

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

JORGE LUIS BASCINI JUNIOR

INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DE GASES AUXILIARES NA SOLDAGEM TIG DE  
CHAPAS FINAS DE AÇO INOXIDÁVEL QUANTO ÀS DISTORÇÕES

Joinville

2019

JORGE LUIS BASCINI JUNIOR

INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DE GASES AUXILIARES NA SOLDAGEM TIG DE  
CHAPAS FINAS DE AÇO INOXIDÁVEL QUANTO ÀS DISTORÇÕES

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

Orientador: Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha.

Joinville

2019

JORGE LUIS BASCINI JUNIOR

INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DE GASES AUXILIARES NA SOLDAGEM TIG DE  
CHAPAS FINAS DE AÇO INOXIDÁVEL QUANTO ÀS DISTORÇÕES

Este trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Naval.

Joinville, 02 de julho de 2019.

Banca Examinadora:

---

Dr. Tiago Vieira da Cunha  
Presidente

---

Dr. Gabriel Benedet Dutra  
Membro

---

Dr. Luis Fernando Peres Calil  
Membro

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais Jorge Luis Bascini e Maristela Portioli Bascini que sempre batalharam sem medir esforços para que eu pudesse ter uma educação de qualidade. Sem eles seria impossível eu chegar até aqui.

Ao meu orientador Tiago Vieira da Cunha, o qual despertou meu interesse pela soldagem e fomentou minha busca pelo conhecimento. Obrigado por todo apoio, orientação e paciência dedicados. Que nossa amizade prevaleça com o passar dos anos.

À toda equipe do LTS, que durante estes três anos colaborou intensivamente com troca de conhecimentos e experiências fundamentais para o desenvolvimento de meus conhecimentos na área de processos de fabricação, especialmente no âmbito da soldagem.

À equipe Formula CEM, a qual tive a oportunidade de fazer parte por quatro anos. Agradeço todo o aprendizado e momentos compartilhados durante o período em que fui membro da equipe.

À Universidade Federal de Santa Catarina que me proporcionou momentos incríveis durante toda minha graduação, seja com o amadurecimento pessoal e profissional ou seja com as pessoas incríveis as quais tive a honra de ter o destino cruzado.

A todos os professores e profissionais da UFSC Joinville, em especial àqueles que fizeram parte da minha graduação, pelo conhecimento adquirido, pelo exemplo de profissionalismo e por todas as oportunidades obtidas.

A todos amigos que fiz durante minha graduação, em especial aos que ingressaram comigo e aos amigos da Engenharia Naval.

Ao meu grande amigo e irmão de coração Leandro Souza Pinheiro da Silva, o qual tive a oportunidade de dividir moradia durante a maior parte da minha graduação. Obrigado por todos os momentos que passamos juntos, toda ajuda prestada e amizade partilhada ao longo destes anos.

À minha namorada Victoria Ferreira por todo o companheirismo, compreensão e paciência dedicados durante o desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

As distorções provenientes do processo de soldagem são um grande problema para a indústria metalmeccânica, uma vez que tais distorções podem danificar o aspecto estético, dificultar a montagem de peças e comprometer a integridade estrutural dos componentes, podendo causar a inutilização dos mesmos. A redução de distorções resultantes do processo de soldagem se tornou importante foco de pesquisa na construção naval, fato que é intensificado com a tendência da redução nas espessuras dos materiais utilizados. Neste contexto, a utilização do aço inoxidável na indústria náutica é de suma importância, visto suas características propícias ao acabamento, de forte apelo visual, além da alta resistência à corrosão. Porém, uma grande adversidade na utilização do mesmo é seu alto grau de deformação devido à gradientes térmicos produzidos pela aplicação de calor no material. Tal problema pode exigir retrabalho, custos adicionais, tempo extra e atraso no projeto, gerando prejuízos ao estaleiro. O propósito deste trabalho é desenvolver um dispositivo capaz de injetar gases auxiliares na região do cordão de solda, imediatamente após sua solidificação, a fim de dissipar o calor contido nesta região. Tal dissipação do calor implica em uma redução do gradiente térmico local e, conseqüentemente, das tensões residuais, possibilitando uma investigação sobre o comportamento das distorções perante a condutividade térmica. Os experimentos foram realizados utilizando-se o gás CO<sub>2</sub> e a mistura gasosa Ar + 5% H<sub>2</sub>, gases estes que possuem distintas propriedades térmicas. Além disso, também foi analisada a influência da vazão dos mesmos, variando-se os fluxos em 10l/min, 15l/min, 20l/min e 25l/min. O desenvolvimento deste estudo revelou que, para os gases analisados, a redução das distorções provenientes do processo de soldagem é proporcional à condutividade térmica do gás utilizado. Além disso, também foi evidenciada uma possível condição de vazão ótima, dentre as vazões estudadas, para reduzir o efeito das distorções de soldagem.

**Palavras- chave:** GTAW, Aço inoxidável, Distorções, Gases auxiliares.

## ABSTRACT

The coming distortions of the welding process are a great problem for the manufacturing industry, since such distortions can hinder the assembly of pieces, as well as damage the appearance and the structural integrity of its components, which can cause them to become unusable. The reduction of the resulting distortions of the welding process became important research focus in shipbuilding, fact intensified with the tendency to reduce the thickness of the used materials. In this context, the use of stainless steel in nautical industry is indispensable, since its propitious features to finish, of strong visual appeal, besides the high resistance to corrosion. However, a great adversity in the use of the same is its high deformation capacity due to thermal gradients generated by the application of heat in the material. Such problem requires rework, additional costs, extra time and project delays, causing damages to the shipyard. The purpose of this work is to develop a device capable of injecting auxiliary gases in the region immediately after the electric arc, on the weld bead, in order to dissipate the heat contained in the region. Such heat dissipation implies in a reduction of the local thermal gradient and, consequently, of the residual stresses, making possible an investigation on the behavior of the distortions according to the thermal conductivity. The experiments were accomplished using CO<sub>2</sub> gas and the gas mixture Ar + 5% H<sub>2</sub>, which have different thermal properties. In addition, also was analyzed the influence of flow rate from these, with flows varying by 10l/min, 15l/min, 20l/min and 25l/min. The development of this study revealed that, for the analyzed gases, the reduction of distortions from the welding process is proportional to the thermal conductivity of the used gas. In addition, it was evidenced a possible optimal flow condition, among the studied flows, to reduce the effect of welding distortions.

