

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

MATEUS DE SOUSA ZANZI

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UMA TÉCNICA ALTERNATIVA A FIM DE
MITIGAR A DISTRORÇÃO EM PROCESSOS DE SOLDAGEM**

Joinville
2017

MATEUS DE SOUSA ZANZI

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UMA TÉCNICA ALTERNATIVA A FIM DE
MITIGAR A DISTORÇÃO EM PROCESSOS DE SOLDAGEM**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha

Joinville

2017

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus pelas oportunidades por Ele oferecidas.

Aos meus pais, Marcelo e Marcia, e meu irmão, Maurício, avós, demais familiares e amigos por todo e qualquer apoio oferecido neste período de graduação.

Ao meu orientador, Tiago Vieira da Cunha, pela oportunidade, atenção, confiança e pelo aprendizado nesses dois anos de convívio.

A Universidade Federal de Santa Catarina, por permitir a realização dos ensaios e uso de equipamentos nos ensaios de soldagem e nas análises dos corpos de prova. Ao Técnico em Mecânica, Leandro Carlos Setúbal, pela orientação e aprendizado neste tempo de convívio e ao Professor Kleber Vieira de Paiva, por possibilitar as aquisições dos ciclos térmicos dos ensaios.

A equipe do Laboratório de Tecnologia da Soldagem, pelo apoio e aprendizado durante a minha participação na equipe.

As amizades estabelecidas no decorrer da minha graduação, em especial os que ingressaram comigo e aos amigos da Engenharia Naval, que me acompanharam nessa jornada.

Ao corpo docente da Universidade, de modo especial aqueles que diretamente me incentivaram e participaram diretamente da minha formação.

RESUMO

Processos de soldagem a arco são amplamente empregados em estaleiros. Entretanto, dada a sua própria natureza, estes processos impõem o aporte de consideráveis níveis de energia nas regiões das juntas soldadas. Entre outras implicações, devido ao alívio de tensões residuais geradas pelo ciclo térmico e por elevados gradientes de temperatura gerados, originam-se distorções. Essa consequência afeta negativamente a montagem, de modo que se torna necessário evitar este problema a fim de manter a competitividade do setor. Neste contexto, pré-aquecimento das laterais da junta tende a reduzir consideravelmente o gradiente térmico na região da junta soldada, o que atua no sentido de minimizar o problema de distorção no metal de base. Deste modo, o presente trabalho visa conceber uma técnica alternativa a fim de mitigar as distorções em processos de soldagem, baseado no pré-aquecimento das laterais da junta a ser soldada. Dito isso, realizaram-se ensaios apenas com isolamento térmico e também com pré-aquecimento de 75°C e 150°C. Executaram-se os ensaios nessas condições para dois níveis de energia de soldagem. O efeito do pré-aquecimento provocou alterações no ciclo térmico e nos gráficos de repartições térmicas, elevando as temperaturas de pico das amostras, e reduzindo as taxas de resfriamento, apesar de não apresentar redução nos níveis de distorção gerados.

Palavras-chave: Técnica; Soldagem; Gradiente térmico; Tensões Residuais; Distorções.

ABSTRACT

Arc welding processes are widely employed in shipyards. However, given their nature, these processes impose considerable energy levels on the regions of welded joints. Among other implications, due to the relief of residual stresses generated by the thermal cycle and by high temperature gradients generated, distortions occur. This consequence negatively affects the assembly, so it is necessary to avoid this problem in order to maintain the competitiveness of the sector. In this context, preheating the sides of the joint tends to considerably reduce the thermal gradient in the region of the welded joint, which acts in order to minimize the problem of distortion in the base metal. In this way, the present work aims to design an alternative technique to mitigate distortions in welding processes, based on the preheating of the sides of the joint to be welded. That said, tests were performed only with thermal insulation and also with preheating of 75°C and 150°C. The tests under these conditions were carried out for two levels of welding energy. The effect of preheating caused changes in the thermal cycle and in the thermal distribution charts, raising the peak temperatures of the samples, and reducing cooling rates, even though there was no reduction in distortion levels generated.

Keywords: Technique; Welding; Thermal gradient; Residual Tensions; Distortions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linhas isotérmicas em um processo de soldagem a arco.....	15
Figura 2 - Modos de transferência de metal.....	16
Figura 3 - Tipos básicos de distorção.....	17
Figura 4 - Efeito do pré-aquecimento na distorção angular em estruturas com juntas em T.....	20
Figura 5 - Bancada e equipamentos.....	21
Figura 6 - Representação dos corpos de prova.....	23
Figura 7 - Posicionamento dos termopares.....	26
Figura 8 - Mapeamento da amostra realizado através de um equipamento de usinagem com comando numérico computadorizado.....	27
Figura 9 - Distorção real provocada nas amostras característica dos ensaios com maior energia de soldagem.....	30
Figura 10 - Comparação entre as máximas distorções reais geradas nos ensaios com maior energia de soldagem.....	31
Figura 11 - Distorção real provocada nas amostras características dos ensaios com menor energia de soldagem.....	33
Figura 12 - Comparação entre as máximas distorções reais geradas nos ensaios com menor energia de soldagem.....	34
Figura 13 - Ciclo térmico característico dos ensaios com maior energia de soldagem.....	36
Figura 14 - Ciclo térmico característico dos ensaios com menor energia de soldagem.....	39
Figura 15 - Gráfico de repartição térmica para ensaios de maior energia.....	41
Figura 16 - Gráfico de repartição térmica para ensaios de menor energia.....	42
Figura 17 - Distorção real característica dos ensaios 425P150-10%.....	43
Figura 18 - Comparação entre as máximas distorções reais dos ensaios REF(1/2), 425P150 E 425P150-10%.....	43
Figura 19 - Curvas de ciclo térmico para o ensaio característico 425P150-10%.....	44

Figura 20 - Curvas de repartição térmica para os ensaios REF(1/2), 425P150 e 425P150-10%.....	45
Figura 21 - Comparação entre taxas de resfriamento à 20 mm da junta	46
Figura 22 - Comparação entre taxas de resfriamento à 40 mm da junta.	47
Figura 23 - Comparação entre taxas de resfriamento para ensaios com maior energia de soldagem.....	48
Figura 24 - Comparação entre taxas de resfriamento para ensaios com menor energia de soldagem.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Terminologia dos ensaios	25
Tabela 2 - Máximas taxas de aquecimento dos ensaios com maior energia de soldagem.....	37
Tabela 3 - Máximas taxas de aquecimento dos ensaios com menor energia de soldagem.....	40
Tabela 4 - Máximas taxas de aquecimento dos ensaios REF(1/2), 425P150 e 425P150-10%.....	44
Tabela 5 - Comparação entre taxas de resfriamento para ambos níveis de energia de soldagem.....	46
Tabela 6 - Taxas de resfriamento para os ensaios característicos com maior energia de soldagem.....	47
Tabela 7 - Taxas de resfriamento para os ensaios característicos com menor energia de soldagem.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS

MIG/MAG – Metal Inert Gas/Metal Active Gas

LTS – Laboratório de Tecnologia da Soldagem

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

CNC – Comando Numérico Computadorizado

TIG – Tungsten Inert Gas

SAE - Society of Automotive Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

I – Corrente de soldagem [A]

U – Tensão de soldagem [V]

V_s – Velocidade de soldagem [mm/s]

Δx – Espaçamento entre duas posições[m]

ΔT – Gradiente de temperatura[°C ou K]

η – Eficiência do arco

$\eta_{\text{térmico}}$ – Rendimento térmico

k – Condutividade térmica do material (W/m*K)

A – Area da seção transversal [m²]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 <i>OBJETIVO GERAL</i>	13
1.1.2 <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO	14
2.2 SOLDAGEM MIG/MAG.....	15
2.3 DISTORÇÕES	17
2.4 MÉTODOS E TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE DISTORÇÕES	18
3. METODOLOGIA	21
3.1 BANCADA DE ENSAIOS.....	21
3.2 CORPOS DE PROVA.....	22
3.3 ENSAIOS.....	23
3.4 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	27
4. RESULTADOS E DISCUÇÕES	29
5. CONCLUSÕES	51
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	512
REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

O transporte aquaviário, caracterizado por conduzir mercadorias e passageiros, seja em embarcações mercantes, de cruzeiro ou de recreio, apresenta crescimento desde a segunda metade do século 20, uma vez que este setor se apresenta eficiente devido à alta capacidade de carga e relativo baixo custo de transporte. Com isso, a demanda na construção de embarcações cresceu em estaleiros nas últimas décadas, bem como as dimensões das embarcações, viabilizando o setor. Contudo, estratégias para diminuir o período em que a embarcação permanece na carreira foram desenvolvidas com intuito de minimizar esse gargalo dos estaleiros. Como exemplo de uma destas estratégias têm-se a divisão da embarcação em blocos para a construção, que exige uma precisão grande na montagem, garantindo o alinhamento de cada bloco nos processos de união.

Porém, os processos utilizados para realizar a união de chapas, ou entre chapas e elementos estruturais, que envolvem altos níveis de energia, nem sempre garantem esse alinhamento, exigindo indesejáveis atividades de retrabalho. Dessa forma, melhorar os procedimentos é necessário visando ganhos de eficiência no setor de construção e reparo naval.

Devido a sua versatilidade, controle de processo e características mecânicas associadas, os processos de soldagem através de arco voltaico são os mais utilizados e, por consequência, mais estudados a fim de alcançar melhorias para o processo (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). Dentre esses, os mais presentes em estaleiros são soldagem com proteção gasosa (MIG/MAG), por meio de eletrodo revestido, com proteção gasosa e arame tubular e por arco submerso.

De acordo com Pazooki (2014), o calor depositado sobre as peças de trabalho nesses processos é o principal fator que influencia na necessidade de as tecnologias de soldagem serem constantemente estudadas, visto que os elevados níveis de temperatura criam gradientes térmicos e, conseqüentemente, tensões residuais, acarretando em descontinuidades internas e externas no material, como mudanças

na microestrutura, para alguns materiais, e deformações fora do limite elástico do material, denominadas distorções.

Conforme Masubuchi (1980), distorções podem ser definidas como deformações plásticas, causadas por tensões resultantes de forças internas geradas pela dilatação térmica. No entanto, qualquer processo que envolve altos índices de distorção se torna ineficiente por exigir tempo e custos de retrabalho, que são realizados para garantir a resistência estrutural e o alinhamento de uma edificação, sendo chapas ou blocos, evitando descontinuidades e concentradores de tensão. Segundo Andersem (2000), especificamente para o setor naval, pode-se destacar que o tempo consumido pelo retrabalho é o maior, quando comparado a toda linha de fabricação.

Contudo, Masubuchi (1980) afirma que a magnitude das dilatações depende das propriedades do material a ser soldado, da energia depositada e da variação de temperatura gerada, podendo essa grandeza ser controlada através da escolha consciente do procedimento, dos parâmetros de soldagem e do projeto das juntas, por exemplo. Sabendo que o gradiente térmico influencia diretamente na magnitude dessas imperfeições, alguns métodos foram desenvolvidos e são utilizados para reduzir os níveis de distorções produzidos.

Neste contexto, este trabalho trata do desenvolvimento de uma técnica que realiza o pré-aquecimento das regiões adjacentes à junta a ser soldada, visando reduzir o gradiente térmico gerado nas laterais da junta provocados pelo processo de soldagem MIG/MAG visando reduzir, assim, o fenômeno de dilatação térmica que provoca as inconsistências já citadas.

O desenvolvimento do método, a preparação da manta isolante e a realização dos testes foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) de Joinville. Inicialmente foram definidas duas temperaturas para o pré-aquecimento da peça de trabalho fornecidas por uma resistência elétrica drenando sua máxima potência, resultando em intervalos de tempo distintos para ambas temperaturas.

Feito isso, estabeleceu-se uma sequência de ensaios, variando os parâmetros de pré-aquecimento, isolamento térmico e energia de soldagem. Com o auxílio de um sistema de aquisição de temperatura, obtiveram-se informações, em pontos igualmente espaçados na lateral da junta, referentes ao ciclo térmico imposto pela condução de calor, proveniente da soldagem.

Através do monitoramento desses pontos, pôde-se analisar o comportamento do ciclo térmico e repartição térmica para as condições estabelecidas, confrontando com as análises na distorção dos corpos de prova.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo principal o desenvolvimento e análise de uma técnica que visa reduzir os níveis de distorção provocados por processos de soldagem através do preaquecimento das laterais da junta, pela superfície inferior do corpo de prova.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com base no objetivo geral do trabalho, surgem os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a montagem de uma bancada de ensaios;
- Realizar ensaios de soldagem com as condições estabelecidas através do processo MIG/MAG em juntas em ângulo;
- Realizar a aquisição dos ciclos térmicos de soldagem;
- Representar a distorção real gerada pelo processo;
- Avaliar o efeito da técnica proposta em relação à distorção resultante;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda o emprego de métodos de redução de distorções provocadas por processos de soldagem. Inicialmente é realizada uma revisão da literatura acerca da soldagem por arco elétrico e pelo processo MIG/MAG, abordando suas principais características para, na sequência, apresentar os tipos de distorções e métodos de prevenção e redução dos mesmos.

