, mostrado na figura 5.3.1, com as deformações ocorridas para cada ponto durante a soldagem do corpo de prova do experimento 1. O gráfico demonstra uma linha na cor azul que representa os valores da espessura da chapa e para as representações de deformação, linha verde e vermelha, são atribuídos os valores de distorção acrescidos com a espessura da chapa.

Deformação no Experimento 1 no Passe de Raiz no Maior e Menor Comprimento

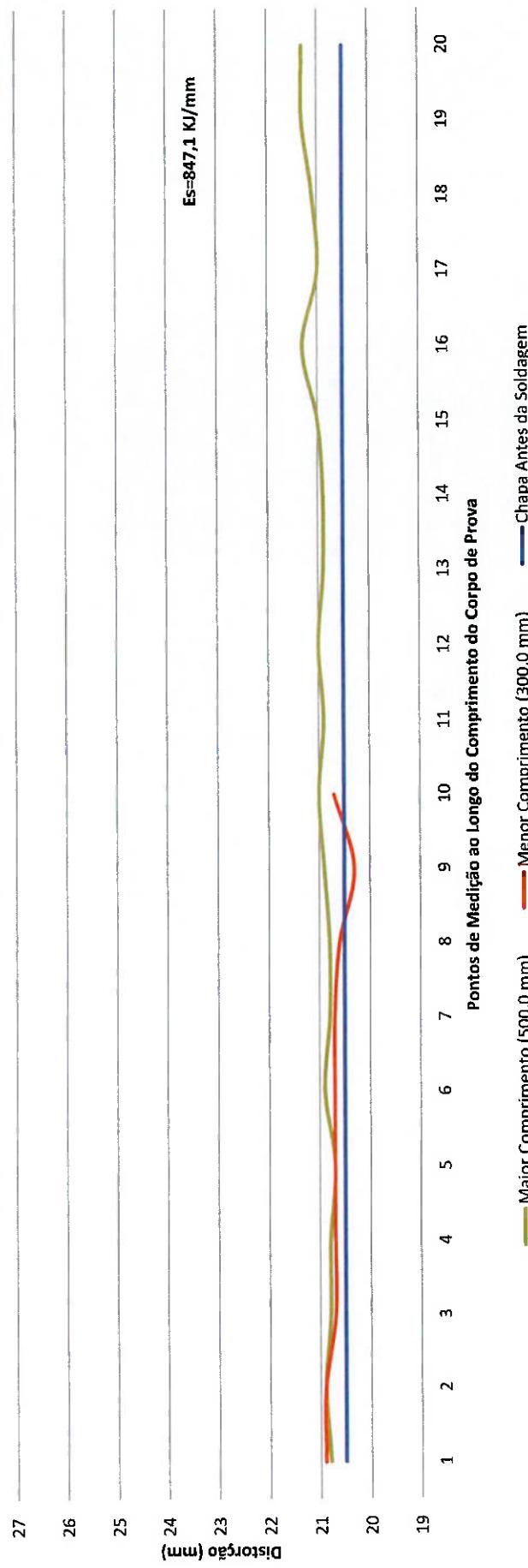


Figura 5.3.1 – Valores de distorção para cada ponto no passe de raiz do experimento 1.

Para melhorar a visualização dos dados da tabela 5.3.2 foi desenvolvido um gráfico, mostrado na figura 5.3.2, com as deformações ocorridas para cada ponto durante a soldagem do corpo de prova do experimento 1. O gráfico demonstra uma linha na cor azul que representa os valores da espessura da chapa e para as representações de deformação, linha verde e vermelha, são atribuídos os valores de distorção acrescidos com a espessura da chapa.

Deformação no Experimento 1 no Passe de Enchimento no Lado Face no Maior e Menor Comprimento

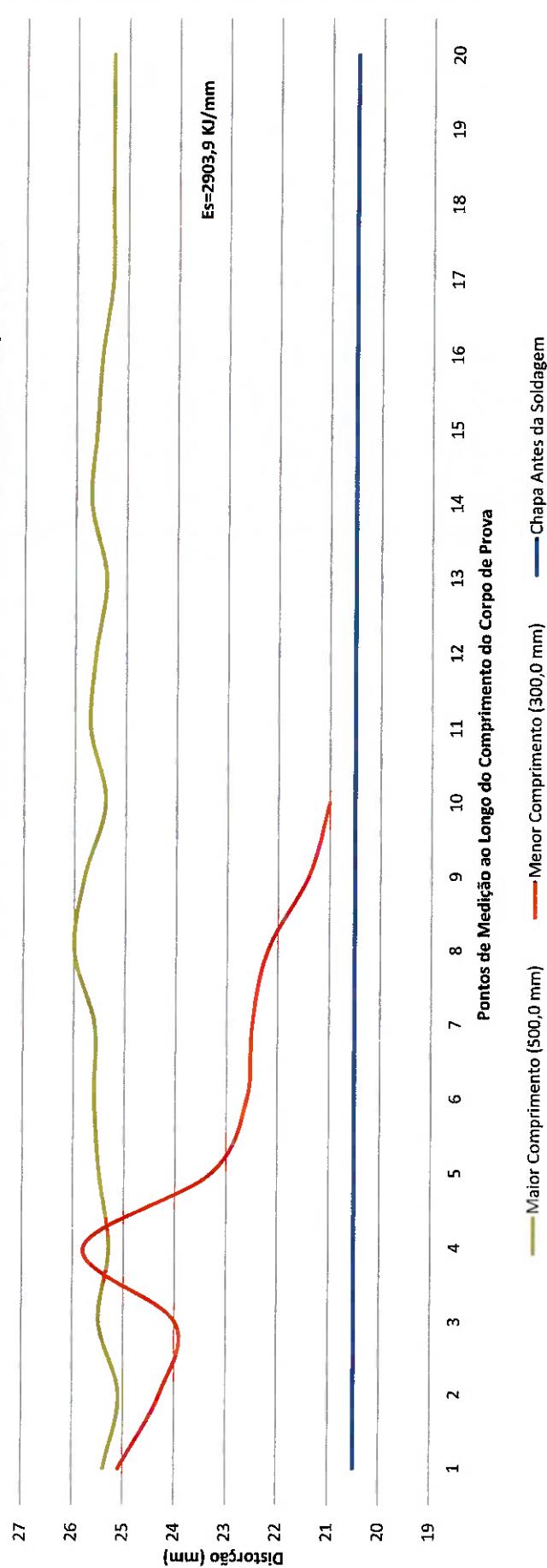


Figura 5.3.2 - Valores de distorção para cada ponto no passe de enchimento do experimento 1.