**Keywords:** GTAW, Stainless steel, Distortions, Auxiliary gases.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1- Rendimentos térmicos para determinados processos de soldagem</i> .....	16
<i>Figura 2- Linhas isotermas em um processo de soldagem a arco</i> .....	17
<i>Figura 3- Desenvolvimento das tensões longitudinais durante a soldagem</i> .....	20
<i>Figura 4- Distribuição típica de tensões residuais em uma solda de topo. (a) Sistema de coordenadas e tensões. (b) Tensões longitudinais. (c) Tensões transversais (linha tracejada: distribuição de tensões quando a solda faz parte de uma estrutura e está sujeita a tensões de reação)</i> .....	20
<i>Figura 5- Tipos de distorção</i> .....	22
<i>Figura 6- Deflexão ao longo do eixo longitudinal de um corpo de prova com espessura de 8mm</i> .....	23
<i>Figura 7- Montagem da bancada de ensaios com a utilização de um trailing shield para a injeção de nitrogênio líquido</i> .....	24
<i>Figura 8- Comparativo do perfil de temperaturas para distintas condições de resfriamento</i> .....	25
<i>Figura 9- Condutividade térmica de diferentes gases em função da temperatura</i> .....	26
<i>Figura 10- Entalpia de diferentes gases em função da temperatura</i> .....	27
<i>Figura 11- Calor específico de distintos gases em função da temperatura</i> .....	27
<i>Figura 12- Calor específico para diferentes composições da mistura Argônio- Hidrogênio</i> .....	28
<i>Figura 13- Condutividade térmica para diferentes composições da mistura Argônio- Hidrogênio</i> .....	29
<i>Figura 14- Vista isométrica do projeto do trailing shield em software CAD</i> .....	29
<i>Figura 15- Vista seccionada do projeto do trailing shield em software CAD</i> .....	30
<i>Figura 16- Representação do funcionamento do trailing shield</i> .....	30
<i>Figura 17- Chapas de alumínio usadas na confecção do trailing shield</i> .....	31
<i>Figura 18- Perfil de alumínio usado na confecção do trailing shield</i> .....	32
<i>Figura 19- Malha difusora usada na confecção do trailing shield</i> .....	32
<i>Figura 20- Corpo do trailing shield montado</i> .....	33
<i>Figura 21- Parte frontal do trailing shield usada na fixação do dispositivo</i> .....	33
<i>Figura 22- Trailing shield montado</i> .....	34
<i>Figura 23- Grampo de contato pontual manufaturado (a) e seu projeto CAD (b)</i> .....	34
<i>Figura 24- Representação da atuação do grampo de contato linear no dispositivo</i> .....	35
<i>Figura 25- Sistema de injeção do gás de purga</i> .....	35
<i>Figura 26- Projeto CAD do dispositivo de fixação dos corpos de prova</i> .....	36
<i>Figura 27- Dispositivo de fixação dos corpos de prova manufaturado</i> .....	36
<i>Figura 28- Organograma do trabalho</i> .....	38
<i>Figura 29- Bancada de ensaios</i> .....	39
<i>Figura 30- Detalhe da bancada de ensaios</i> .....	39
<i>Figura 31- Válvula utilizada para controle da vazão do gás de proteção</i> .....	41
<i>Figura 32- Raiz da solda adotada como padrão para estabelecimento dos parâmetros de soldagem</i>	41

<i>Figura 33- Representações do dispositivo no início dos ensaios- no instante anterior à abertura do arco (a) e no instante posterior à abertura do arco (b) .....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 34- Padronização do ensaio com base na superfície de solda.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 35- Padronização de deslocamento do trailing shield no início do ensaio (a) e no fim do ensaio (b).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 36- Padronização do posicionamento dos corpos de prova.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 37- Malha superficial representada em software CAD.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 38- Mapeamento da superfície dos corpos de prova com o auxílio de uma máquina CNC.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 39- Nomenclatura dos vértices dos corpos de prova.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 40- Posicionamento dos corpos de prova na máquina CNC. Alinhamento da aresta transversal 3-4 (a) e alinhamento do vértice 4 (b).....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 41- Determinação da origem do sistema de coordenadas cartesianas.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 42- Segmentos utilizados para caracterização do perfil das distorções.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 43- Perfis de distorção dos ensaios de referência na direção longitude .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 44- Perfil de distorções para o gás auxiliar Ar + 5% H<sub>2</sub> na direção longitude.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 45- Perfil de distorções para o gás auxiliar Ar + 5% H<sub>2</sub> na direção latitude.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 46- Perfil de distorções para o gás auxiliar CO<sub>2</sub> na direção longitude.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 47- Perfil de distorções para o gás auxiliar CO<sub>2</sub> na direção latitude .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 48- Comparação dos perfis de distorção utilizando a mistura Ar + 5% H<sub>2</sub> como gás auxiliar....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 49- Gráfico de superfície tridimensional para as condições que utilizam a mistura Ar + 5% H<sub>2</sub> como gás auxiliar .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 50- Gráfico de superfície bidimensional para as condições que utilizam a mistura Ar + 5% H<sub>2</sub> como gás auxiliar .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 51- Comparação dos perfis de distorção utilizando CO<sub>2</sub> como gás auxiliar .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 52- Gráfico de superfície tridimensional para as condições que utilizam CO<sub>2</sub> como gás auxiliar .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 53- Gráfico de superfície bidimensional para as condições que utilizam CO<sub>2</sub> como gás auxiliar .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 54- Representação das distâncias longitudinais de fixação dos corpos de prova em relação ao centro e às extremidades da chapa.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 55- Comparativo de perfis de distorção entre os ensaios REF e AH20 .....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 56- Comparativo de perfis de distorção entre os ensaios REF e C20.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 57- Comparativo de perfis de distorção entre os ensaios AH20 e C20.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 58- Condutividade térmica de gases no intervalo de temperaturas de 100°C a 500°C.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 59- Condutividade térmica de gases no intervalo de temperaturas de 0K a 12000K.....</i>	<i>67</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1- Nomenclatura dos corpos de prova.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 2- Parâmetros de soldagem.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 3- Distorções dos ensaios REF e AH20 na direção longitude.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 4- Distorções dos ensaios REF e AH20 na direção latitude.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 5- Distorções dos ensaios REF e C20 na direção longitude.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 6- Distorções dos ensaios REF e C20 na direção latitude.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 7- Distorções dos ensaios AH20 e C20 na direção longitude.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 8- Distorções dos ensaios AH20 e REF na direção latitude.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 9- Valor financeiro dos gases estudados.....</i>	<i>67</i>