2.1 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO

Conforme afirma Modenesi (2005), o arco voltaico é uma das fontes de calor mais utilizadas na soldagem de materiais metálicos, por proporcionar facilidade no controle do aporte de energia, concentrar grande parte da energia gerada e por ter um relativo baixo custo do equipamento. O arco voltaico é capaz de atingir elevados níveis de energia em função de dois parâmetros fundamentais na energia disponível para a soldagem, corrente e tensão. De acordo com Scotti (2008), uma vez que a energia de soldagem é a relação entre a potência elétrica que mantém o arco e a velocidade de soldagem, pode-se estimar esta grandeza a partir da Equação 1.

$$E = \sum \frac{U * I}{V_S} \quad (1)$$

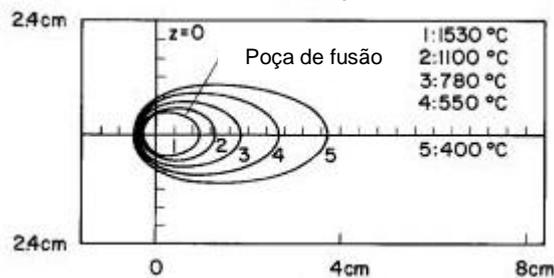
Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992), como todo processo físico real, a transferência de energia pelo arco voltaico não se dá de maneira eficiente por completa. Desta forma, há uma parcela que efetivamente é sentida pela peça de trabalho, denominada de calor imposto, onde a estimativa é feita a partir da energia de soldagem, como mostra a Equação 2.

$$CI = \left(\sum \frac{U * I}{V_S} \right) * \eta_{térmico} \quad (2)$$

As equações, representadas em valores instantâneos de tensão (U), corrente (I) e velocidade de soldagem (V_s), diferem-se exclusivamente pelo termo de rendimento térmico. Este termo representa a parcela da energia que de modo efetivo é absorvida pelo metal de base, desconsiderando as trocas de calor do arco com o meio.

A partir dessas relações é possível perceber a influência de cada parâmetro nos efeitos térmicos responsáveis pela formação e geometria do cordão, bem como estimar os níveis de calor fornecidos pelo arco. A Figura 1 apresenta linhas isotérmicas de um processo com potência elétrica de 3200W e velocidade de soldagem de 2,4 mm/s, características de um processo de soldagem na superfície de uma peça de trabalho. As curvas são obtidas através da equação de fluxo de calor apresentada por Rosenthal (1941), representando linhas isotérmicas.

Figura 1 - Linhas isotérmicas em um processo de soldagem a arco.



Fonte: Kou (2003).

De acordo com Kou (2003), essas temperaturas elevadas são distribuídas radialmente a partir do centro da projeção do arco voltaico na junta para as regiões adjacentes, influenciando diretamente na geometria e propriedades mecânicas do cordão e de regiões adjacentes. O calor e a sua distribuição para a peça de trabalho podem variar dependendo de diversos fatores, inclusive do processo utilizado para realizar a soldagem.

2.2 SOLDAGEM MIG/MAG

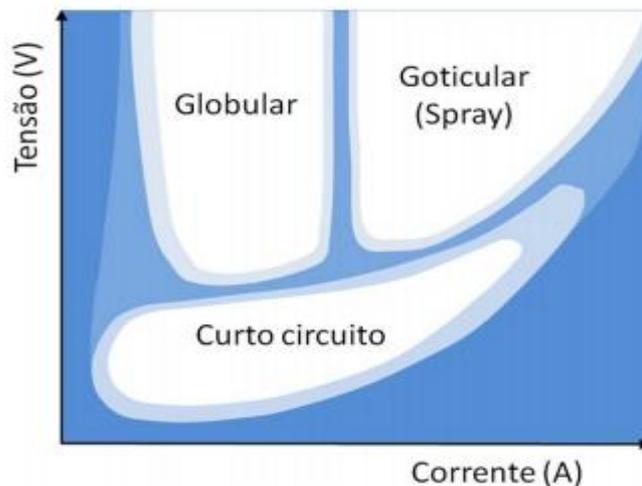
Na soldagem MIG/MAG convencional, o arco voltaico é estabelecido entre um eletrodo nu, ou seja, sem revestimento, e a peça de trabalho, e após constituído, é

mantido pelo plasma, formado pelo gás de proteção altamente ionizado e eletricamente neutro. Neste processo, pode-se trabalhar com uma faixa ampla de energias de soldagem, possibilitando a união de materiais de diversas espessuras e a variação da posição em que se realiza a soldagem.

A energia de soldagem pode ser manipulada através da velocidade de soldagem e da potência elétrica disponibilizada pela fonte de soldagem. Os parâmetros associados a essa potência elétrica de soldagem, são responsáveis por ditar o modo de transferência metálica, que se caracterizam pelo diâmetro das gotas de metal formadas e frequência em que estas são depositadas no metal de base. Esses modos são selecionados para alcançar características geométricas e mecânicas do cordão de solda, impor os níveis de energia desejáveis para cada procedimento, bem como possibilitar a soldagem em posições não convencionais.

Em termos de parâmetros de soldagem, identificam-se os modos de transferência e a flexibilidade de variação de parâmetros através de diagramas, como mostra a Figura 2, identificando inclusive as regiões de transição entre esses modos.

Figura 2 - Modos de transferência de metal.



Fonte: Modenesi (2016).

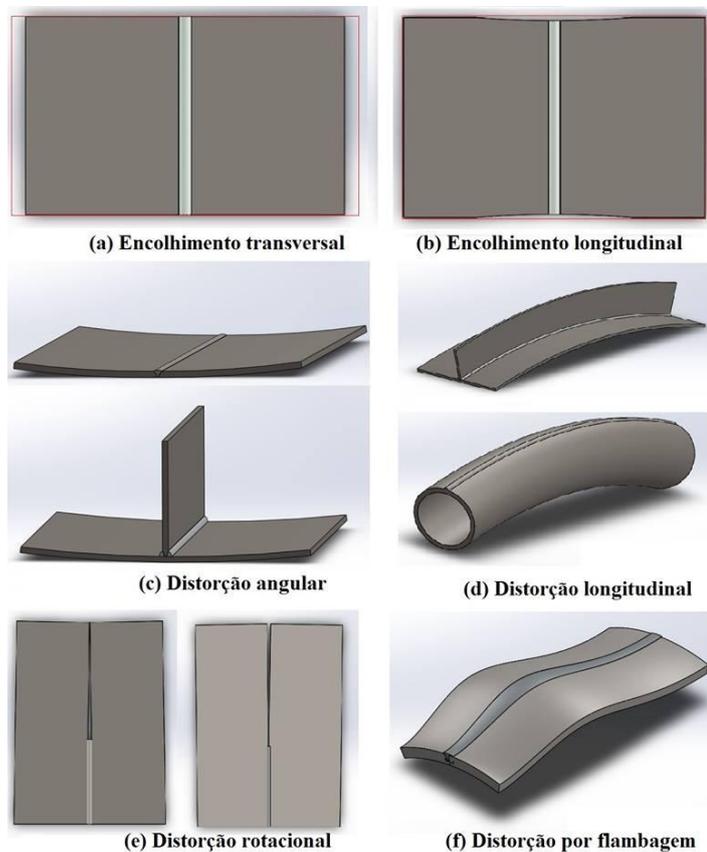
Dentre os modos de transferência convencionais desse processo, tem-se a transferência por curto-circuito, globular e goticular, depositando sobre a poça de fusão baixos, intermediários e relativamente elevados níveis de energia, onde esses modos são estabelecidos através de combinações entre valor de corrente e de tensão estabelecidos para o procedimento.

2.3 DISTORÇÕES

O fato de o arco voltaico ter a capacidade de restringir a aplicação de energia a uma região relativamente pequena da peça de trabalho, acarreta-se em algumas vantagens e desvantagens. Um dos aspectos positivos é fundir apenas a região necessária para uma união, o que possibilita em alguns processos a soldagem em várias posições. Porém, a imposição de calor gera gradientes térmicos relativamente acentuados, mesmo a pequenas distâncias do cordão de solda, o que tende a alterar as dimensões do material.

Durante o ciclo térmico de soldagem, as variações de temperatura geram campos de tensões nas regiões próximas ao cordão de solda, originando deformações da peça de trabalho e, conseqüentemente, defeitos geométricos no material. As tensões internas geradas se manifestam sob forma de deformações na peça de trabalho, denominadas distorções (OKUMURA; TANIGUSHI, 1982). Na Figura 3 são apresentados os tipos básicos de distorção existentes.

Figura 3 - Tipos básicos de distorção.



Fonte: O Autor.

Segundo Masubuchi (1980), as distorções obtidas na prática se apresentam de forma combinadas. No entanto, devem-se conhecer os modos ocorridos para que se aplique o método corretivo ou de controle mais adequado a estrutura.

2.4 MÉTODOS E TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE DISTORÇÕES

O processo de soldagem, por provocar uma fusão localizada, aquecendo e resfriando o material, gera expansões e contrações térmicas do material que são restritas pelas regiões frias do metal de base, originando tensões de soldagem nessas regiões restritas. Submetida a altas temperaturas, a peça de trabalho tem suas tensões de escoamento reduzidas ao mesmo tempo que as tensões de restrição aumentam, provocando uma deformação plástica na região da solda durante a soldagem (VAN DER AA, 2007).

Essas tensões são afetadas principalmente pelos ciclos térmicos gerados no processo, pela vinculação externa e pelas propriedades mecânicas do material. Alguns procedimentos são realizados para promover a redução ou alívio das tensões residuais, sendo procedimentos mecânicos, como martelamento, vibração e encruamento, e térmicos, como tratamento térmico e alívio de tensões a baixas temperaturas (OKUMURA; TANIGUSHI, 1982).

Além desses procedimentos, o correto uso de restrição para auxílio no processo de montagem, o correto volume de material depositado, a sequência e o número de passes realizados são opções convencionais alternativas que promovem o alívio de tensões residuais, bem como o pré-aquecimento da peça de trabalho e o correto nível de energia de soldagem aplicado. Uma vez não tratadas essas tensões, ao fim do processo, o auto equilíbrio das mesmas provocam distorções na peça de trabalho.

Segundo VAN DER AA (2007), as distorções geradas na soldagem não podem ser extintas, mas, apenas minimizadas. Essas distorções dependem basicamente do insumo e distribuição do calor pelo processo e pelo nível de restrição da junta. Com o intuito de reduzir as consequências induzidas pelas distorções, foram desenvolvidas técnicas para a redução ou correção das descontinuidades causadas por tensões térmicas. Estas técnicas, podem ser agrupadas por etapas de pré-processo, simultânea ao processo e pós-processo.

Como métodos prévios podem ser citados o pré-aquecimento, uso de elementos de restrição, por ponteamto, uso de cachorros ou fixação por grampos, posicionamento e projeto do chanfro quando necessário e a indução de pré-deformação. Classificam-se como pós-processo métodos corretivos, como aquecimento e conformação mecânica. Porém, além do tempo para realização da união, esses métodos envolvem tempo de retrabalho, acarretando em ineficiência no processo, além de se tornarem caros, exigirem mão de obra qualificada e por não ser possível de se aplicar em algumas ocasiões.

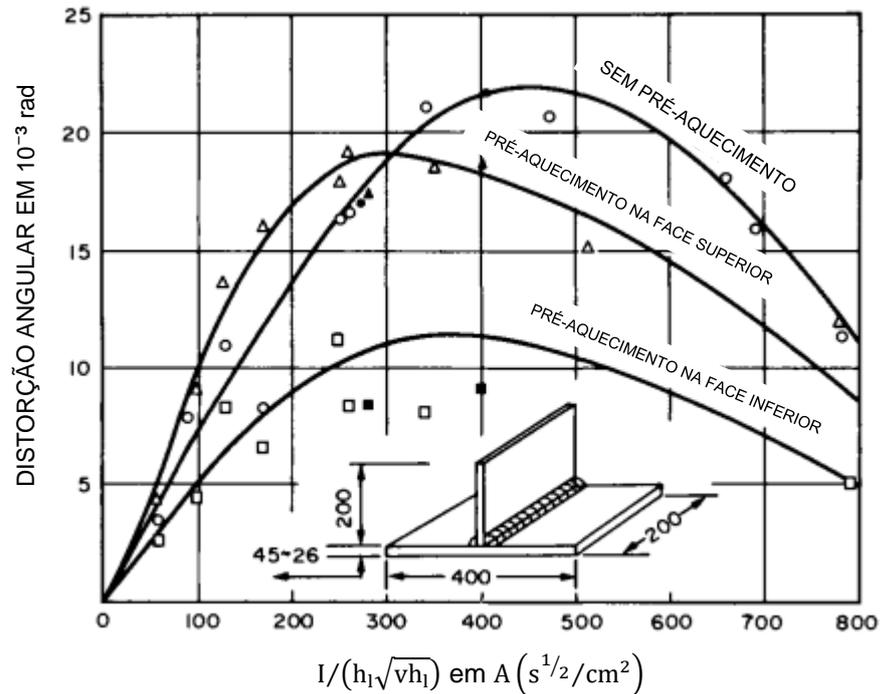
As técnicas e métodos que envolvem o controle dessas descontinuidades durante a soldagem se desenvolveram e são estudados constantemente por estarem relacionados a aplicações específicas e se tratarem de métodos práticos (Mochizuki, 2011). Nesse grupo estão contidos os métodos de aplicação de pressão durante a soldagem e a indução de tensão térmica, dinâmica ou estacionária.