A distorção do corpo de prova após a execução do passe de raiz foi pequena e permaneceu bem próxima do valor da chapa como recebida. De uma forma geral a distorção se comportou bem parecida entre as duas dimensões mensuradas.

Os valores de distorção para o passe de enchimento do lado face são observados na tabela 5.3.2 onde é demonstrada a distorção de cada ponto do maior comprimento (500,0 mm) e do menor comprimento (300,0 mm).

Tabela 5.3.2 - Valores de distorção para cada ponto do experimento 1.

Passe de Enchimento Lado Face (Experimento 1)				Energia de Soldagem Utilizada
Maior Comprimento (500,0 mm)		Menor Comprimento (300,0 mm)		Energia de Soldagem Utilizada
Ponto de Medição	Valor (mm)	Ponto de Medição	Valor (mm)	
P1	25,4	P1	25,1	
P2	25,1	P2	24,3	
P3	25,5	P3	24,0	
P4	25,3	P4	25,8	
P5	25,5	P5	23,3	
P6	25,6	P6	22,6	
P7	25,6	P7	22,5	
P8	26,0	P8	22,2	
P9	25,8	P9	21,4	
P10	25,4	P10	21,0	
P11	25,7	Média	20,66	
P12	25,6	Desv. Padrão	1,49	
P13	25,4			2903,9
P14	25,7			
P15	25,6			
P16	25,5			
P17	25,3			
P18	25,3			
P19	25,3			
P20	25,3			
Média	25,50			
Desv. Padrão	0,21			

A distorção no maior comprimento apresenta maiores valores quando comparado ao passe de raiz. Este comportamento está relacionado a quantidade de energia aplicada durante a soldagem e a um momento gerado na seção transversal da junta soldada.

Para a distorção no menor comprimento observa-se que próximo do cordão de solda, ponto 10, é menor quando comparado ao ponto 1 que está na extremidade da chapa.

Os valores de distorção para o passe de enchimento do lado oposto são observados na tabela 5.3.3 onde é demonstrada a distorção de cada ponto do maior comprimento (500,0 mm) e do menor comprimento (300,0 mm).

Para melhorar a visualização dos dados da tabela 5.3.3 foi desenvolvido um gráfico, mostrado na figura 5.3.3, com as deformações ocorridas para cada ponto durante a soldagem do corpo de prova do experimento 1. O gráfico demonstra uma linha na cor azul que representa os valores da espessura da chapa e para as representações de deformação, linha verde e vermelha, são atribuídos os valores de distorção acrescidos com a espessura da chapa.

Tabela 5.3.3 - Valores de distorção para cada ponto do experimento 1.

Passe de Enchimento Lado Oposto (Experimento 1)				Energia de Soldagem Utilizada
Maior Comprimento (500,0 mm)		Menor Comprimento (300,0 mm)		Energia de Soldagem Utilizada
Ponto de Medição	Valor (mm)	Ponto de Medição	Valor (mm)	
P1	20,5	P1	20,8	2861,8
P2	20,6	P2	21,0	
P3	20,7	P3	21,3	
P4	20,6	P4	21,5	
P5	20,3	P5	21,7	
P6	20,4	P6	21,7	
P7	20,4	P7	22,2	
P8	20,9	P8	22,3	
P9	20,7	P9	22,7	
P10	20,7	P10	22,8	
P11	20,4	Média	20,66	
P12	20,4	Desv. Padrão	0,65	
P13	20,6			
P14	20,8			
P15	20,6			
P16	20,9			
P17	20,8			
P18	20,8			
P19	20,7			
P20	20,7			
Média	20,63			
Desv. Padrão	0,17			

Deformação no Experimento 1 no Passe de Enchimento no Lado Oposto no Maior e Menor Comprimento