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

AISI- American Iron and Steel Institute

CAD- Computer Aided Design

CNC- Comando Numérico Computadorizado

GMAW- Gas Metal Arc Welding

IHT- Invert Heat Transfer

LTS- Laboratório de Tecnologia da Soldagem

MIG- Metal Inert Gas

SAW- Submerged Arc Welding

TIG- Tungsten Inert Gas

UFSC- Universidade Federal de Santa Catarina

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\alpha$ - Coeficiente de dilatação térmica [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$  ou  $\text{K}^{-1}$ ]  
 $\Delta l$ - Variação do comprimento inicial da peça [mm]  
 $\Delta T$ - Variação de temperatura na peça [ $^{\circ}\text{C}$  ou K]  
 $\eta$  térmico – Rendimento térmico  
 $\sigma_x$ - Tensão residual longitudinal na peça [MPa]  
 $\sigma_{YS}$ - Limite de escoamento do material [Mpa]  
Ar- Argônio  
 $\text{CO}_2$  – Dióxido de carbono  
E- Módulo de elasticidade do material [GPa]  
 $\text{H}_2$  – Hidrogênio  
I- Corrente de soldagem [A]  
k- Condutividade térmica do material [ $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ]  
 $\text{N}_2$  – Nitrogênio  
U- Tensão de soldagem [V]  
 $V_s$  – Velocidade de soldagem [mm/s]

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
1.1. Objetivos .....	13
1.1.1. Objetivo Geral .....	13
1.1.2. Objetivos Específicos.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1. Soldagem a arco elétrico.....	15
2.2. Tensões residuais .....	18
2.3. Distorções.....	21
2.4. Técnicas desenvolvidas para mitigar o efeito das distorções .....	22
3. DESENVOLVIMENTO.....	25
3.1. Proposta de técnica para reduzir o efeito das distorções.....	25
3.2. Desenvolvimento de um <i>trailing shield</i> .....	29
3.3. Desenvolvimento de um dispositivo de fixação dos corpos de prova .....	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	37
4.1. Metodologia .....	37
4.2. Bancada de ensaios.....	38
4.3. Ensaios.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
6. CONCLUSÕES.....	69
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	70
REFERÊNCIAS.....	71

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Moura (2011), o segmento náutico no Brasil iniciou-se com a origem de pequenos estaleiros. Apenas entre as décadas de 1970 e início de 1980, o setor começa a ganhar ares mais sólidos para consolidação desse mercado no cenário nacional. Neste período, inicia-se a fabricação profissional das embarcações por estaleiros especializados, assim como empresas que abasteciam o mercado de insumos e acessórios.

O crescimento vertiginoso desse segmento é evidenciado na década de 1990 como consequência da abertura do mercado nacional. No início, tal segmento inseriu-se na avaliação das melhores práticas de processos, produtos e tecnologias internacionais empregadas no setor náutico mundial, com isso, várias adaptações foram implantadas por fabricantes nacionais que contribuíram para a evolução do setor e aumento da competitividade dos produtos frente aos produtos importados. (MOURA, 2011).

Segundo o Ministério do Turismo (BRASIL, 2008), o Brasil possui um litoral com 7.367 quilômetros de extensão, 35.000 quilômetros de vias internas navegáveis e 9.260 quilômetros de margens de reservatórios de água doce, que abrangem lagos de hidrelétricas, lagos e lagoas naturais, tornando o país extremamente propício à navegação. De acordo com a Associação Brasileira dos Construtores de Barcos e Seus Implementos (ACOBAR, 2005), a capitania dos portos registra a existência de mais de 200 mil barcos de recreio no país. Muitas embarcações construídas no Brasil ainda têm como destino a exportação para portos europeus. Neste contexto, ainda segundo a ACOBAR, Santa Catarina é o segundo maior polo náutico do país, com 21% do total de estaleiros em operação, com crescimento entre 10% e 20% ao ano, e grande potencial para alcançar São Paulo, que é o principal polo náutico do Brasil, com 35% dos estaleiros em operação. Além disso, segundo Catarina (2017), o setor náutico nacional pode gerar cerca de 7.400 empregos diretos e indiretos por cada 1.000 embarcações construídas.

Neste contexto, é imprescindível que os estaleiros atinjam excelência em seus processos de fabricação, de forma a assegurar a competitividade no segmento. Segundo a Associação Brasileira de Aço Inoxidável (ABINOX, 2013), cerca de 90%

das peças metálicas empregadas na indústria náutica são de aço inoxidável, visto as diversas propriedades do material propícias a tal aplicação. Dentre estas propriedades, pode-se citar a alta resistência à corrosão, facilidade de conformação e união e baixo custo de manutenção, além das características de forte apelo visual, como baixa rugosidade superficial, assegurando praticidade na limpeza e aparência brilhante.

Visto a relevância de tal aço para a indústria náutica, é fundamental que a união entre os mesmos seja de qualidade satisfatória, pois além de comprometer a integridade estrutural de alguns elementos, também pode inutilizar os mesmos por fins estéticos. Durante o processo de soldagem de chapas deste aço é necessário que haja certa cautela a fim de evitar problemas que podem danificar o produto final. Um dos problemas relacionado ao processo é a distorção do metal proveniente do elevado gradiente térmico gerado pela adição de calor, resultante do arco voltaico.