Os métodos que impõe tensão térmica na peça de trabalho se dirigem principalmente para os modos de distorção para fora do plano da peça de trabalho, que apresentam maiores dificuldades quanto a alinhamento nos processos de montagem.

Com base nisso, Jung e Tsai (2004) investigaram o efeito da tensão térmica gerada pelo lado oposto ao cordão de solda em uma junta de filete. Foram realizados testes com aquecimento simultâneo a soldagem, bem como com resfriamento utilizando uma câmara de arrefecimento na região selecionada. Segundo os autores, a utilização de um trocador de calor na parte inferior da chapa reduz a distorção angular no plano seccional da junta soldada, enquanto é amplificada no plano médio do reforçador, tendendo a fletir o mesmo. Já o pré-aquecimento da mesma região, utilizando uma tocha TIG auxiliar, resultou na redução desse tipo de distorção em ambos os planos.

Considerando as tensões térmicas estacionárias, Watanabe e Satoh (1957) realizaram testes considerando o pré-aquecimento de juntas de ângulo, avaliando o efeito para temperaturas de 100°C e 200°C de pré-aquecimento, com a composição de duas geometrias para os reforçadores e para a região preaquecida de um painel enrijecido. A Figura 4 mostra o efeito da superfície preaquecida no elemento do painel que recebe o processo para a união do reforçador.

Figura 4 - Efeito do pré-aquecimento na distorção angular em estruturas com juntas em T.



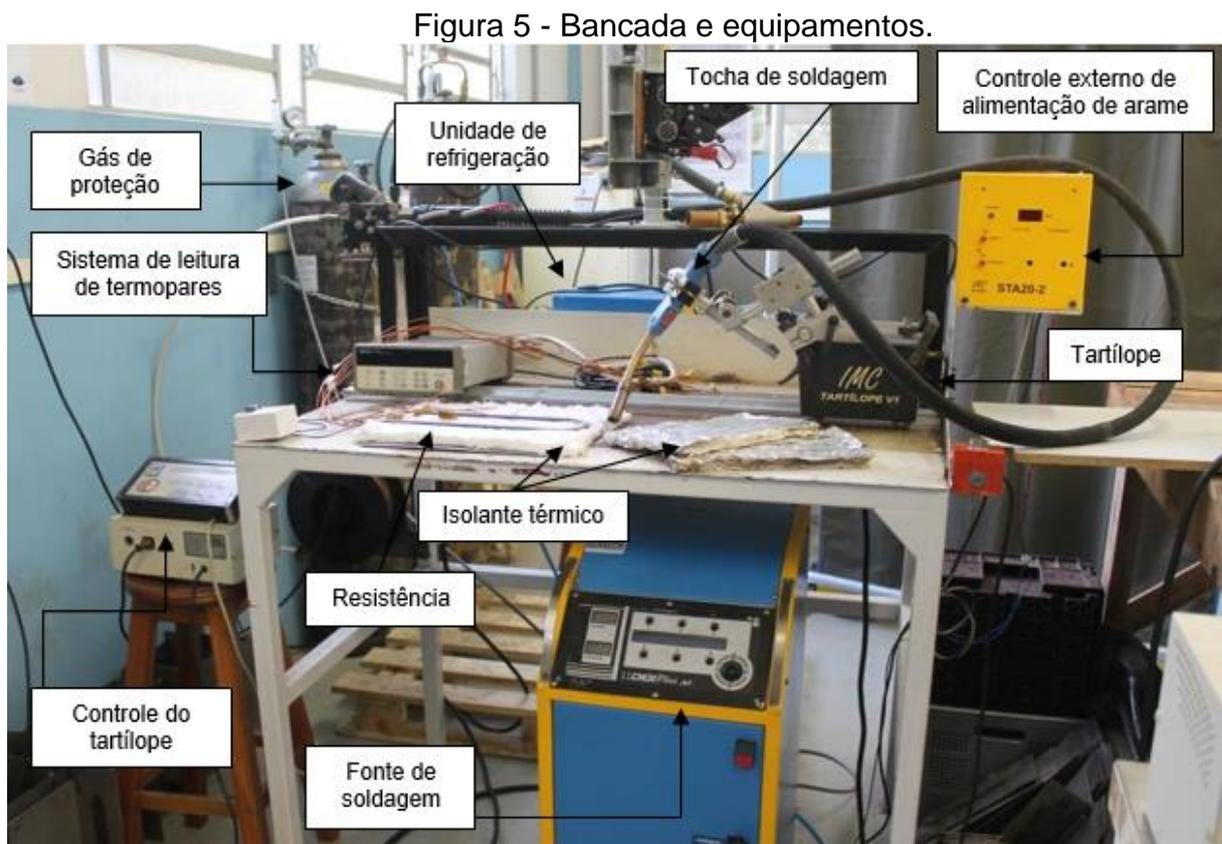
Fonte: Watanabe et al. (1957)

O resultado dos experimentos de referência e com a aplicação das técnicas mostram que para cada combinação de energia de soldagem, expressa em termos de corrente (I) e velocidade de soldagem (V_s) no eixo inferior do gráfico, e da geometria do reforçador, representado por uma dimensão h_1 , existe uma tendência de distorção angular. Nota-se que o pré-aquecimento realizado na superfície inferior do corpo de prova apresentou os melhores resultados para todos os níveis de energia ensaiados. A partir disto, adotou-se o método do pré-aquecimento pela face inferior da peça de trabalho como base para o desenvolvimento do trabalho, uma vez que esse pode reduzir as tensões residuais provocadas por soldagem e conseqüentemente as distorções.

3. METODOLOGIA

3.1 BANCADA DE ENSAIOS

A execução dos experimentos ocorreu no LTS da UFSC, localizado no campus de Joinville. Neste, foi preparada uma bancada equipada com uma fonte de soldagem, um sistema de deslocamento da tocha, um equipamento de aquisição de temperatura e um sistema de aquecimento para a aplicação da técnica imposta, conforme apresentado na Figura 5.



Fonte: O Autor.

A aplicação do processo MIG/MAG se deu através da fonte eletrônica multiprocesso DigiPLUS A7. Para realizar o deslocamento da tocha ao longo da junta, empregou-se o equipamento Tartilope IV, responsável pela movimentação da mesma

em um grau de liberdade, com controle preciso de velocidade. Além disso, utilizou-se uma unidade de refrigeração.

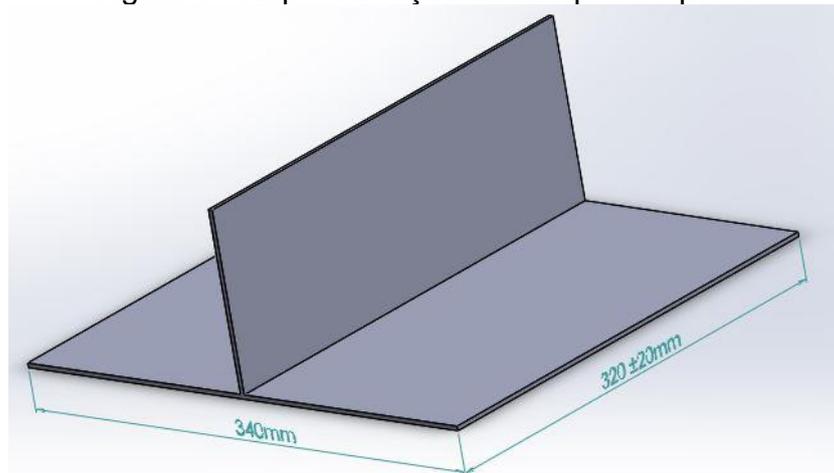
Para que fosse possível o acompanhamento e captação de dados de temperatura durante os ensaios, foi utilizado o sistema de aquisição de dados HP349790A. O equipamento permite o uso de até 16 canais de termopares simultaneamente e, que juntamente ao programa *LabView (National Instruments)*, possui uma porta de saída que viabiliza o armazenamento em computador dos dados da aquisição de maneira gráfica e numérica.

A implementação da técnica proposta se deu através do uso de uma resistência tubular com formato em U, adquirida sob encomenda, especificada para uma tensão de 220 V, com capacidade de potência de 1500 W. Visando a restrição da troca de calor com o ambiente, utilizou-se lã de rocha sob a resistência e sobre a chapa como isolamento térmico.

3.2 CORPOS DE PROVA

O material de base utilizado nos ensaios foi o A36(SAE1020), com espessura de 3 mm, onde o dimensionamento estabeleceu-se como sendo retangulares e com as maiores arestas de dimensão constante para todos os corpos de prova, correspondente a 340 mm, sendo estas arestas ortogonais a junta, e as arestas paralelas a junta com comprimento de 320 mm aproximadamente, como mostra a Figura 6. A partir disso, definiu-se que o comprimento do cordão de solda seria de aproximadamente 90% do comprimento total da junta.

Figura 6 - Representação dos corpos de prova



Fonte: O Autor.

Tendo as chapas à disposição, deram-se como necessárias algumas correções, devido ao fato das chapas serem obtidas de bobinas, deixando-os de maneira mais plana possível. Feito isso, partiu-se para a confecção das juntas em ângulo, onde os corpos de prova foram posicionados de tal forma que outro elemento representando a alma de um reforçador, de mesma espessura, fosse posicionado ortogonalmente, e ponteadado nas extremidades da junta, à chapa de base com o auxílio de um elemento prismático. Neste procedimento do ponteadado utilizou-se o processo de eletrodo revestido, com eletrodos E6013 com 2,5 mm de diâmetro, no qual a corrente utilizada foi de 80A.

3.3 ENSAIOS

A espessura do metal de base é um dos fatores que define o tipo de transferência metálica mais adequada. Dados os corpos de prova com baixa espessura, definiu-se o modo de transferência por curto-circuito, do processo MIG/MAG, através do qual pôde-se alcançar diferentes níveis de energia variando o parâmetro velocidade de soldagem. Portanto, definiu-se uma tensão de arco de 23 V e velocidade de adição do arame de 8,7 m/min, o que resultou numa corrente média aproximada de 185 A, a partir de ensaios preliminares com base em aspectos geométricos do cordão.

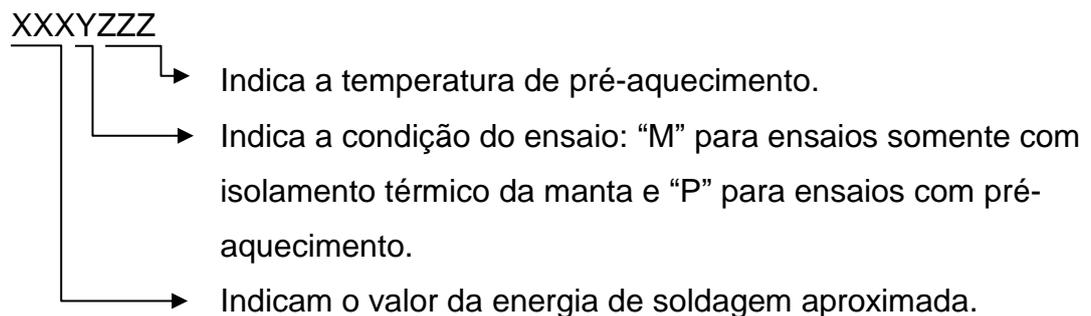
A soldagem do reforçador se deu através de um único cordão de solda, sendo realizado em um dos lados da junta, onde utilizou-se um ângulo de ataque de 90° aproximadamente. A distância entre bico de contato-peça utilizada foi de 15 mm. O gás utilizado nos experimentos foi uma mistura de 85% de Argônio e 15% de Dióxido de Carbono. Portanto, atentando-se ao efeito da proteção gasosa em testes preliminares, definiu-se uma vazão de 15 l/min. O metal de adição usado foi o ER70S-6 de 1 mm de diâmetro.

A aplicação da técnica deu-se por realizar o pré-aquecimento na superfície oposta à de soldagem das amostras, baseando-se nos resultados apresentados por Watanabe e Satoh (1957). Foram realizados diferentes ensaios buscando-se analisar, em relação a uma condição de referência, algumas condições que envolvessem diferentes temperaturas de pré-aquecimento, baseados nos limites inferior e superior do intervalo de temperaturas de 75°C e 150°C para aços carbono apresentado por Singh (2012), e diferentes níveis de energias de soldagem, além de uma condição com isolamento térmico sem pré-aquecimento. Para fins metodológicos, a organização dos corpos de prova e ensaios deu-se pela representação de cada condição através de um código, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Terminologia dos ensaios

Amostras	Parâmetros de soldagem ajustados			Energia de Soldagem calculada [J/mm]	Temperatura Pré-aquecimento [°C]
	Tensão [V]	Corrente [A]	Vs [mm/s]		
REF	23	185	5	851,0	-
851M000000	23	185	5	851,0	-
851P075	23	185	5	851,0	75
851P150	23	185	5	851,0	150
REF(1/2)	23	185	10	425,5	-
425M000000	23	185	10	425,5	-
425P075	23	185	10	425,5	75
425P150	23	185	10	425,5	150
425P150-10%	23	185	10	425,5	150

Legenda: REF e REF(1/2) referem-se as amostras de referência com a maior e menor energia de soldagem calculadas, respectivamente.