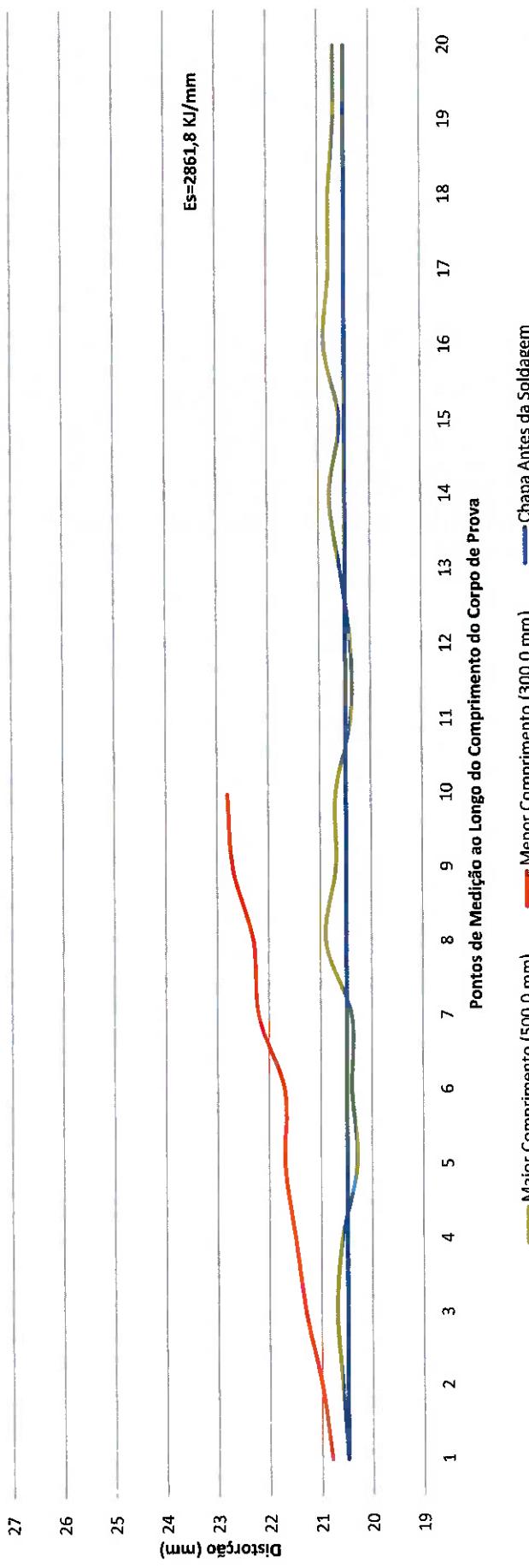


Figura 5.3.3 - Valores de distorção para cada ponto no passe de enchimento do experimento 1

O menor nível de distorção ao final do passe de enchimento do lado oposto, experimento 1 (1 arame), tanto para o maior quanto para o menor comprimento, quando comparado com a distorção resultante ao término do passe de enchimento pelo lado da face, ocorreu devido a compensação da distorção ao se realizar a soldagem alternando-se os lados.

Foram observados maiores valores de distorção no sentido do menor comprimento, principalmente nos últimos pontos medidos. É um crescimento natural do nível da distorção, uma vez que a medição dos últimos pontos sofrem influência da distorção já gerada pelo início do cordão, também ocorre favorecimento da distorção no menor comprimento devido ao sentido que a soldagem se deu.

Os valores de distorção para o passe de acabamento do lado oposto são observados na tabela 5.3.4 onde é demonstrada a distorção de cada ponto do maior comprimento (500,0 mm) e do menor comprimento (300,0 mm).

Tabela 5.3.4 - Valores de distorção para cada ponto do experimento 1.

Passe de Acabamento Lado Oposto (Experimento 1)				Energia de Soldagem Utilizada
Maior Comprimento (500,0 mm)		Menor Comprimento (300,0 mm)		Energia de Soldagem Utilizada
Ponto de Medição	Valor (mm)	Ponto de Medição	Valor (mm)	
P1	20,2	P1	20,9	5252
P2	20,0	P2	21,4	
P3	20,1	P3	22,1	
P4	20,0	P4	22,7	
P5	20,0	P5	23,4	
P6	19,8	P6	24,2	
P7	20,0	P7	24,5	
P8	20,1	P8	25,1	
P9	20,0	P9	25,9	
P10	20,0	P10	26,5	
P11	19,9	Média	20,66	
P12	20,3	Desv. Padrão	1,80	
P13	19,9			
P14	20,1			
P15	20,2			
P16	19,9			
P17	20,1			
P18	20,1			
P19	20,2			
P20	20,2			
Média	20,06			
Desv. Padrão	0,12			

Para melhorar a visualização dos dados da tabela 5.3.4 foi desenvolvido um gráfico, mostrado na figura 5.3.4, com as deformações ocorridas para cada ponto durante a soldagem do corpo de prova do experimento 1. O gráfico demonstra uma linha na cor azul que representa os valores da espessura da chapa e para as representações de deformação, linha verde e vermelha, são atribuídos os valores de distorção acrescidos com a espessura da chapa.

Deformação no Experimento 1 no Passe de Acabamento no Lado Oposto no Maior e Menor Comprimento

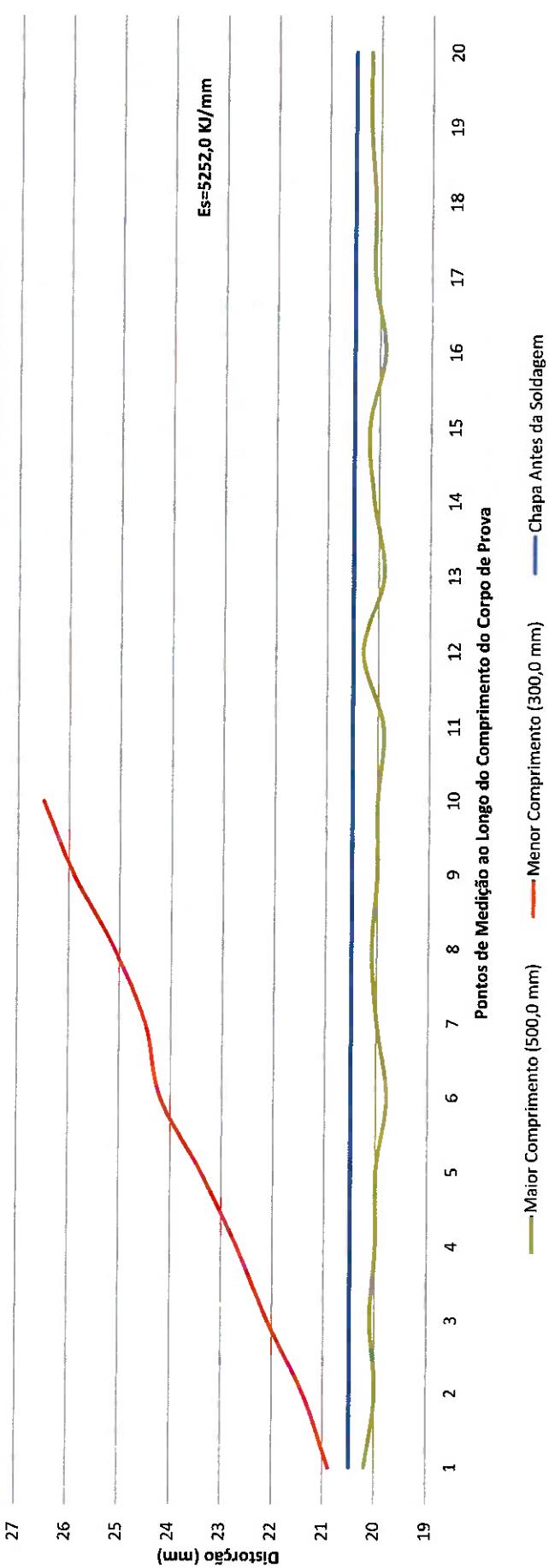


Figura 5.3.4 - Valores de distorção para cada ponto no passe de acabamento do experimento 1

Novamente o gráfico mostra uma distorção maior pelo lado relativo ao menor comprimento (300,0 mm). Devido à soldagem ter sido realizada no sentido do maior comprimento (500,0 mm), a maior distorção foi observada através da medição nos pontos do menor comprimento. A distorção foi mais acentuada neste sentido, 300,0 mm, por haver maior liberdade para chapas distorcerem, portanto, existiu maior resistência à deformação no sentido longitudinal.