Recentemente, alguns pesquisadores desenvolveram determinadas técnicas para a redução de tal efeito. Uma destas técnicas baseia-se na injeção de um fluido através de um dispositivo acoplado à tocha de soldagem (*trailing shield*). O dispositivo consiste em um agente de remoção de calor de baixa temperatura e utiliza como fonte dissipadora o jato de água atomizada, jato de nitrogênio líquido ou dióxido de carbono sólido pulverizado. Entretanto, estas fontes são de difícil obtenção em função do seu custo, ou disponibilidade comercial na forma como qual deve ser utilizada. Em função disso, é de interesse comum a avaliação de materiais para uso como fontes dissipadoras mais acessíveis.

## 1.1. **Objetivos**

### 1.1.1. **Objetivo Geral**

Com base no exposto acima, o presente trabalho objetiva uma investigação acerca da influência da aplicação de gases auxiliares mais acessíveis em chapas finas de aço inoxidável, no instante logo após a soldagem utilizando o processo TIG, com respeito à redução das distorções provenientes deste processo de fabricação.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver um dispositivo capaz de injetar os gases auxiliares na região da soldagem (*trailing shield*);
- Analisar os resultados em termos da potencialidade dos gases auxiliares em relação à mitigação das distorções;
- Avaliar a influência do fluxo dos gases em relação à distorção

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda os princípios das distorções causadas por processos de soldagem, de forma a caracterizar as mesmas, identificando os tipos de distorções, as causas de incidência, consequências para a peça, além dos métodos já existentes para a mitigação de tal problema, bem como a justificativa para o emprego da técnica sugerida, através de uma revisão de literatura.

### 2.1. Soldagem a arco elétrico

Na soldagem, o arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada para a fusão de materiais metálicos (MARQUES et. al, 2005), pois possui uma concentração de energia adequada para promover a fusão local do metal a ser soldado, além de proporcionar facilidade no controle da energia gerada e possuir um custo relativamente baixo do equipamento. O arco voltaico é capaz de gerar energia em função de dois parâmetros elétricos fundamentais: corrente e tensão. Segundo Scotti (2008), a energia de soldagem é a relação entre a potência elétrica que mantém o arco e a velocidade de soldagem. Tal relação pode ser estimada através da Equação 1.

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

Onde:

U= Tensão do arco elétrico

I= Corrente de soldagem

V<sub>s</sub>= Velocidade de soldagem

Além disso, segundo Wainer et al. (1992), a transferência de energia através do arco voltaico não ocorre com eficiência total. De tal forma, somente uma parcela

desta energia é realmente entregue à peça de trabalho de modo a fundir o material, denominada de calor imposto, o qual depende do rendimento térmico do processo de solda utilizado. A estimativa do calor imposto é realizada a partir da energia de soldagem, como mostra a Equação 2.

$$CI = \frac{\Sigma(U*I)}{V_s} * \eta_{térmico} \quad (2)$$

De acordo com Modenesi (2001), o rendimento térmico depende do processo e das condições de soldagem empregados. Tal rendimento é, em geral, medido através de métodos baseado em calorimetria. A Figura 1 apresenta as faixas de rendimentos térmicos aproximados para determinados processos de soldagem.

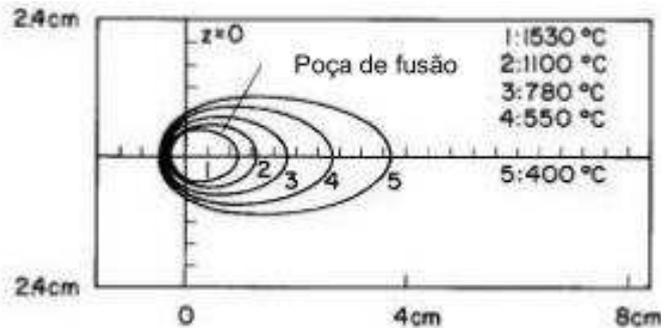
Figura 1- Rendimentos térmicos para determinados processos de soldagem

Processo	Rendimento Térmico ( $\eta$ )
Arco Submerso (SAW)	0,85 - 0,98
MIG/MAG (GMAW)	0,75 - 0,95
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,70 - 0,90
TIG (CC-) (GTAW)	0,50 - 0,80
TIG (CC+) (GTAW)	0,20 - 0,50
Laser (LBW)	0,005 - 0,70

Fonte: MODENESI (2001)

Segundo Murphy (2018), o elevado gradiente radial de temperaturas do arco promove uma condução de calor na direção radial do material. Tal fenômeno representa o fluxo de calor que propaga linhas isotermas ao longo do material. Estas curvas isotermas são obtidas através da equação do fluxo de calor apresentado por Rosenthal (1941). A Figura 2 apresenta as linhas isotermas de um processo com energia de 768 J/cm, características de um processo de soldagem na superfície da peça de trabalho.

Figura 2- Linhas isotermas em um processo de soldagem a arco



Fonte: Kou (2003)

As equações propostas por Rosenthal (1941) são válidas apenas para um estado quasi-estacionário. Neste caso, supõe-se que a distribuição de temperaturas se mantém inalterada para um sistema de coordenadas que se move junto com a fonte de calor, tornando o problema independente do tempo. Além disso, devido a simplificações que são adotadas, as soluções obtidas fornecem apenas uma representação aproximada da distribuição da temperatura em uma solda.

O modelo de Rosenthal (1941) foi utilizado e modificado por diversos autores. Wells (1952), por exemplo, simplificou a equação para soldagem de chapas finas com penetração total para obter a largura do cordão, e Adams (1958) calculou a distribuição de temperaturas máximas na peça. De tal forma, a temperatura de pico atingida em um determinado ponto, para uma solda com penetração total, pode ser estimada conforme a Equação 3.

$$T_p = T_0 + \left(\frac{2}{\pi e}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{Hl}{2\rho c h y} \quad (3)$$

Onde:

$T_p$  = Temperatura de pico atingida no material

$T_0$  = Temperatura ambiente

$Hl$  = Energia de soldagem

$\rho$  = Massa específica do material

$c$  = Calor específico do material

$h$  = Espessura da peça

$y$  = Distância considerada do ponto de fusão

Durante o processo de soldagem a temperatura na região do material de base, próxima ao arco, é muito elevada, ao passo que em regiões mais distantes da junta soldada o material permanece com temperaturas bem inferiores. Além disso, a temperatura de soldagem também pode sofrer variações temporais durante o processo. De tal forma, a distribuição de temperatura no metal não é homogênea, gerando um gradiente térmico com intensas variações de temperaturas, o qual pode acarretar no desenvolvimento de tensões térmicas no metal de base, causando distorções. (TSENG, 2013).