Fonte: O Autor.

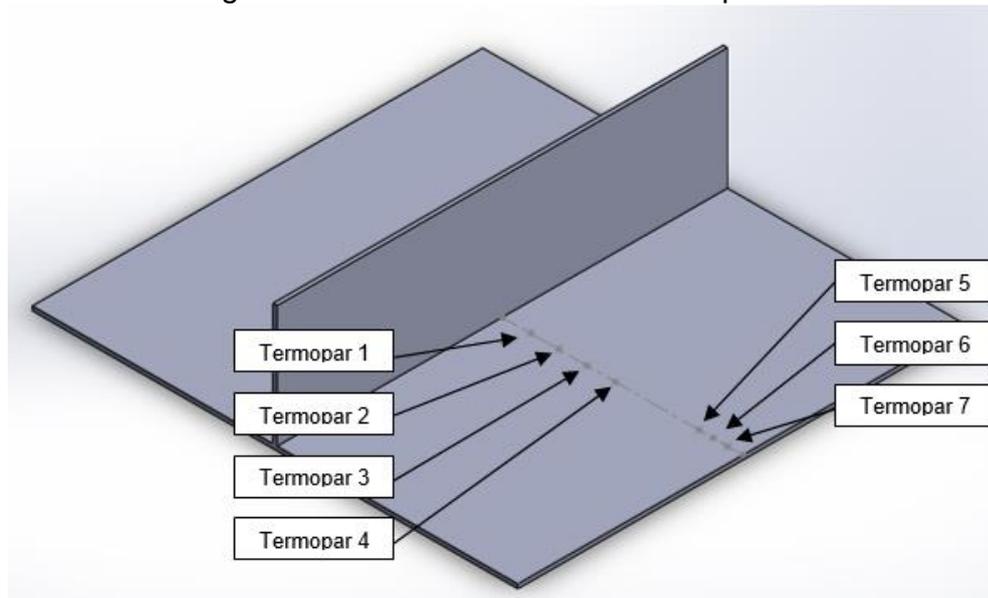
Assegurando que cada condição fosse apresentar o resultado esperado, realizaram-se 3 ensaios para cada condição com o intuito de filtrar resultados divergentes.

Para a realização das aquisições de temperatura durante os ensaios, fixaram-se os termopares na preparação de cada corpo de prova através de descargas capacitivas. Esta etapa foi realizada com auxílio de um capacitor e uma fonte de tensão constante.

As aquisições de temperatura iniciavam logo antes do início da soldagem nos ensaios sem pré-aquecimento. Para os demais ensaios, o início das aquisições deu-se no instante em que se iniciava o pré-aquecimento do corpo de prova. Assim que o termopar localizado a 40 mm da junta atingisse a temperatura definida para o ensaio, a potência de aquecimento era interrompida e então se dava início a soldagem.

Nos ensaios, utilizaram-se 7 termopares, alinhados no centro da chapa, à 90 graus em relação a junta, onde os pontos de aquisição mais próximos da junta espaçavam-se a uma distância equivalente a 20 mm, iniciando-se à 20 mm da junta e os demais, posicionados à 140 mm da junta, com espaçamento de 10 mm, todos na superfície superior do metal de base, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Posicionamento dos termopares.



Fonte: O Autor.

Durante o pré-aquecimento foi utilizada a máxima potência nominal da resistência a fim de atingir a temperatura preestabelecida menor tempo possível. No entanto, nos ensaios 425P150-10%, utilizou-se aproximadamente 10% da potência nominal da resistência com intuito de uniformizar ao máximo a temperatura do corpo de prova.

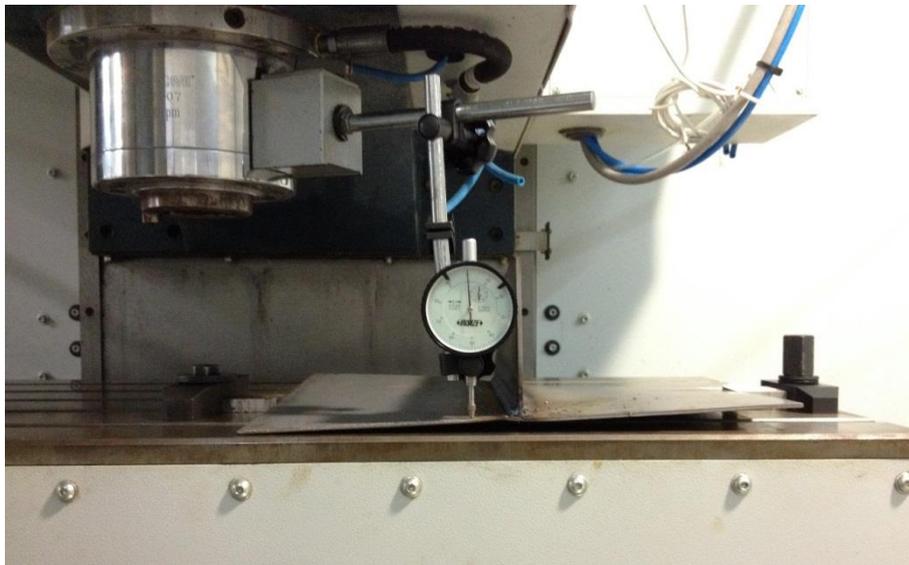
Dado o término da soldagem, a aquisição do ciclo térmico continuou e apenas finalizou-se quando se deu a homogeneização da temperatura nos corpos de prova em todos os ensaios, uma vez que a taxa de resfriamento é relativamente baixa a partir deste instante.

3.4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Após a preparação dos corpos de prova foi gerada uma malha na superfície da chapa de base para mapear a deformação, sendo essa projetada de forma suficiente para apresentar um resultado gráfico compatível com o real, sendo que não demandasse alto custo operacional. No entanto, optou-se por uma malha gerada através de 40 pontos, com 24 elementos retangulares de 45x75 mm² e 4 elementos de 60x75 mm² de área, de cobrindo grande parte da superfície do metal de base.

A fim de garantir a precisão na aquisição das cotas nas malhas geradas, utilizou-se o centro de usinagem baseado em Comando Numérico Computadorizado (CNC) em parceria com o Laboratório de Manufatura da UFSC, também localizado no campus de Joinville, no qual fez-se a varredura da superfície, utilizando acoplado ao eixo árvore, um relógio comparador *INSIZE*, com resolução de 0,01 mm, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Mapeamento da amostra realizado através de um equipamento de usinagem com comando numérico computadorizado.



Fonte: O Autor.

O mesmo procedimento foi repetido para as amostras após os ensaios de soldagem a fim de mensurar a variação geométrica provocada. Com o resfriamento das amostras após os ensaios, realizou-se um primeiro diagnóstico visual a respeito

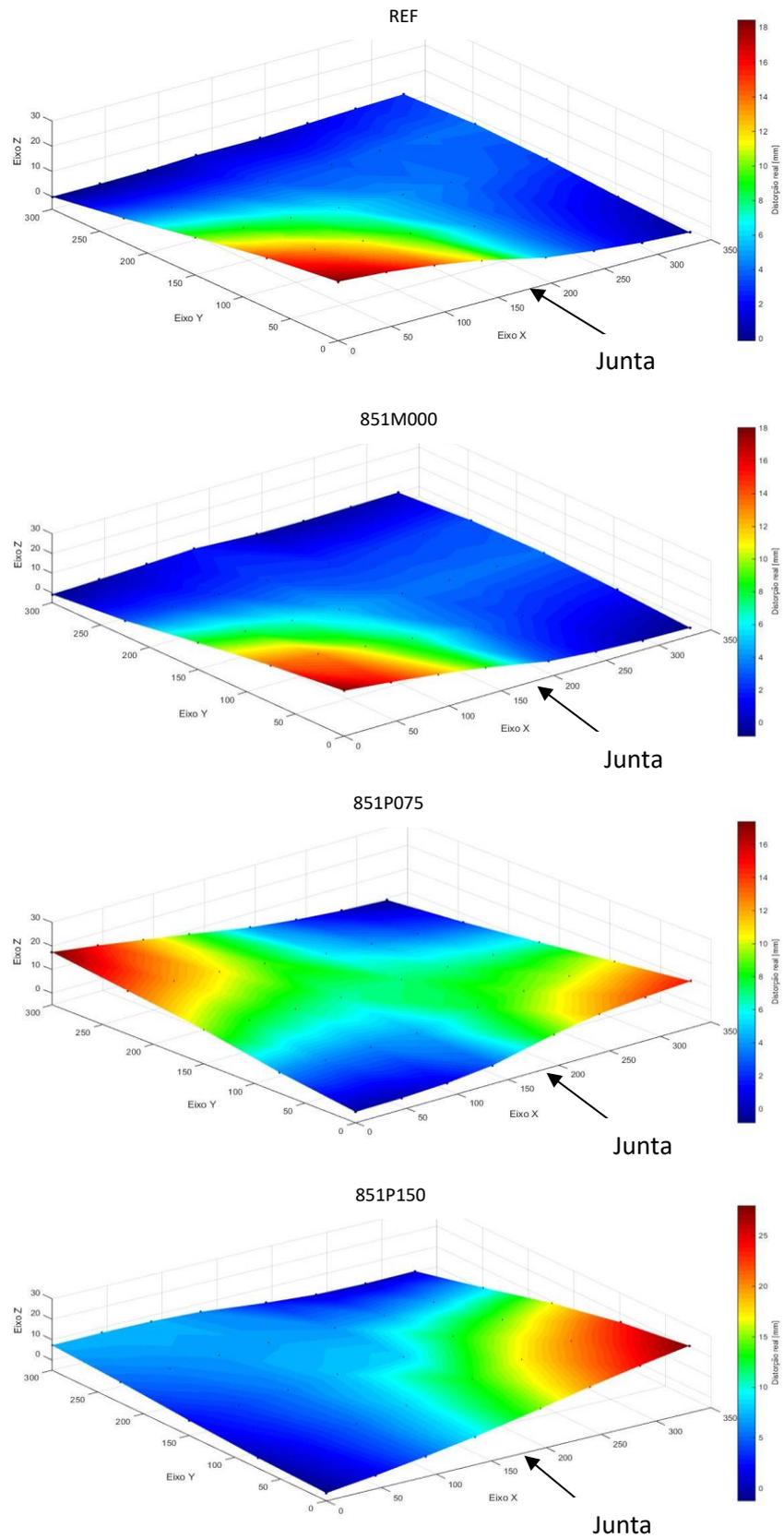
da distorção gerada. Ao fim do mapeamento das amostras, obtiveram-se os valores numéricos da distorção real de cada amostra calculados a partir da diferença entre as medições pós e pré-soldagem. Ao compilar esses dados, representou-se a distorção real de cada amostra através do programa MATLAB.

Dado o início da realização dos ensaios, observou-se na aquisição mostrada pelo programa *LabVIEW* a variação de temperatura de todos os termopares ativos, gerando-se consecutivamente as curvas de ciclo térmico da superfície superior da chapa nos pontos selecionados. Além disso, como saída do programa, capturaram-se os resultados numéricos de temperatura a cada segundo, como foi determinado na aquisição. Através desses valores, pode-se analisar o comportamento dos ciclos térmicos e repartições térmicas para cada ensaio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base no mapeamento superficial da distorção dos corpos de prova, representou-se graficamente as distorções reais provocadas pelo processo de soldagem nos ensaios de referência, com manta e com pré-aquecimento, onde a junta se encontra na posição 170 do Eixo X, paralela ao Eixo Y, como mostra a Figura 9, de modo que o cordão de solda se encontra à esquerda da indicação da junta.

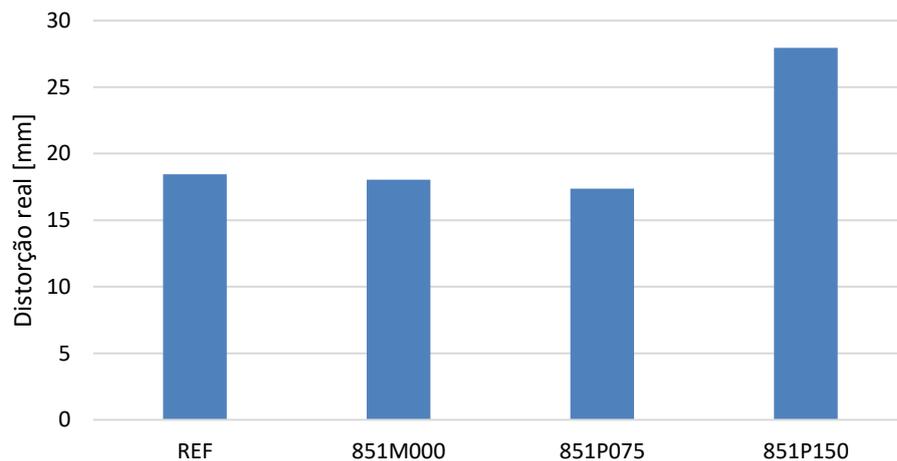
Figura 9 - Distorção real provocada nas amostras característica dos ensaios com maior energia de soldagem.