Os valores de distorção para o passe de acabamento do lado face são observados na tabela 5.3.5 onde é demonstrada a distorção de cada ponto do maior comprimento (500,0 mm) e do menor comprimento (300,0 mm).

Tabela 5.3.5 - Valores de distorção para cada ponto do experimento 1.

Passe de Acabamento Lado Face (Experimento 1)				Energia de Soldagem Utilizada
Maior Comprimento (500,0 mm)		Menor Comprimento (300,0 mm)		Energia de Soldagem Utilizada
Ponto de Medição	Valor (mm)	Ponto de Medição	Valor (mm)	
P1	20,0	P1	20,2	
P2	19,9	P2	20,7	
P3	19,9	P3	21,1	
P4	19,9	P4	21,3	
P5	19,8	P5	21,6	
P6	19,9	P6	22,2	
P7	19,9	P7	22,6	
P8	19,9	P8	23,2	
P9	19,8	P9	23,4	
P10	20,3	P10	23,6	
P11	20,2	Média	20,66	
P12	20,0	Desv. Padrão	1,13	
P13	20,1			3878,7
P14	20,1			
P15	20,0			
P16	19,9			
P17	20,0			
P18	20,1			
P19	20,1			
P20	20,1			
Média	20,00			
Desv. Padrão	0,13			

Para melhorar a visualização dos dados da tabela 5.3.5 foi desenvolvido um gráfico, mostrado na figura 5.3.5, com as deformações ocorridas para cada ponto durante a soldagem do corpo de prova do experimento 1. O gráfico demonstra uma linha na cor azul que representa os valores da espessura da chapa e para as representações de deformação, linha verde e vermelha, são atribuídos os valores de distorção acrescidos com a espessura da chapa.

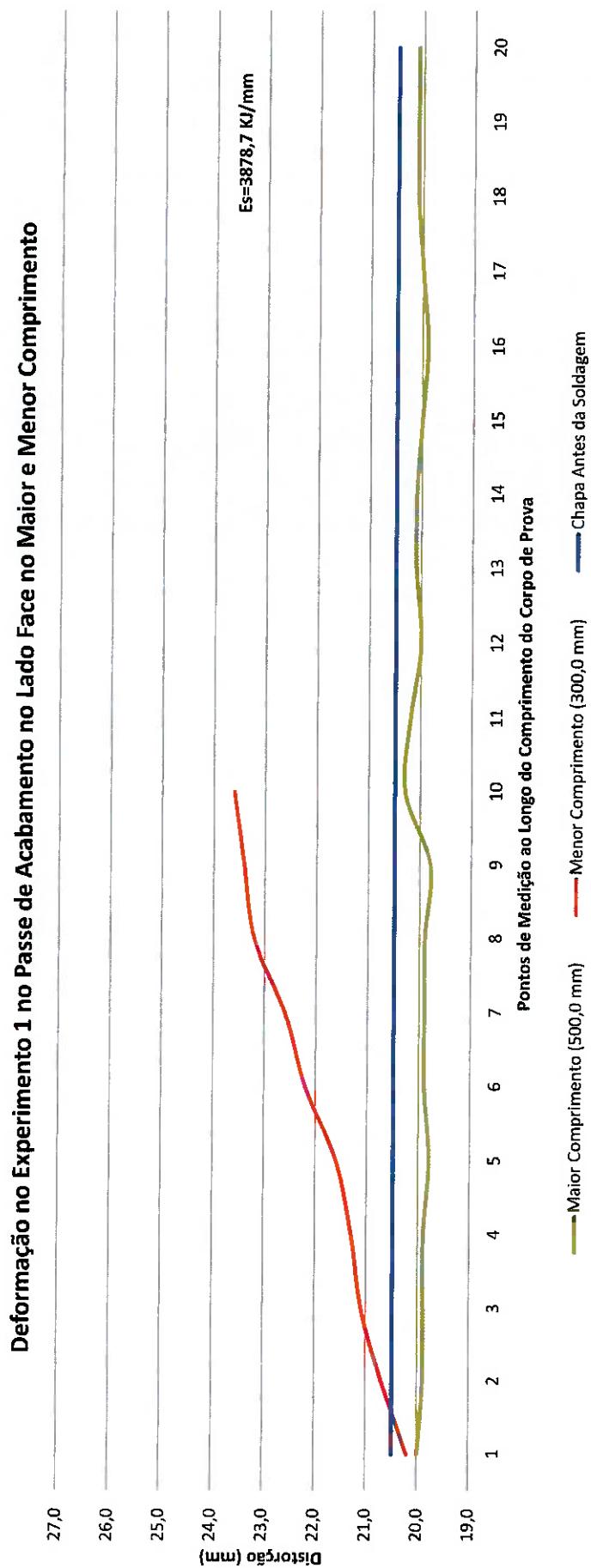


Figura 5.3.5 - Valores de distorção para cada ponto no passe de acabamento do experimento 1

A menor distorção observada para o menor comprimento, em comparação com a distorção no menor comprimento gerada pelo passe anterior, deveu-se à "pré-deformação" introduzida pela soldagem dos primeiros cordões.

5.3.2 VALORES DE DISTORÇÃO DO EXPERIMENTO 2.

Para realização das análises de distorção do experimento 2 foi considerado o valor nominal da espessura dos corpos de prova em cada ponto, podendo ser acrescido o valor de distorção quando tender para o lado face ou decrescido o valor da distorção quando o corpo de prova tender para o lado oposto.