## 2.2. Tensões residuais

Tensões residuais são aquelas que permanecem no material quando todas as solicitações externas são removidas. Essas tensões também chamadas de tensões internas, aparecem frequentemente em materiais submetidos a diferentes processamentos térmicos ou mecânicos, entre eles: soldagem, usinagem, laminação, forjamento, fundição e dobramento. (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1987).

O aparecimento destas tensões está relacionado às expansões e contrações físicas do material, as quais estão associadas à ocorrência de deformação plástica não uniforme por efeitos térmicos. (MODENESI, 2001). Quando um material sofre uma variação térmica, suas dimensões se modificam proporcionalmente à variação de temperatura, conforme indicado na Equação 4.

$$\Delta l = l - l_0 = l_0 * \alpha * \Delta T \quad (4)$$

Onde:

$l$ =Comprimento final da peça [mm]

$l_0$ = Comprimento inicial da peça [mm]

$\alpha$ = Coeficiente de dilatação térmica [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

$\Delta T$ = Variação da temperatura na peça [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Logo, quando um material é aquecido e existem restrições às suas variações dimensionais, tais tensões residuais podem surgir no material. As tensões podem ser benéficas ou malélicas, dependendo de sua natureza, intensidade e distribuição. Em relação à sua natureza, as tensões residuais podem ser trativas ou compressivas. (MODENESI, 2001).

As tensões trativas podem atuar nocivamente ou de modo indiferente. Em uma situação em que a peça seja submetida a esforços mecânicos cíclicos de tração, pode ocorrer a liberação de discordâncias ancoradas, facilitando a movimentação, nucleação e propagação de trincas, levando o material à falha prematura. Já as tensões compressivas irão contrapor as linhas de escorregamento, dificultando a nucleação e/ou propagação de trincas. (SOUZA, 2012).

Segundo Modenesi (2001), a distribuição de tensões residuais em um componente soldado é afetada por diversos fatores, incluindo as características do metal de base e da solda (à temperatura ambiente e a altas temperaturas), a geometria da junta soldada e sua união com outros componentes e às condições de soldagem.

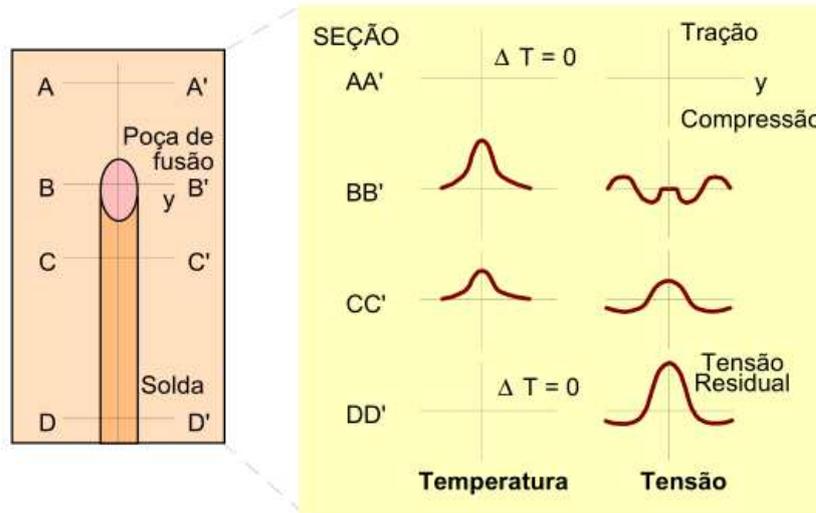
Masubuchi (1980) desenvolveu uma fórmula empírica para descrever a distribuição das tensões residuais longitudinais e transversais em uma solda de topo, conforme a Equação 5.

$$\sigma_x = \sigma_m * [1 - (y/b)^2] * e^{-0,5*(y/b)^2} \quad (5)$$

No qual  $b$  é a largura do pico de tensões de tração e depende das condições de soldagem e do material, enquanto  $\sigma_m$  é a tensão máxima no centro da solda, cujo valor é, em geral, próximo do limite de escoamento do material.

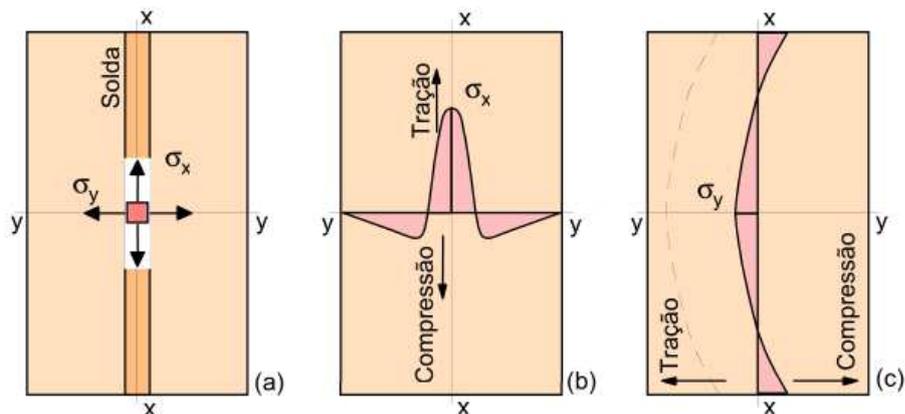
Um padrão típico de tensões residuais macroscópicas longitudinais e transversais encontrado em chapas finas pode ser visualizado nas Figuras 3 e 4. O valor máximo de tensão trativa ocorre sobre o cordão de solda, ao passo que há uma redução deste valor na medida em que se afasta do cordão até que a tensão se torne compressiva, para manter o equilíbrio dos carregamentos internos. (COFIÑO, 2010).