Fonte: O Autor.

De acordo com os resultados obtidos, observou-se que o nível de distorção gerado foi equivalente para as amostras de cada condição. Portanto, os plotes apresentados são característicos para cada amostra. Dados os resultados diagnosticados visualmente ao término de cada ensaio e graficamente através dos plotes, nota-se um padrão nas distorções, o qual é identificado por MELLO (2015). O padrão consta na distorção positiva acentuada em dois vértices, localizados diagonalmente, enquanto nos outros dois vértices acontece distorção negativa ou nula. A partir dos valores máximos de distorção real obtidos, realizou-se uma comparação entre os ensaios, mostrada na Figura 10.

Figura 10 - Comparação entre as máximas distorções reais geradas nos ensaios com maior energia de soldagem.

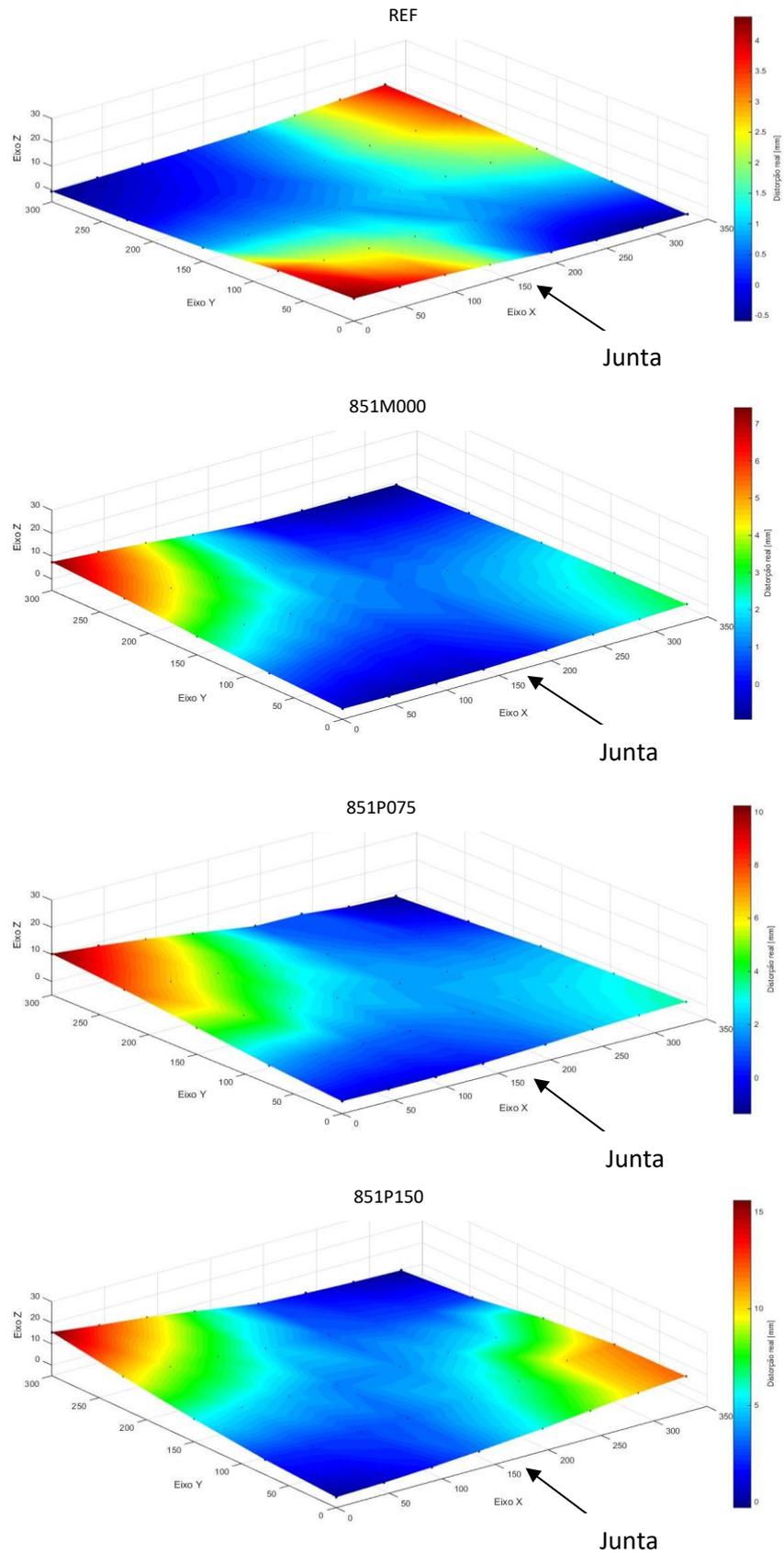


Fonte: O Autor.

De acordo com os resultados, percebe-se que o resultado entre as amostras REF e 851M000 é muito semelhante em termos do padrão e na magnitude da distorção. Em ambas amostras, a distorção ocorre no vértice próximo de onde iniciou-se a soldagem. Já na amostra 851P075, nota-se que a distorção se aproxima ainda mais do padrão citado. Em se tratando de magnitude da distorção, essa amostra apresenta redução em relação às outras, porém, não suficiente para caracterizar como eficiente. Do contrário, a amostra 851P150 apresenta um ganho em termos de distorção em um dos vértices, de maneira semelhante, no vértice próximo ao início do cordão de solda.

De maneira análoga, foram plotadas as distorções reais das amostras provenientes de ensaio com a menor energia de soldagem, que se apresentam na Figura 11.

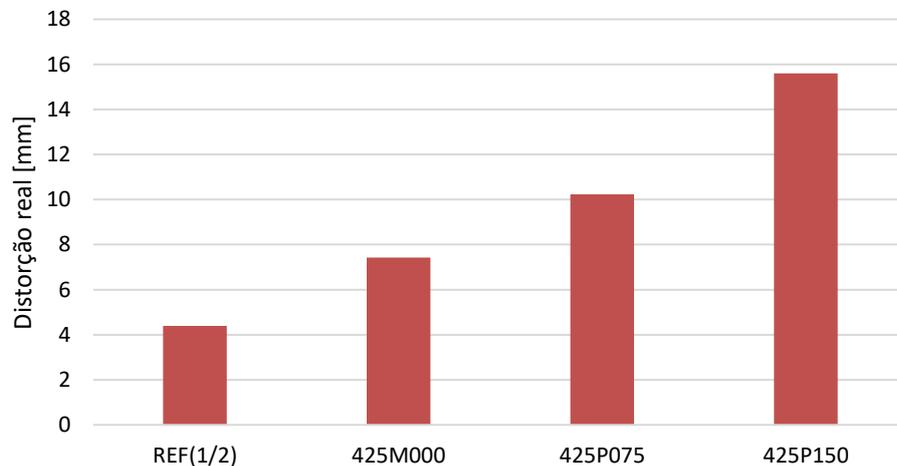
Figura 11 - Distorção real provocada nas amostras características dos ensaios com menor energia de soldagem.



Fonte: O Autor.

Com base nisso, através dos valores de máxima distorção real pode-se realizar uma comparação, mostrada na Figura 12.

Figura 12 - Comparação entre as máximas distorções reais geradas nos ensaios com menor energia de soldagem.



Fonte: O Autor.

Em análise aos resultados das amostras REF(1/2) e 425M000, ambas apresentam as características do padrão de distorção em vértices, porém com magnitudes diferentes, sendo a amostra do ensaio com manta com distorção amplificada. Considerando a amostra 425P075, observa-se que em relação à amostra de referência, houve um aumento significativo na distorção em um dos vértices, apesar de manter o padrão de distorção e ser de mesma ordem de grandeza.

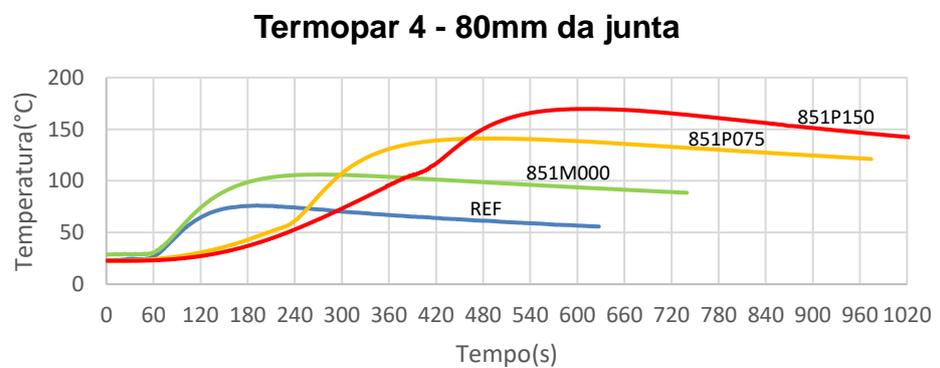
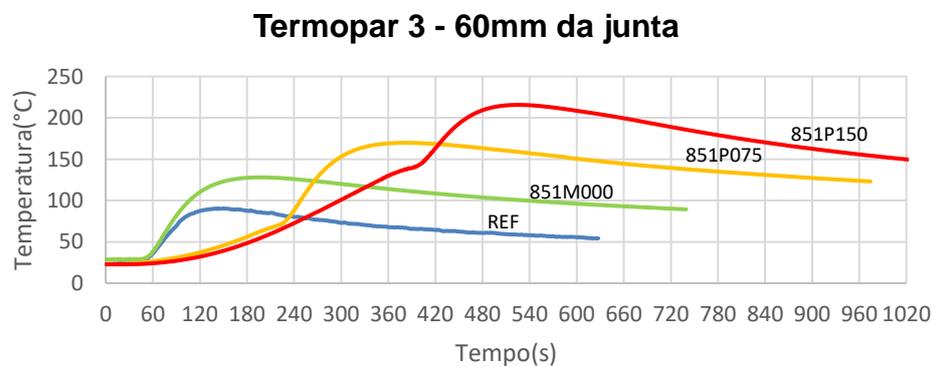
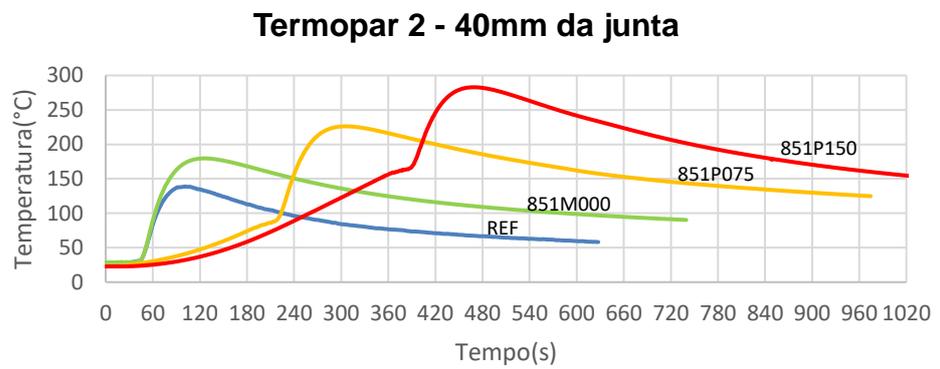
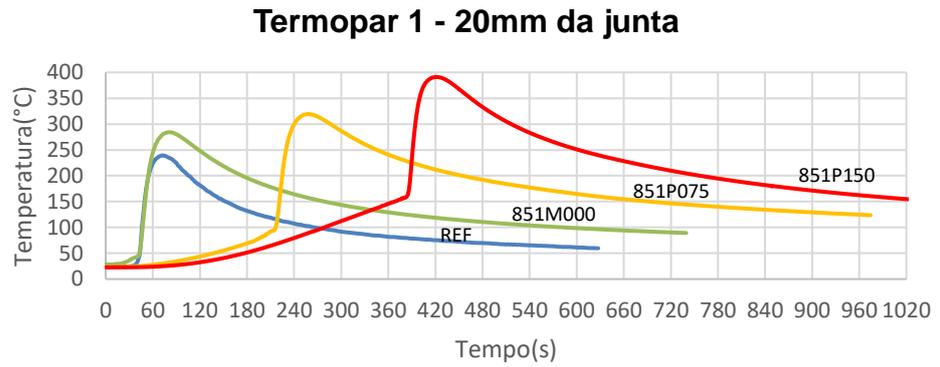
Em comparação com as amostras de baixa energia, a amostra 425P150 teve um aumento considerável na distorção. Porém, na realização dos outros ensaios com a mesma condição para a verificação do resultado, percebeu-se que ao atingir a temperatura de pré-aquecimento de 150°C, o corpo de prova apresentou folga de aproximadamente 1,5 mm na junta, o que caracterizou uma distorção somente pelo pré-aquecimento.

Como justificativa para esse fato, deve-se levar em consideração que ao pré-aquecer o corpo de prova pode ter ocorrido um alívio de tensões geradas no processo de fabricação da chapa. Deve-se considerar também que o metal de base se encontrava pontado a um reforçador. Ao aquecer o metal de base, a tendência natural de se expandir restringiu-se devido aos pontos de solda, influenciando na

ocorrência da distorção precoce. Além disso, a hipótese de a potência de aquecimento elevada colaborar com esse defeito deve ser considerada.