Os valores de distorção do passe de raiz são observados na tabela 5.3.6 onde é demonstrada a distorção de cada ponto do maior comprimento (500,0 mm) e do menor comprimento (300,0 mm).

Tabela 5.3.6 - Valores de distorção para cada ponto do experimento 2.

Passe de Raiz (Experimento 2)				Energia de Soldagem Utilizada
Maior Comprimento (500,0 mm)		Menor Comprimento (300,0 mm)		Energia de Soldagem Utilizada
Ponto de Medição	Valor (mm)	Ponto de Medição	Valor (mm)	
P1	20,9	P1	20,8	884,2
P2	21,0	P2	21,6	
P3	21,0	P3	20,9	
P4	21,2	P4	21,2	
P5	20,9	P5	21,0	
P6	21,0	P6	21,6	
P7	21,0	P7	21,4	
P8	21,0	P8	21,4	
P9	21,1	P9	21,2	
P10	21,3	P10	21,0	
P11	21,0	Média	20,66	
P12	21,4	Desv. Padrão	0,27	
P13	21,3			
P14	21,3			
P15	21,4			
P16	21,4			
P17	21,5			
P18	21,3			
P19	21,6			
P20	21,6			
Média	21,21			
Desv. Padrão	0,22			

Para melhorar a visualização dos dados da tabela 5.3.6 foi desenvolvido um gráfico, mostrado na figura 5.3.6, com as deformações ocorridas para cada ponto durante a soldagem do corpo de prova do experimento 2. O gráfico demonstra uma linha na cor azul que representa os valores da espessura da chapa e para as representações de deformação, linha verde e vermelha, são atribuídos os valores de distorção acrescidos com a espessura da chapa.

Deformação no Experimento 2 no Passe de Raiz no Maior e Menor Comprimento

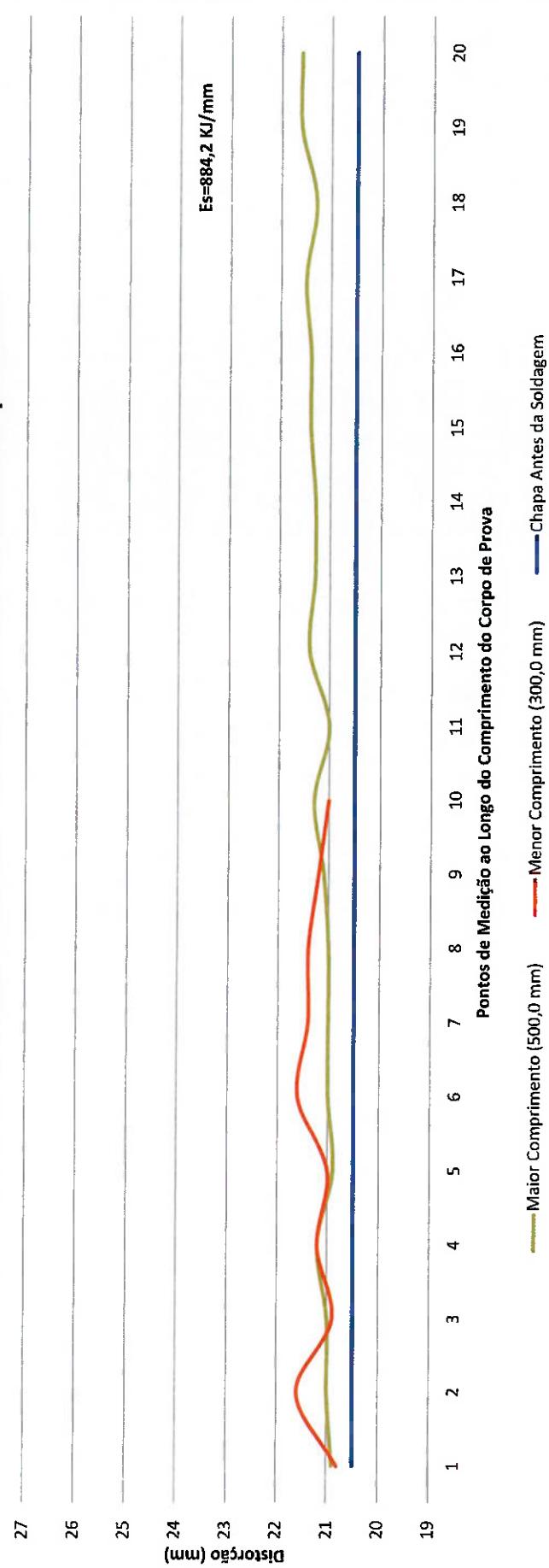


Figura 5.3.6 - Valores de distorção para cada ponto no passe de acabamento do experimento 2.

A deformação resultante do passe de raiz foi parecida entre as duas dimensões da chapa, comportamento semelhante ao experimento 1, apresentou pequeno grau de deformação ao comparar-se com o estado inicial da chapa.

Os valores de distorção do passe de enchimento/acabamento do lado face são observados na tabela 5.3.7 onde é demonstrada a distorção de cada ponto do maior comprimento (500,0 mm) e do menor comprimento (300,0 mm).

Tabela 5.3.7 - Valores de distorção para cada ponto do experimento 2.

Passe de Enchimento/Acabamento Lado Face (Experimento 2)				Energia de Soldagem Utilizada
Maior Comprimento (500,0 mm)		Menor Comprimento (300,0 mm)		Energia de Soldagem Utilizada
Ponto de Medição	Valor (mm)	Ponto de Medição	Valor (mm)	
P1	23,6	P1	23,0	4028,3
P2	23,3	P2	22,9	
P3	23,4	P3	22,9	
P4	23,3	P4	23,0	
P5	23,1	P5	22,3	
P6	23,2	P6	22,2	
P7	23,1	P7	21,6	
P8	23,0	P8	21,4	
P9	23,1	P9	21,3	
P10	23,0	P10	21,1	
P11	23,1	Média	20,66	
P12	23,0	Desv. Padrão	0,73	
P13	23,1			
P14	23,0			
P15	23,1			
P16	23,1			
P17	23,0			
P18	22,8			
P19	23,7			
P20	23,7			
Média	23,19			
Desv. Padrão	0,24			

Para melhorar a visualização dos dados da tabela 5.3.7 foi desenvolvido um gráfico, mostrado na figura 5.3.7, com as deformações ocorridas para cada ponto durante a soldagem do corpo de prova do experimento 2. O gráfico demonstra uma linha na cor azul que representa os valores da espessura da chapa e para as representações de deformação, linha verde e vermelha, são atribuídos os valores de distorção acrescidos com a espessura da chapa.