Figura 3- Desenvolvimento das tensões longitudinais durante a soldagem



Fonte: Modenesi (2001, p. 8)

Figura 4- Distribuição típica de tensões residuais em uma solda de topo. (a) Sistema de coordenadas e tensões. (b) Tensões longitudinais. (c) Tensões transversais (linha tracejada: distribuição de tensões quando a solda faz parte de uma estrutura e está sujeita a tensões de reação)



Fonte: Adaptado de Modenesi (2001, p. 9)

A distribuição de tensões residuais transversais (Figura 4c) é caracterizada, em soldas isoladas, por valores menores de tensões. Contudo, quando a solda faz parte de uma estrutura incluindo outros componentes e soldas, tensões de reação tendem a se somar às tensões de origem térmica, resultando em maiores valores de

tensões residuais, como pode ser visto na linha tracejada da Figura 4c. (MODENESI, 2001).

De acordo com Mandal (2009), estruturas soldadas tendem a apresentar uma distribuição complexa de tensões residuais, que pode ser caracterizada, na região da solda, em duas (ou três) dimensões. Esse estado de tensão tende a dificultar a deformação plástica da região da solda, podendo favorecer o desenvolvimento de rupturas localizadas (trincas) nessa região, quando apresenta baixa ductilidade ou quando a estrutura é colocada em um ambiente agressivo e/ou submetida a solicitações severas.

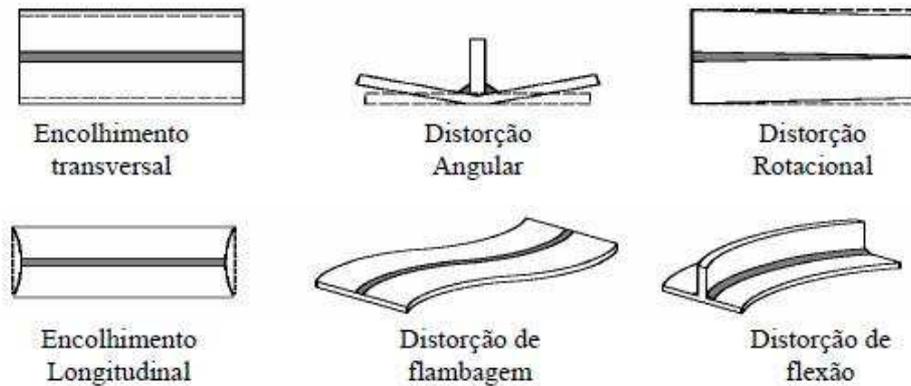
### **2.3. Distorções**

Quando a tensão residual atinge o limite de escoamento do material, o mesmo passa a se deformar plasticamente, dando origem às distorções. Segundo Modenesi (2001), as distorções são sempre opostas e, em geral, da mesma ordem de grandeza do movimento de material que ocorre durante a soldagem. Como as mesmas são resultantes da variação de energia térmica no material, a magnitude das distorções depende das propriedades térmicas e mecânicas do mesmo, tais como o coeficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ ), a condutividade térmica ( $k$ ), o limite de escoamento ( $\sigma_{YS}$ ) e o módulo de elasticidade ( $E$ ).

De tal forma, as distorções são favorecidas pela baixa condutividade térmica e alto coeficiente de dilatação térmica. Além disso, grandes limites de escoamento também contribuem para o aumento do grau das distorções, enquanto materiais com maiores módulos de elasticidade tendem a resistir mais aos efeitos das mesmas. (ERICSSON, 1987).

Masubuchi (1980) classificou as distorções em seis categorias, como indicado na Figura 5.

Figura 5- Tipos de distorção



Fonte: Amaral (2005, p. 3)

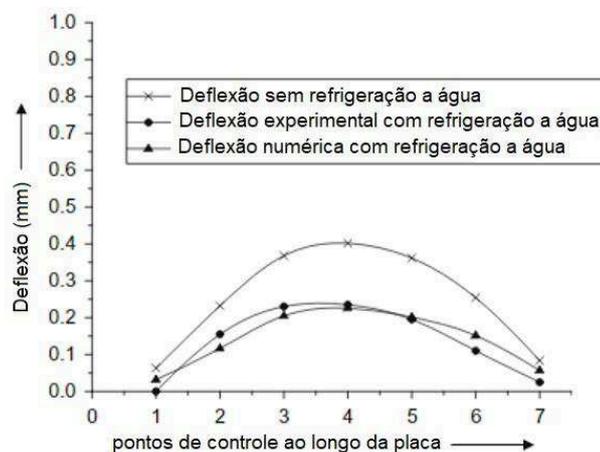
Tais distorções podem ocasionar a redução da capacidade de carga estática, redução da resistência à fadiga, e provocar o desalinhamento das peças unidas (SHEN, 2013). Existem diversos fatores que podem causar distorções em chapas metálicas, tais como manufatura, transporte e armazenamento. Mas o principal causador, e foco do presente trabalho, é o processo de soldagem, associado às características térmicas de fabricação.

#### 2.4. Técnicas desenvolvidas para mitigar o efeito das distorções

Tendo em vista que as deformações provenientes do processo de soldagem são produzidas devido às altas taxas de aquecimento no material alguns pesquisadores realizaram análises voltadas à redução do gradiente térmico. Mochizuki (2006), por exemplo, investigou o efeito da distorção angular proveniente do processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) em uma solda de topo com um aquecimento do lado oposto da chapa através do arco gerado por uma tocha TIG. A proposta de tal trabalho baseou-se na ideia de que um aquecimento reverso na chapa induziria uma distorção no sentido oposto da mesma, de tal forma que o efeito global das distorções fosse minimizado. O autor conseguiu demonstrar que as distorções são influenciadas, e podem ser minimizadas com a alteração da distância longitudinal entre as tochas MIG e TIG e do aporte de calor da tocha TIG no lado reverso da chapa, além da extensão da área de aquecimento da tocha TIG.