Como se espera, o nível de energia aplicado no processo influi diretamente no nível de distorção gerada, devido ao aumento das tensões residuais provocado pelo aumento da energia de soldagem. Para um melhor entendimento dos fenômenos da distorção e os demais apresentados, buscou-se a análise do comportamento do ciclo térmico de cada termopar. Os resultados para os 4 termopares próximos a junta dos ensaios de maior energia são apresentados na Figura 13.

Figura 13 - Ciclo térmico característico dos ensaios com maior energia de soldagem.



Fonte: O Autor.

Em análise ao comportamento dos ciclos térmicos de cada termopar, nota-se que na amostra 851M000 a curva desloca-se na vertical em uma magnitude proporcional à diferença entre as temperaturas de pico máximas provenientes do isolamento térmico. Para os ensaios com pré-aquecimento, o mesmo deslocamento da curva é proporcional à temperatura de pré-aquecimento de cada ensaio.

Como se espera, as curvas têm sua inclinação máxima modificada de acordo com a condição de isolamento ou pré-aquecimento, baseando-se nos fundamentos de condução de calor, como se observa na Equação 3 que é apresentada por Incropera et al. (2008). O equacionamento quantifica a condução de calor entre um espaçamento Δx , onde dada uma redução no gradiente térmico em relação à poça de fusão, reduz-se também as tensões térmicas geradas nesses pontos e também do fluxo de calor. Por consequência da diminuição do fluxo de calor, a taxa de aquecimento nestes pontos é reduzida. Dito isso, baseados nos dados de tempo e temperatura obtidos, calcularam-se as máximas taxas de aquecimento, apresentadas na Tabela 2 - Máximas taxas de aquecimento, sendo que os indicadores de 1 a 4 correspondem aos termopares posicionados a distâncias de 20 mm à 80 mm da junta, respectivamente.

$$q = k * A * \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3)$$

Tabela 2 - Máximas taxas de aquecimento dos ensaios com maior energia de soldagem.

Ensaio	Taxa 1 [°C/s]	Taxa 2 [°C/s]	Taxa 3 [°C/s]	Taxa 4 [°C/s]
REF	15,0	4,0	1,2	0,7
851M000	16,0	4,4	1,5	0,8
851P075	15,0	4,0	1,4	0,8
851P150	18,0	3,1	1,1	0,6
Taxa de pré-aquecimento (1500W)			0,5 °C/s	

Fonte: O Autor.

Como nota-se, o comportamento das taxas varia de acordo com as condições dos ensaios. No ensaio 851M000, a máxima taxa de aquecimento foi aumentada, em relação ao ensaio REF, em todos os termopares, justificando-se pelo fato do isolamento térmico, evitando perdas convectivas e radiativas para o meio. Ainda em

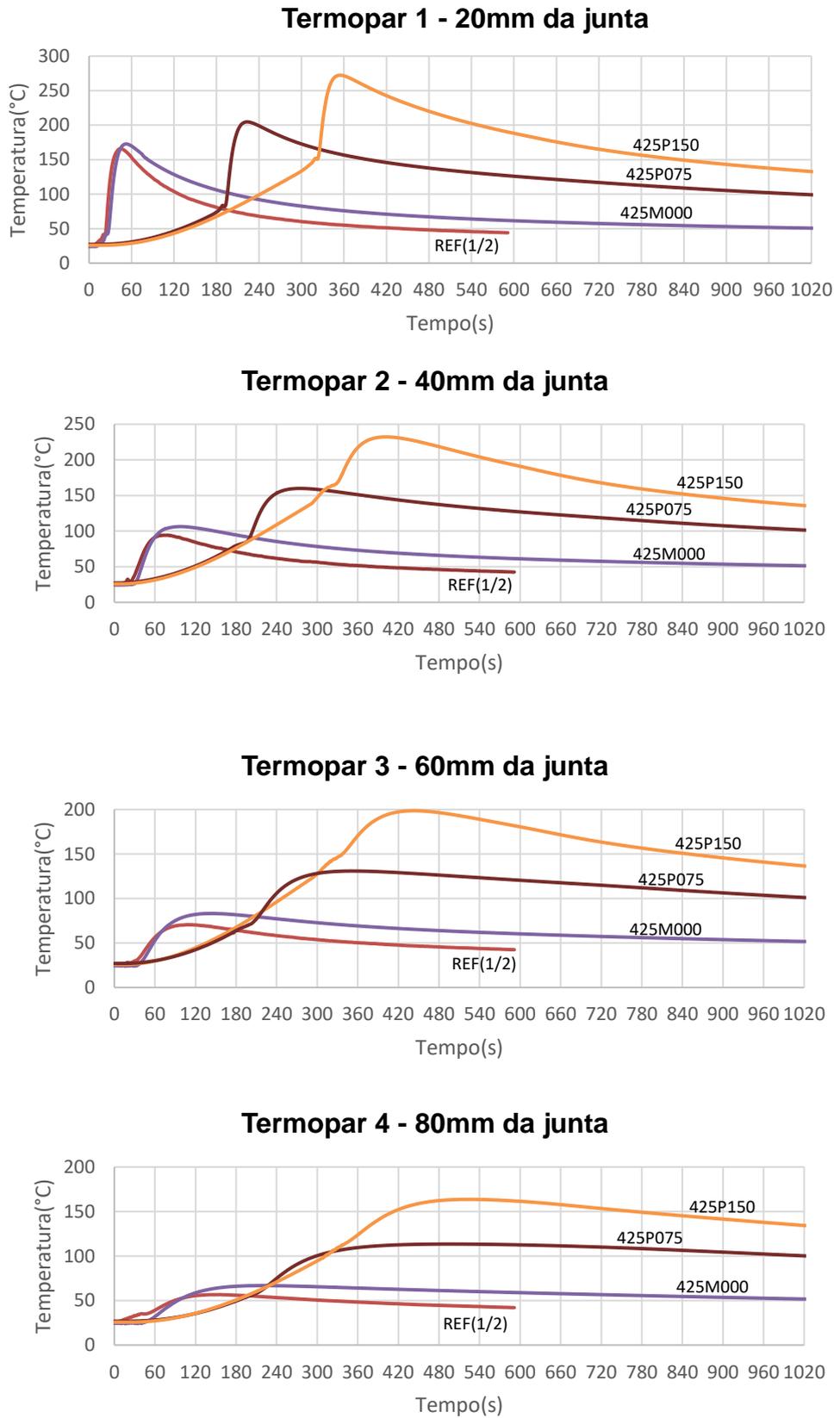
relação ao ensaio REF, percebe-se no ensaio 851P075 que as taxas dos termopares 1 e 2 não apresentam variação, enquanto o termopar 3 apresenta um ganho e o termopar 4 manteve-se constante. Nota-se então que o fluxo de calor não sofreu redução dado o nível de energia e 75°C de pré-aquecimento.

Quando analisado junto ao termopar 1 do ensaio 851P150, nota-se novamente que a temperatura de pré-aquecimento não reduziu o fluxo de calor. Logo, nos demais termopares deste ensaio o comportamento foi alterado. Isto indica que a temperatura de pré-aquecimento deste ensaio alterou o fluxo de calor em regiões com pelo menos 40 mm de distância da junta. Além disso, nos termopares mais afastados em relação a junta, percebeu-se um aumento na taxa de aquecimento para os ensaios 851M000 e 851P075, enquanto no ensaio 851P150 observou-se a redução da taxa de aquecimento.

Particularmente, para os ensaios 851P075 e 851P150, calculou-se a taxa de pré-aquecimento a partir das aquisições de temperatura do termopar 2, alinhado com a resistência no lado oposto do corpo de prova. Sendo assim, referente à uma potência de 1500W, a taxa de pré-aquecimento foi de aproximadamente 0,54°C/s.

Da mesma forma, obtiveram-se os ciclos térmicos dos ensaios com menor energia, os quais são apresentados na Figura 14.

Figura 14 - Ciclo térmico característico dos ensaios com menor energia de soldagem.



Fonte: O Autor.

De maneira análoga as amostras de ensaios com maior energia de soldagem, as curvas de ciclo térmico referentes as amostras de ensaios com menor energia obtiveram um ganho em temperatura proporcional ao isolamento térmico e a temperatura de pré-aquecimento, principalmente até o instante do pico de temperatura de cada termopar.

A partir das curvas de ciclo térmico, calcularam-se as máximas taxas de aquecimento para as amostras dos ensaios com menor energia, com apresenta-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Máximas taxas de aquecimento dos ensaios com menor energia de soldagem.

Ensaio	Taxa 1 [°C/s]	Taxa 2 [°C/s]	Taxa 3 [°C/s]	Taxa 4 [°C/s]
REF(1/2)	12,0	2,5	1,0	0,5
425M000	12,0	3,0	1,2	1,1
425P075	9,0	3,0	1,3	1,0
425P150	7,5	1,9	1,1	0,9
Taxa de pré-aquecimento (1500W)			0,5 °C/s	

Fonte: O Autor.

Como se esperava, para todos os ensaios quanto mais afastado da junta se encontrava o termopar, menor a taxa de aquecimento nesse ponto. De acordo com a Equação 3, na medida em que esses pontos se afastam da junta, ainda que para um mesmo gradiente térmico, a condução de calor é reduzida, visto que o espaçamento Δx aumenta. Consequentemente, para uma mesma seção, o fluxo de calor também é reduzido. Enquanto o calor se dissipa pelo corpo de prova, a diferença de temperatura entre esses pontos decai, caracterizando a redução do gradiente térmico entre os pontos monitorados e intensificando a redução do fluxo e condução de calor ao se afastar da junta.

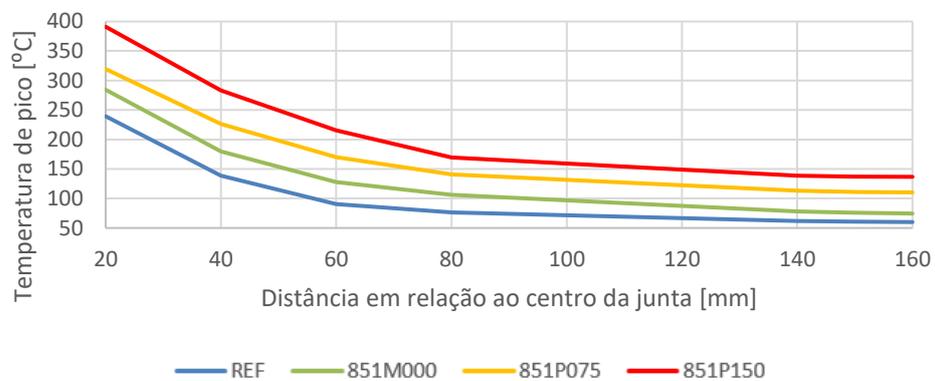
Em se tratando do ensaio 425M000, a mesma taxa 1 em relação ao ensaio REF(1/2) pode-se justificar pelo espaço necessário entre a manta de isolamento e a junta para que a tocha pudesse se deslocar livremente. Desta forma, esse espaço troca calor com o meio, impondo-se a uma condição semelhante a REF(1/2) nesse

ponto, enquanto o ganho na taxa dos demais termopares justifica-se pelo isolamento térmico, reduzindo perdas convectivas e radiativas.

Na amostra 425P075, a taxa de aquecimento foi reduzida à 20 mm da junta, enquanto nos demais pontos monitorados houve aumento da mesma em relação à amostra REF(1/2). O mesmo resultado se repete para a amostra 425P150 em todos os pontos. O fato de haver o pré-aquecimento, impõe a redução do gradiente térmico entre a junta e o termopar 2, o qual se encontra alinhado a resistência. Dada essa redução para um mesmo espaçamento Δx , baseado na Equação 3, a condução e o fluxo de calor também decaem em relação à amostra REF(1/2), sendo essa redução diretamente proporcional ao aumento na temperatura de pré-aquecimento.

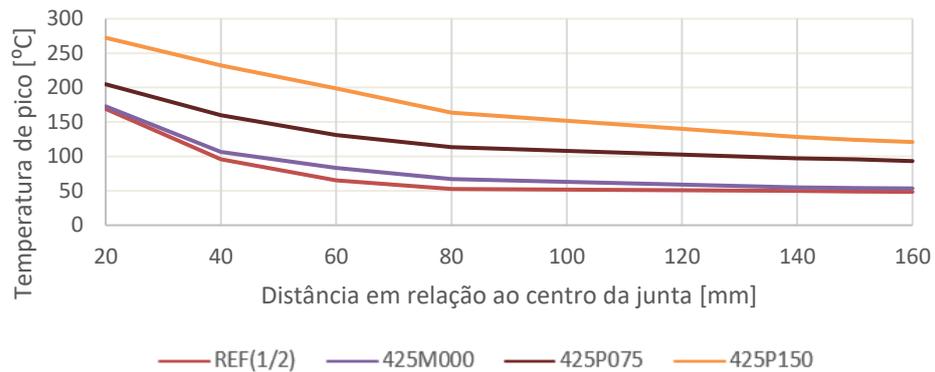
A partir das informações que se obtêm nas curvas de variação da temperatura com o tempo e com o posicionamento dos termopares construiu-se as curvas de repartição térmica para os ensaios de maior e menor energia de soldagem, que informam as temperaturas de máximas obtidas em cada termopar. Estas curvas são apresentadas na Figura 15 e Figura 16, respectivamente.