Deformação no Experimento 2 no Passe de Enchimento/Acabamento no Lado Face no Maior e Menor Comprimento

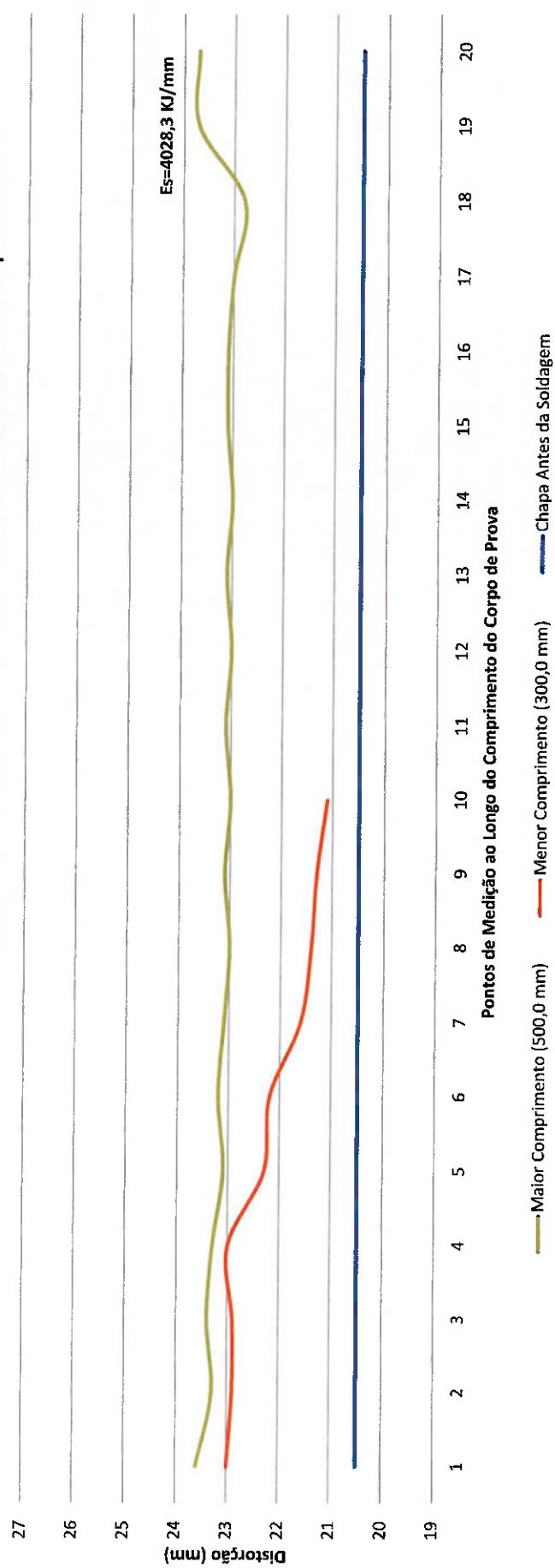


Figura 5.3.7 - Valores de distorção para cada ponto no passe de acabamento do experimento 2.

O gráfico mostra comportamento parecido ao do experimento 1, o passe seguinte ao passe de raiz apresentou maior distorção na medição realizada no maior comprimento da chapa soldada. Comportamento diferente da distorção causada pelos outros passes de soldagem, excetuando-se o passe de raiz.

A energia de soldagem utilizada para o passe de enchimento foi muito superior àquela utilizada para a realização do passe de raiz, junto com o momento introduzido na seção transversal devido ao passe de raiz, contribuíram para a maior deformação apresentada no maior comprimento. Já para o menor comprimento a maior distorção foi medida mais próximo da extremidade da chapa, e menor distorção mais próximo do cordão.

Os valores de distorção do passe de enchimento/acabamento do lado oposto são observados na tabela 5.3.8 onde é demonstrada a distorção de cada ponto do maior comprimento (500,0 mm) e do menor comprimento (300,0 mm).

A energia de soldagem utilizada foi parecida com a utilizada para o passe anterior, foram observados maiores níveis de distorção na medição dos pontos ao longo do menor comprimento da chapa, porém níveis bem menores de distorção quando comparado à soldagem com 1 arame.

Tabela 5.3.8 - Valores de distorção para cada ponto do experimento 2.

Passe de Enchimento/Acabamento Lado Oposto (Experimento 2)				Energia de Soldagem Utilizada
Maior Comprimento (500,0 mm)		Menor Comprimento (300,0 mm)		Energia de Soldagem Utilizada
Ponto de Medição	Valor (mm)	Ponto de Medição	Valor (mm)	
P1	20,3	P1	21,0	
P2	20,2	P2	21,2	
P3	20,1	P3	21,3	
P4	20,3	P4	21,2	
P5	20,2	P5	21,1	
P6	20,5	P6	21,4	
P7	20,4	P7	21,4	
P8	20,4	P8	21,3	
P9	20,5	P9	21,4	
P10	20,4	P10	21,4	
P11	20,3	Média	20,66	
P12	20,6	Desv. Padrão	0,13	
P13	20,7			
P14	20,7			
P15	20,8			
P16	20,9			
P17	20,9			
P18	20,8			
P19	20,9			
P20	20,9			
Média	20,54			
Desv. Padrão	0,26			

4054,4

Para melhorar a visualização dos dados da tabela 5.3.8 foi desenvolvido um gráfico, mostrado na figura 5.3.8, com as deformações ocorridas para cada ponto durante a soldagem do corpo de prova do experimento 2. O gráfico demonstra uma linha na cor azul que representa os valores da espessura da chapa e para as representações de deformação, linha verde e vermelha, são atribuídos os valores de distorção acrescidos com a espessura da chapa.