Outra técnica desenvolvida para a mitigação das distorções direcionada à redução do gradiente térmico é baseada na dissipação do calor na região de soldagem. Adak (2010), por exemplo, investigou a ação de dissipadores de calor através de canais de refrigeração à água espaçados à 30 mm do cordão de solda e paralelos ao mesmo. O autor, que avaliou a soldagem de arco submerso (SAW) em chapas de aço carbono com 8 mm de espessura, obteve como resultado uma redução significativa da deflexão dos corpos de prova resultante do processo de soldagem, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6- Deflexão ao longo do eixo longitudinal de um corpo de prova com espessura de 8mm



Fonte: Adaptado de Adak (2010)

Com o intuito de compreender o comportamento do nitrogênio como gás de proteção no tocante à distorção angular, Tseng et al. (2003), estudaram a influência do gás Ar+N<sub>2</sub> nas concentrações Ar puro, Ar + 2,5% N<sub>2</sub>, Ar + 7,5% N<sub>2</sub>, Ar + 10% N<sub>2</sub> e Ar + 15% N<sub>2</sub> com vazão fixa de 20l/min. A conclusão de tal análise é de caráter oposto ao que se deseja na proposta deste trabalho, sendo que a distorção angular se agrava na medida em que se aumenta a concentração do nitrogênio no gás de proteção. Como resultado, foi obtido que tal fenômeno se deve ao aumento da quantidade de calor de entrada adicionado ao metal de base, característica decorrente da condutividade térmica do gás. Tal fenômeno já era esperado, pois o gás N<sub>2</sub> possui alta condutividade térmica, e quando utilizado como gás de proteção, produz maiores aportes de calor, tendendo a provocar maiores gradientes térmicos e, conseqüentemente, maiores deformações.

Seguindo a linha da transferência de calor, Sudheesh et al. (2015) resolveram investigar a ação do nitrogênio agindo como um dissipador de calor na região do cordão de solda, visto as propriedades térmicas adequadas do mesmo para a aplicação. Para tanto, os mesmos desenvolveram um *trailing shield*, dispositivo capaz de injetar nitrogênio líquido para resfriar o cordão de solda, utilizando a técnica da Transferência de Calor Inversa (IHT). A Figura 7 demonstra a aplicação da técnica durante os experimentos realizados.

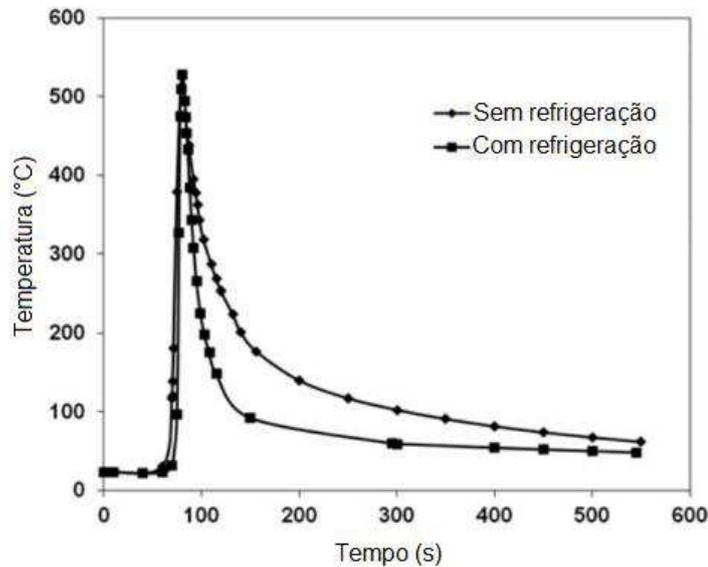
Figura 7- Montagem da bancada de ensaios com a utilização de um *trailing shield* para a injeção de nitrogênio líquido



Fonte: Sudheesh (2015)

Os autores obtiveram resultados significativos para a dissipação do calor na região, conforme observado na Figura 8. Tal Figura apresenta a taxa de resfriamento da superfície do corpo de prova em função do tempo para a condição em que é utilizado o *trailing shield* como agente dissipador de calor e a condição sem a utilização do mesmo, com um termopar espaçado à 5mm do cordão de solda.

Figura 8- Comparativo do perfil de temperaturas para distintas condições de resfriamento



Fonte: Adaptado de Sudheesh (2015)

### 3. DESENVOLVIMENTO

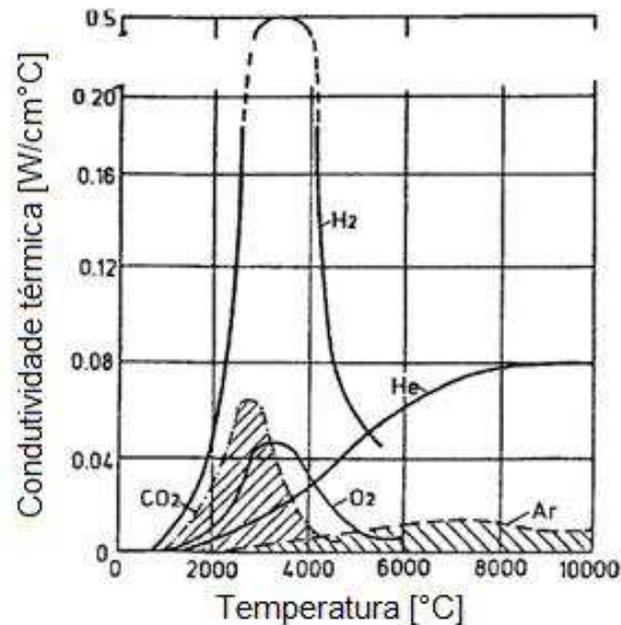
#### 3.1. Proposta de técnica para reduzir o efeito das distorções

Embora a técnica proposta por Sudheesh et al. (2015) tenha sido eficaz, a dificuldade em trabalhar com elementos em temperaturas muito baixas fomenta o desenvolvimento de novos estudos, visando maior viabilidade e praticidade de operação. Com base em tais informações, a proposta deste trabalho se baseia em aplicar gases com diferentes valores de condutividade térmica em temperatura ambiente sobre o cordão de solda imediatamente solidificado e analisar a eficácia dos mesmos quanto à redução das distorções.