Figura 15 - Gráfico de repartição térmica para ensaios de maior energia.



Fonte: O Autor.

Figura 16 - Gráfico de repartição térmica para ensaios de menor energia.

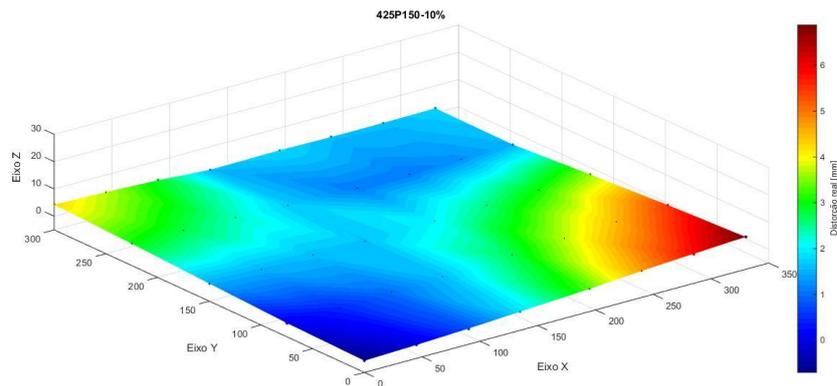


Fonte: O Autor.

Analisando do ponto de vista de comportamento característico dos ensaios em relação à repartição térmica, pode-se afirmar que nos ensaios com maior energia, o efeito produzido pelo isolamento térmico, na amostra 851M000, e pelo pré-aquecimento, nas amostras 851P075 e 851P150, não alterou significativamente a inclinação das curvas geradas em relação a amostra REF. Isto se reflete no ganho proporcional de temperatura gerado pelas técnicas aplicadas ao longo de praticamente todo corpo de prova. Porém, nos ensaios com menor energia, para os ensaios significativos com pré-aquecimento nota-se uma suavização na inclinação das curvas, principalmente de 20 mm a 40 mm de distância da junta.

Analisando as curvas de ciclo térmico para a amostra 425P150, nos termopares 1 e 2 (Figura 14) e a curva de repartição térmica correspondente a mesma amostra (Figura 16), observa-se que o intervalo de tempo entre os picos de temperatura é de aproximadamente 30 segundos. Esse resultado aponta uma redução no gradiente térmico entre esses pontos. Portanto, a partir do princípio de que tensões térmicas são diretamente proporcionais ao gradiente térmico e que o pré-aquecimento de 150°C a uma taxa de 0,5°C/s, equivalente a máxima potência de pré-aquecimento, provoca distorção no corpo de prova, estabeleceu-se uma nova condição visando uma melhor homogeneização da temperatura em toda base do corpo de prova, reduzindo a potência de pré-aquecimento. O ensaio foi realizado com as mesmas condições dos ensaios com menor energia, porém, com aproximadamente 10% da potência nominal da resistência usada para o pré-aquecimento. O resultado característico de distorção real do novo ensaio é apresentado na Figura 17.

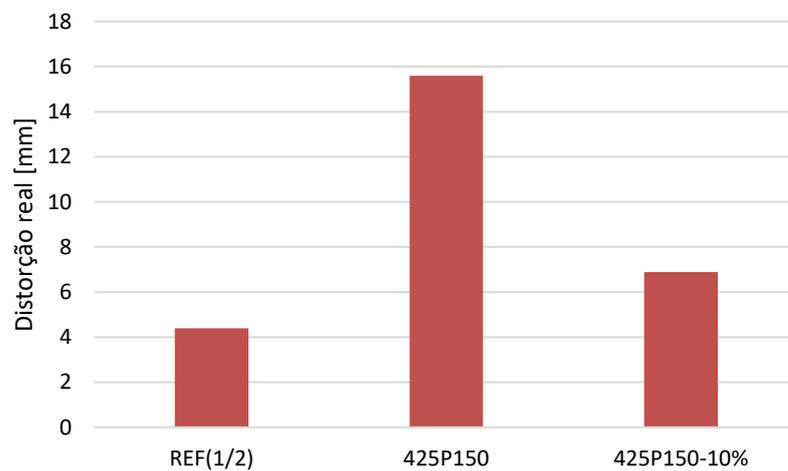
Figura 17 - Distorção real característica dos ensaios 425P150-10%



Fonte: O Autor.

Em comparação com a amostra REF(1/2), o novo ensaio não apresentou melhoria em termos de distorção, como pode-se notar através da Figura 18. Porém, em relação ao ensaio 425P150 houve melhoria característica, considerando a mesma temperatura de pré-aquecimento, mantendo um padrão de distorção dos vértices semelhante ao restante dos ensaios.

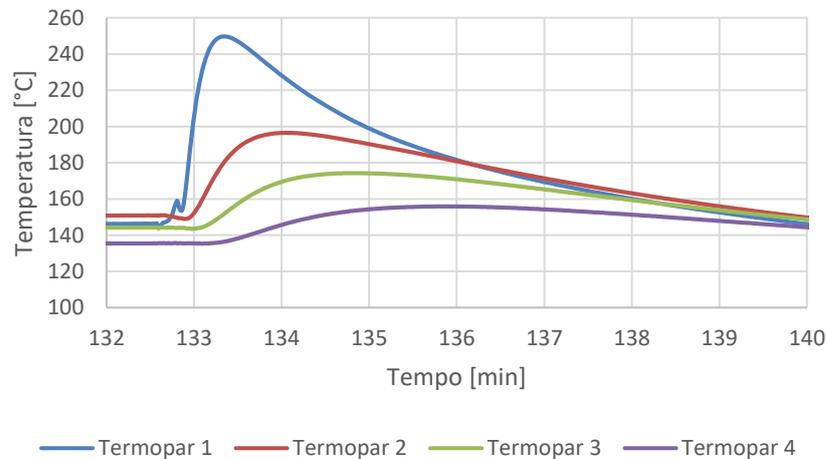
Figura 18 - Comparação entre as máximas distorções reais dos ensaios REF(1/2), 425P150 E 425P150-10%.



Fonte: O Autor.

Em se tratando da análise térmica, obteve-se da mesma forma os resultados para ciclo térmico para o novo ensaio, apresentados na Figura 19.

Figura 19 - Curvas de ciclo térmico para o ensaio característico
425P150-10%



Fonte: O Autor.

De acordo com o ciclo térmico gerado no ensaio obteve-se as taxas de aquecimento de cada termopar, bem como a taxa de pré-aquecimento, que são apresentados e comparados com os ensaios REF(1/2) e 425P150 na Tabela 4.

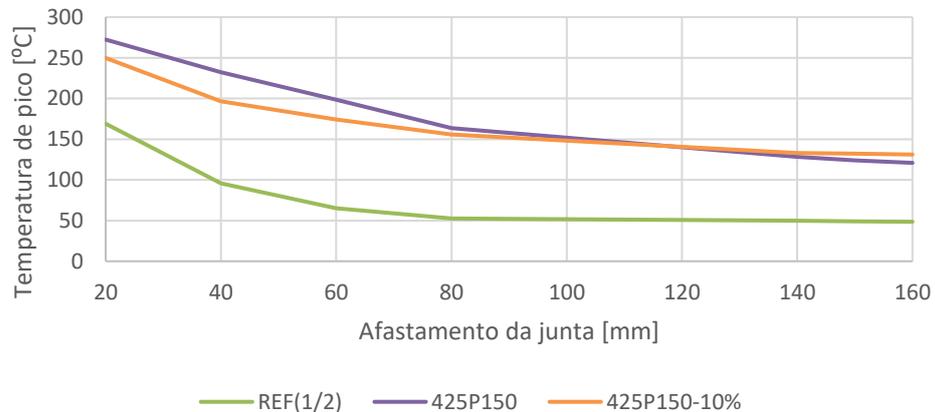
Tabela 4 - Máximas taxas de aquecimento dos ensaios REF(1/2), 425P150 e 425P150-10%.

Ensaio	Taxa 1[°C/s]	Taxa 2[°C/s]	Taxa 3[°C/s]	Taxa 4[°C/s]
REF(1/2)	12,0	2,5	1,0	0,8
425P150	7,5	1,9	1,1	0,9
425P150-10%	6,7	1,3	0,5	0,2
Taxa de pré-aquecimento (1500W)			0,5 °C/s	
Taxa de pré-aquecimento (154W)			0,05 °C/s	

Fonte: O Autor.

Dada a taxa de aquecimento empregada, é nítida a redução na velocidade de aquecimento do corpo de prova que melhor distribui a temperatura no mesmo, como é visto na Figura 20.

Figura 20 - Curvas de repartição térmica para os ensaios REF(1/2), 425P150 e 425P150-10%.



Fonte: O Autor.

Ao comparar as repartições térmicas nota-se que a curva de repartição térmica do ensaio 425P150-10% apresenta um aumento na temperatura de pico à distância de 20 mm da junta em relação ao ensaio REF(1/2), porém, inferior ao pico de temperatura do ensaio 425P150 neste ponto. No entanto, analisando os picos de temperatura dos ensaios com pré-aquecimento na medida em que se aumenta a distância da junta, observa-se a suavização da curva, representando uma melhor distribuição de temperatura na amostra.

De acordo com a Equação 3, a distribuição de temperatura no ensaio 425P150-10% de maneira mais uniforme que no ensaio 425P150, induz uma redução no gradiente térmico entre os pontos monitorados no instante antes da soldagem. Isto observa-se no comportamento da curva 425P150-10%(Figura 20), por não apresentar um aumento constante em relação ao ensaio REF(1/2), como observou-se nos ensaios com maior energia (Figura 15).

O comportamento das taxas de resfriamento é semelhante quando se compara os ensaios equivalentes para cada nível de energia. Como comparação entre níveis de energia, calcularam-se as taxas de resfriamento para os termopares distanciados à 20 mm e 40 mm da junta, as quais são apresentadas como Taxa 1 e Taxa 2, respectivamente, na Tabela 5.

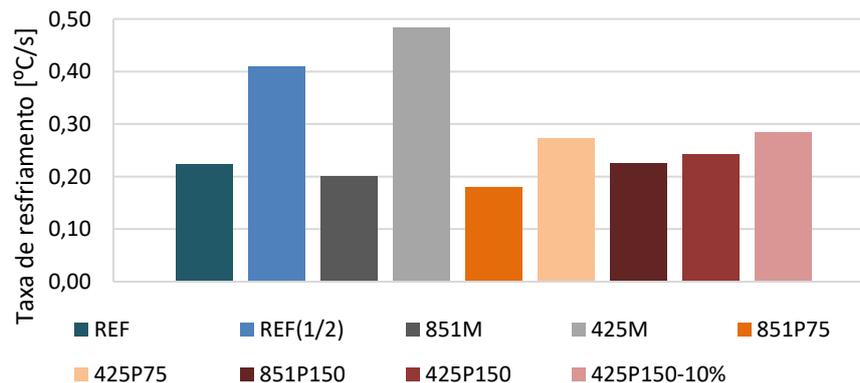
Tabela 5 - Comparação entre taxas de resfriamento para ambos níveis de energia de soldagem

Ensaio	Intervalo de temperatura	Taxa 1 [°C/s]	Intervalo de temperatura	Taxa 2 [°C/s]
REF	160°C a 60°C	0,222	90°C a 55°C	0,090
REF(1/2)	160°C a 60°C	0,408	90°C a 55°C	0,159
851M000	170°C a 100°C	0,200	105°C a 90°C	0,068
425M000	170°C a 100°C	0,483	105°C a 90°C	0,167
851P075	200°C a 140°C	0,179	160°C a 130°C	0,113
425P075	200°C a 140°C	0,273	160°C a 130°C	0,107
851P150	240°C a 160°C	0,225	190°C a 120°C	0,378
425P150	240°C a 160°C	0,242	190°C a 120°C	0,412
425P150-10%	240°C a 160°C	0,284	190°C a 120°C	0,087

Fonte: O Autor.

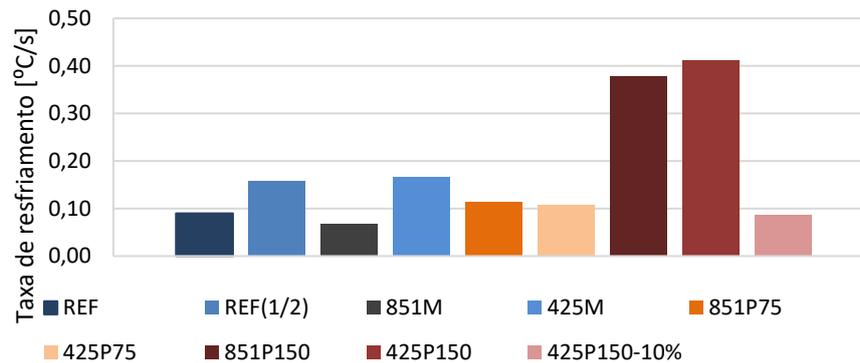
Ao comparar as taxas de resfriamento entre os níveis de energia, nos termopares localizados até 40 mm de afastamento da junta, nota-se que em todas as análises a taxa de resfriamento é maior para os ensaios com menor energia de soldagem, como mostra a Figura 21 e Figura 22.