Deformação no Experimento 2 no Passe de Enchimento/Acabamento no Lado Oposto no Maior e Menor Comprimento

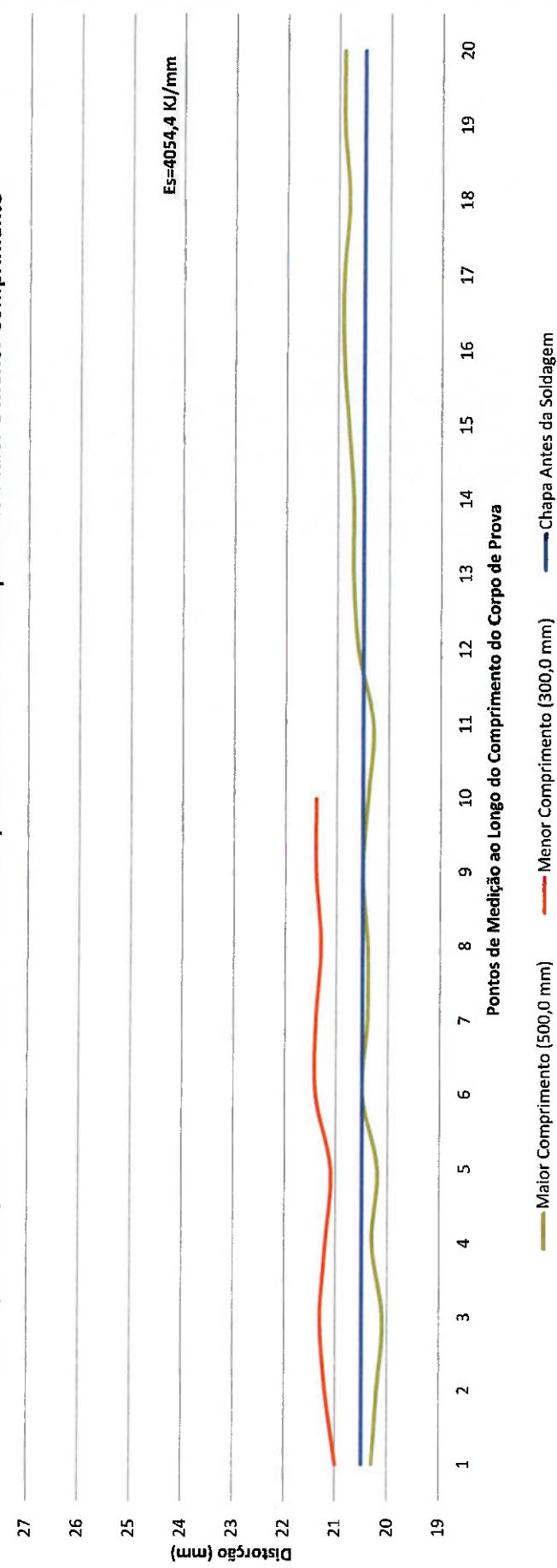


Figura 5.3.8 - Valores de distorção para cada ponto no passe de acabamento do experimento 2.

5.3.3 COMPARAÇÃO DOS VALORES DE DISTORÇÃO DOS EXPERIMENTOS 1 E 2 COM A NORMA ISO 13920 E COM O OUTRO TIPO DE CHANFRO.

Para efeito de tentar qualificar os resultados obtidos nos experimentos 1 a figura 5.3.9 apresenta um gráfico onde é possível comparar os resultados deste trabalho com o que a Norma ISO 13920 [11] exige e com outro trabalho comparativo de distorção [12].

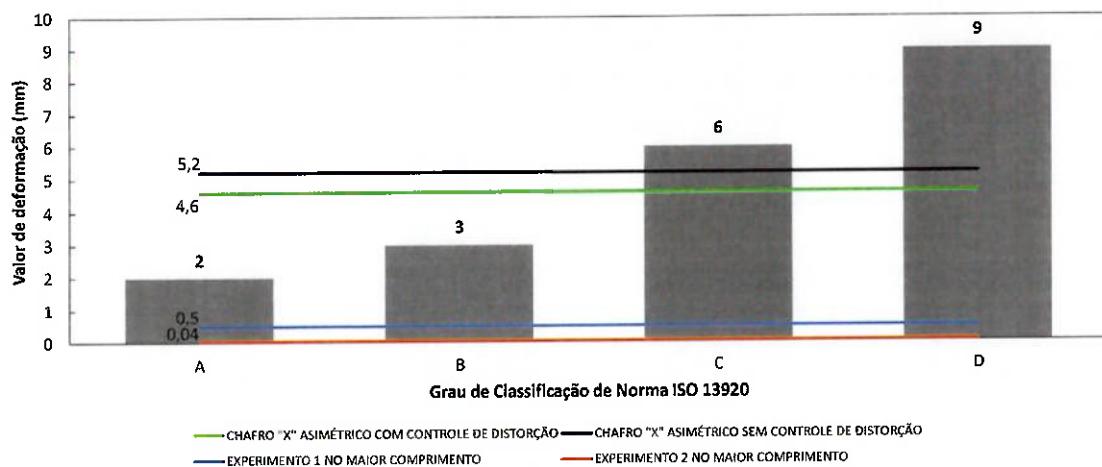


Figura 5.3.9 – Gráfico comparativo dos resultados dos experimentos 1 e 2 , representados pela linhas na cor azul e vermelha, com a norma ISO 13920, representada pelas colunas na cor cinza, e com os resultados de distorção do trabalho de DA SILVA [12], representado pelas linhas nas cores verde e preto, para um chanfro em “X” assimétrico.

No gráfico da figura 5.3.9 é possível comparar os valores de distorção dos experimentos 1 e 2 no maior comprimento com o exigido pela Norma ISO 13920 e com os resultados do trabalho de DA SILVA [12].