Figura 21 - Comparação entre taxas de resfriamento à 20 mm da junta



Fonte: O Autor.

Figura 22 - Comparação entre taxas de resfriamento à 40 mm da junta.



Fonte: O Autor.

A potência elétrica fornecida é a mesma para ambas as condições de energia de soldagem, porém, o arco percorre a junta com metade da velocidade nos ensaios de maior energia de soldagem, o que tende a elevar mais a temperatura média do corpo de prova em relação aos ensaios com menor energia de soldagem. Dito isto, tem-se um maior gradiente térmico nos ensaios com menor energia de soldagem, uma vez que a temperatura nos demais ensaios tende a se uniformizar mais.

Consequentemente, a condução de calor nos ensaios com menor energia de soldagem também é maior. A mesma análise não pode ser feita para os demais termopares, pois, para cada nível de energia, os termopares com afastamento maior ou igual à 60 mm da junta encontram-se em intervalos de temperatura diferentes.

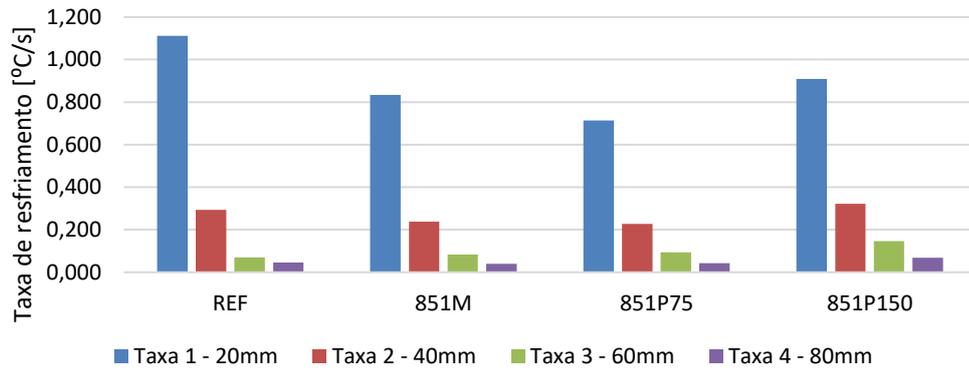
A fim de analisar o efeito das técnicas aplicadas sobre as taxas de resfriamento dos ensaios, calcularam-se, para intervalos de temperatura (ΔT) a partir da temperatura de pico de cada ensaio, as taxas de resfriamento para cada nível de energia, apresentadas na Tabela 6 e Tabela 7 e comparadas na Figura 23 e Figura 24.

Tabela 6 - Taxas de resfriamento para os ensaios característicos com maior energia de soldagem

ΔT	100°C	50°C	35°C	20°C
Ensaio	Taxa 1 [°C/s]	Taxa 2 [°C/s]	Taxa 3 [°C/s]	Taxa 4 [°C/s]
REF	1,111	0,294	0,070	0,045
851M000	0,833	0,238	0,083	0,040
851P075	0,714	0,227	0,065	0,043
851P150	0,909	0,323	0,146	0,069

Fonte: O Autor.

Figura 23 - Comparação entre taxas de resfriamento para ensaios com maior energia de soldagem.



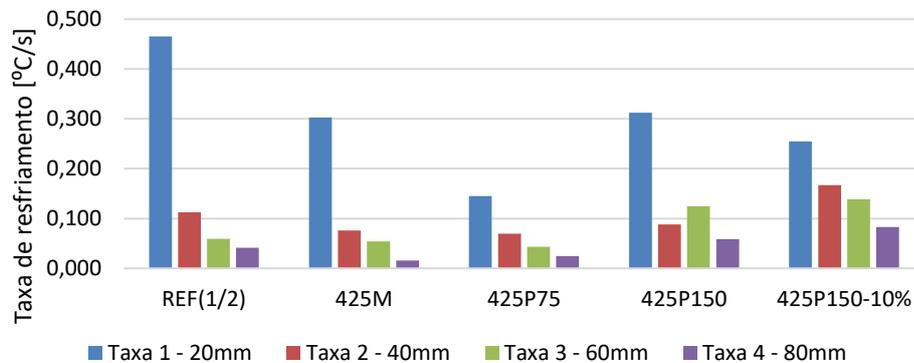
Fonte: O Autor.

Tabela 7 - Taxas de resfriamento para os ensaios característicos com menor energia de soldagem

ΔT	100°C	50°C	25°C	10°C
Ensaio	Taxa 1 [°C/s]	Taxa 2 [°C/s]	Taxa 3 [°C/s]	Taxa 4 [°C/s]
REF(1/2)	0,465	0,112	0,060	0,042
425M000	0,303	0,079	0,054	0,016
425P075	0,145	0,068	0,043	0,025
425P150	0,313	0,086	0,125	0,059
425P150-10%	0,254	0,167	0,139	0,083

Fonte: O Autor.

Figura 24 - Comparação entre taxas de resfriamento para ensaios com menor energia de soldagem.



Fonte: O Autor.

De maneira inversa às taxas de aquecimento (Tabela 2 e Tabela 3), as taxas de resfriamento à 20 mm da junta dos ensaios 851M000 e 425M000 reduziram, em relação a REF e REF(1/2) respectivamente, pela presença do isolamento térmico, por evitar perdas convectivas e radiativas de calor para o ambiente.

Em relação aos ensaios 851P075 e 425P075, os ensaios 851P150 e 425P150 apresentaram um aumento na taxa de resfriamento nos respectivos intervalos de temperatura. Tal fato pode ser associado aos níveis de temperatura de pico em que os corpos de prova foram submetidos, sendo proporcional a temperatura de pré-aquecimento, baseando-se na Equação 3, uma vez que o gradiente térmico entre as regiões monitoradas é maior nos ensaios com 150°C de pré-aquecimento em relação aos ensaios com 75°C de pré-aquecimento.

Os ensaios 851P075 e 425P075 apresentaram redução na taxa de resfriamento em relação aos ensaios REF e REF(1/2), respectivamente. Ao comparar com os ensaios 851M000 e 425M000, nota-se que na região entre 20 mm e 60 mm de afastamento da junta também houve redução.

Uma vez que as temperaturas de pico são elevadas pelo pré-aquecimento, espera-se que as taxas de resfriamento também sejam elevadas, devido ao maior gradiente térmico gerado entre o corpo de prova e ambiente. Porém, notou-se que as taxas de resfriamento são influenciadas principalmente pela condução de calor no próprio corpo de prova, a partir da melhor distribuição da temperatura nessa região nos ensaios 851P075 e 425P075 em relação a REF e REF(1/2), respectivamente, em um instante de tempo anterior ao início da soldagem.

Em análise aos ensaios 851P150 e 425P150, observou-se que na região próxima à junta houve redução nas taxas de resfriamento em relação aos ensaios REF e REF(1/2) e, nas regiões mais afastadas, percebeu-se o aumento das taxas de resfriamento. De mesma forma, isto deve-se a região analisada e a distribuição de temperaturas na mesma, em um instante de tempo anterior ao início da soldagem.

Em se tratando do ensaio 425P150-10%, o aumento na taxa de resfriamento é mais evidente quando comparado aos demais ensaios com pré-aquecimento, com exceção da região localizada a 20 mm da junta, que em relação aos ensaios REF(1/2) e 425P150 houve redução. Uma vez que a temperatura se encontra de melhor maneira distribuída no corpo de prova, observa-se o menor gradiente térmico entre os pontos analisados, e conseqüentemente uma menor taxa de transferência de calor. Porém, a elevação das temperaturas de pico das regiões analisadas gera um aumento

no gradiente térmico entre o corpo de prova e o ambiente, ocasionando uma taxa de resfriamento mais elevada, com relação aos demais ensaios, nos termopares com afastamento maior ou igual que 40 mm da junta devido ao aumento das perdas convectivas e radiativas de calor.

Os ensaios realizados possuíam o intuito reduzir o nível de distorção gerado nos processos de soldagem através da redução do gradiente térmico por meio do método de pré-aquecimento. Mesmo havendo redução no gradiente térmico através de uma melhor distribuição da temperatura nos corpos de prova, observados nas inclinações das curvas de repartição térmica(Figura 15 e Figura 16) e reduzindo as taxas de resfriamento, impondo maiores níveis de temperatura uniforme nos corpos de prova, a redução das tensões residuais não foi alcançada, e por consequência, os níveis de distorção continuaram presentes, aumentando em algumas condições.

5. CONCLUSÕES

Baseando-se no desenvolvimento deste trabalho, pode-se concluir que:

- A bancada de ensaios concebida atendeu as necessidades para a realização dos ensaios experimentais;
- O pré-aquecimento de 150°C realizado por meio da técnica, com potência de 1500W, provocou distorção precoce no corpo de prova por conta do alívio de tensões residuais presentes no mesmo;
- O pré-aquecimento não influi significativamente no fluxo de calor dos ensaios com maior energia de soldagem, visto através das máximas taxas de aquecimento. Já nos ensaios com menor energia de soldagem, com aplicação do pré-aquecimento, houve redução nas máximas taxas de aquecimento na região mais próxima a junta, dadas as pequenas espessuras dos corpos de prova;
- Para os ensaios 425P75 e 425P150, houve redução nas temperaturas de pico, principalmente na região entre 20mm e 40mm da junta, em relação ao ensaio REF(1/2). Em se tratando dos ensaios com maior energia de soldagem envolvendo aplicação de isolamento térmico ou preaquecimento, estes apresentaram um aumento constante nas temperaturas de pico entre os termopares, quando comparados ao ensaio REF;
- O ensaio 425P150-10% apresentou a maior taxa de resfriamento em praticamente todos termopares, e conseqüentemente, não apresentou redução na distorção em relação ao ensaio REF(1/2);
- Os resultados obtidos mostram que as distorções resultantes seguem um padrão já identificado de distorção já identificado;
- O pré-aquecimento no corpo de prova provoca um aumento de mesma ordem nas temperaturas de pico na região próxima à junta. Além disso, percebeu-se que a temperatura de pré-aquecimento proporciona um aumento diretamente proporcional na taxa de resfriamento.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização deste trabalho e dos resultados obtidos, sugere-se:

- Averiguar uma temperatura de pré-aquecimento para a redução das tensões residuais e distorções.
- Avaliar diferentes regiões de pré-aquecimento a fim de obter maior eficiência na técnica proposta.
- Analisar a técnica para diferentes tipos de aço;
- Investigar o padrão de distorção resultante junto aos processos de obtenção dos metais de base.

REFERÊNCIAS

ANDERSEN, L. F. **Residual Stress and Deformations in Steel Structures**. 2000. 206 p. Tese (PhD) - Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, DK. 2000

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.

JUNG, G. H., Tsai, C. L. Fundamental Studies on the Effect of Distortion Control Plans on Angular Distortion in Fillet Welded T-Joints. **Welding Journal**. Dallas, TX, p. 213-223, (2004).

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2. ed. New Jersey: Wiley: Interscience, 2003.

INCROPERA, F.P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6 ed. Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos: 2008.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre, 2007.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., & BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MASUBUCHI, K. **Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion, and their Consequences**. 1. ed. Massachusetts: Pergamon Press, 1980.

MELLO, H. F. **Análise da influência dos gases de proteção no processo de soldagem MIG/MAG sobre distorções de chapa de aço**. 2015. 51 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Joinville, SC. 2015.

MODENESI, P. J. **Transferência de Metal na Soldagem GMAW**. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/laboratorios/laboratorio-de-soldagem/>>. Acesso em: 17 out. 2016.

MOCHIZUKI, M. Minimizing angular distortion in welding by reverse-side heating. **Osaka: Woodhead Pub**. p. 273-288, 2011.

OKUMURA, T., & TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1982.

PAZOOKI, A. M. **Distortion Control During Welding**. 2014. 261 p. Tese (Doutorado). Delft University of Technology , Delft, NL. 2014.

ROSENTHAL, D. **Welding Journal**, 220 p. 1941.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **MIG/MAG**: Melhor entendimento, Melhor desempenho. Uberlândia: Artliber, 2008.

SINGH, R. **Applied Welding Engineering**: Processes, Codes and Standards. 1 ed. Massachusetts: Elsevier, 2012.

VAN DER AA, E. M. **Local Cooling during Welding**: Predication and Control of Residual Stresses and Buckling Distortion. 2007. 230 p. Delft: Delft University of Technology, Delft, NL. 2007.

WAINER, E., BRANDI, S. D., & MELLO, F. D. **Soldagem**: Processos e metalurgia. São Paulo: Editora Edgard Blüncher Ltda., 1992.

WATANABE, M. et al. Distortion in Web Plate of Welded-built-up Girder due to Welding of Stiffeners and the Methods for Decreasing it. **Journal of Japan Welding Society**. p. 591-596, 1957.