Para os experimentos realizados neste trabalho é possível observar que são classificados com grau "A" perante a Norma utilizada, apresentando valores que se aproximam de zero.

Os valores de distorção no maior comprimento dos experimentos 1 e 2 quando comparado com o trabalho de DA SILVA [12] apresentam um distorção muito inferior. No trabalho de DA SILVA [12] foi utilizado um chanfro assimétrico em "X" sendo 2/3 da espessura da chapa para o lado face e 1/3 para o lado oposto e neste foi utilizado apenas o processo de soldagem arame tubular com proteção gasosa.

A fim de realizar uma comparação da distorção final de cada experimento com apenas o grau "A" da Norma ISO 13920 foi desenvolvido o gráfico mostrado na figura 5.3.10.

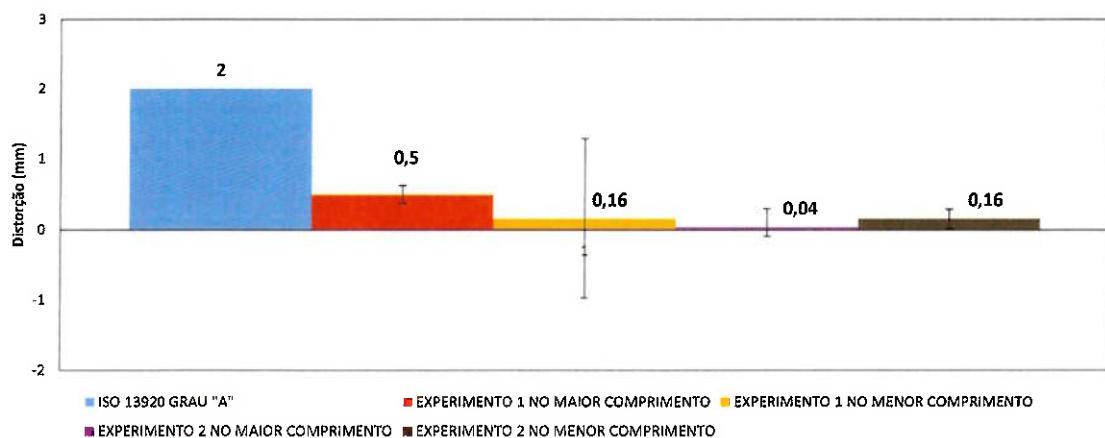


Figura 5.3.10 – Gráfico comparativo dos valores de distorção entre a classificação da Norma ISO 13920 com as médias da distorção de cada experimento e em cada comprimento.

Podemos observar que ambos os valores de distorção final de cada experimento e em cada comprimento mensurado estão bem abaixo do máximo

exigido no grau "A" da Norma. Porém, os valores do experimento 1, para o maior comprimento, apresenta maior distorção quando comparado com valor do experimento 2. Para os valores do menor comprimento há uma igualdade entre os experimentos, porém, o experimento 1 apresenta um desvio padrão maior que o experimento 2.

6. CONCLUSÕES.

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

1. A utilização da técnica Tandem resulta em uma Zona Afetada pelo Calor com aspecto mais uniforme em comparação com a ZAC obtida pelo processo com 1 arame, a técnica Tandem resultou em uma extensão da ZAC 36% menor na maior medida encontrada para ambos os experimentos.
2. A utilização da técnica Tandem promove um menor nível de distorção comparando-se com a técnica com 1 arame, a utilização de 2 arames promoveu uma distorção transversal 9,33% menor.
3. Ambos os experimentos são classificados pela Norma ISO 13920 com o grau de distorção "A".

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

1. Avaliar a prevenção de defeitos ocorrentes na raiz, através da fusão do passe de raiz pela técnica com 2 arames.
2. Analisar a influência da pré-deformação para o controle da distorção final utilizando-se a técnica com 2 arames.
3. Relacionar a energia de soldagem com a orientação dos grãos do cordão soldado, com a diluição da junta e com a distorção ocasionada com a técnica com 2 arames.
4. Realizar um estudo sobre as propriedades mecânicas dos experimentos.
5. Realizar um estudo metalúrgico entre os experimentos a fim de gerar uma caracterização microestrutural dos mesmos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Watanabe, I. Tsukada, K. The Progress of Thermo-Mechanical Control Process for HSLA Plate in Japan Key Engineering Materials Vols. 84-85 (1993) pp 17-57 Trans Tech Publications, Switzerland.
2. Bhadeshia, H.K.D.H. Honeycombe, R. W. K. Steels Microstructure and Properties, 3th Edition Elsevier. Oxford (2006).
3. AGGEN, G. et al., Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys. Metals Handbook, Vol. 1, 10º Ed. American Society of Metals, 1998.
4. Taniguchi, C. Okumura T. Engenharia de Soldagem e Aplicações, LTC Editora. Rio de Janeiro (1982).
5. Brandi, S. D. Wainer, E. Soldagem Processos e Metalurgia, 4º Reimpressão Edgar Blucher. São Paulo (2004).
6. Souza, A. C. Notas de Aula Disciplina Processos de Soldagem e Junção – Processo Arco Submerso, Especialização em Engenharia de Soldagem Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2010).
7. Silveira, J. P. Barros, S. M. Tensões Residuais e Deformações em Soldagem – PETROBRÁS/SEPES/DIVEN/SEN-RIO.
8. ASTM CODE Standard Specification for Structural Steel for Ships. Designation: A 131/A 131M – 08.
9. AWS CODE A5.20/A5.20M Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding.

10. AWS CODE A5.17/A5.17M Specification for Carbon Steel Electrode sand Fluxes for Submerged Arc Welding.
11. INTERNATIONAL STANDARD. Welding- General tolerances for welded construtions – Dimensions for lengths and angles – shape and position; ISO 13920, first edition, 1996 (E).
12. DA SILVA, M. F. Comparação da Deformação entre a Técnica de Soldagem Convencional e a Técnica com Dupla Fusão em Aços Estruturais. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – PECE-Universidade de São Paulo. São Paulo: 65 p. 2012.