As Figuras 9, 10 e 11 evidenciam a relevância do gás hidrogênio considerando suas propriedades térmicas quando comparado a outros gases utilizados em misturas de gases de proteção. A condutividade térmica do hidrogênio na faixa de temperaturas entre 3000K e 4500K, intervalo que geralmente prevalece na poça de fusão e na

periferia do arco, é maior que todos os gases analisados, além de ser quase dez vezes maior que a condutividade térmica do argônio. (LOWKE et al., 1997).

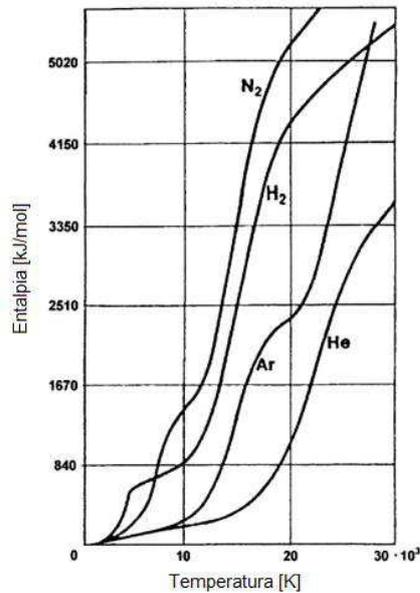
Figura 9- Condutividade térmica de diferentes gases em função da temperatura



Fonte: Adaptado de Suban (2001, p. 194)

A entalpia do hidrogênio também é superior à de todos os outros gases analisados por Suban (2001) em quase todo o intervalo de temperaturas atingidas no arco de soldagem, de modo que o hidrogênio é capaz de armazenar grande quantidade de energia térmica antes de dissipar a mesma para atmosfera, conforme indicado na Figura 10.

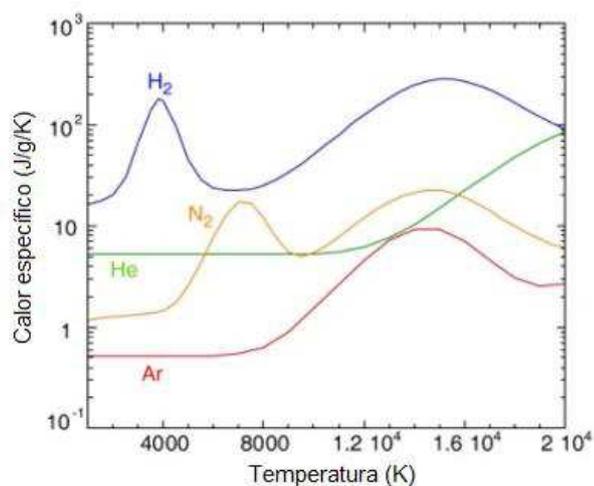
Figura 10- Entalpia de diferentes gases em função da temperatura



Fonte: Adaptado de Suban (2001, p. 194)

Outra propriedade importante no mecanismo de transferência de calor é o calor específico, representado na Figura 11. Em tal figura também é notória a superioridade do hidrogênio, de forma que o gás precise de uma energia maior para elevar sua temperatura.

Figura 11- Calor específico de distintos gases em função da temperatura



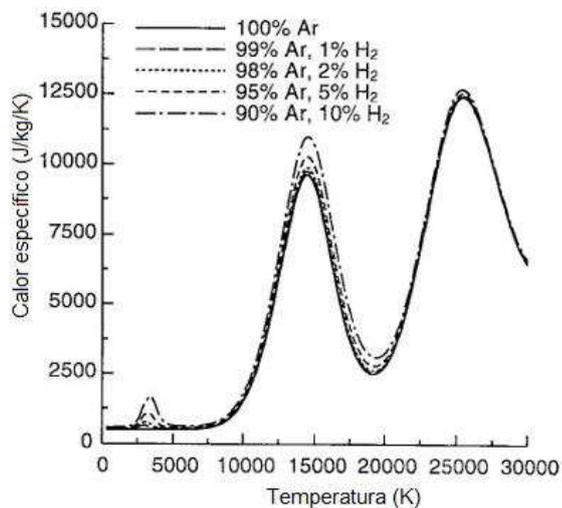
Fonte: Adaptado de Tanaka (2008, p. 226)

Dadas as propriedades térmicas do gás hidrogênio, a ideia de analisar tal gás como alternativa para reduzir as distorções provenientes de fontes de calor, torna-se

evidente, de forma que, a priori, o mesmo possui competência para a dissipação do calor contida na peça de trabalho.

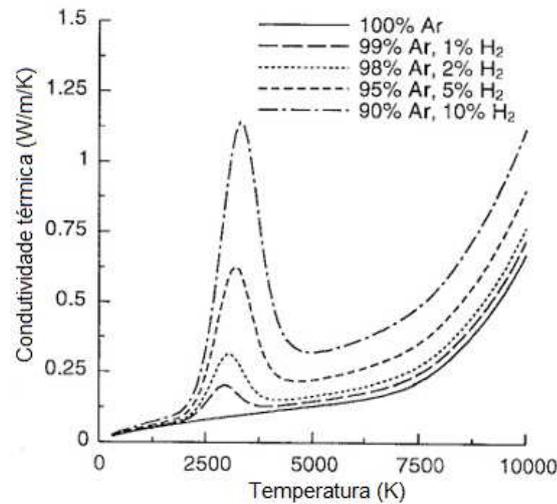
Por ser um gás inflamável (ponto de ignição próximo a 833K), o hidrogênio é geralmente comercializado em pequenas proporções (entre 1-10%) junto ao gás argônio. Portanto, as propriedades térmicas da composição sofrem algumas alterações, sendo que a mistura possui propriedades térmicas maiores de forma proporcional ao aumento da fração do gás hidrogênio contido na mesma, como evidenciado nas Figuras 12 e 13.

Figura 12- Calor específico para diferentes composições da mistura Argônio-Hidrogênio



Fonte: Adaptado de Lowke (1997, p. 926)

Figura 13- Condutividade térmica para diferentes composições da mistura Argônio-Hidrogênio



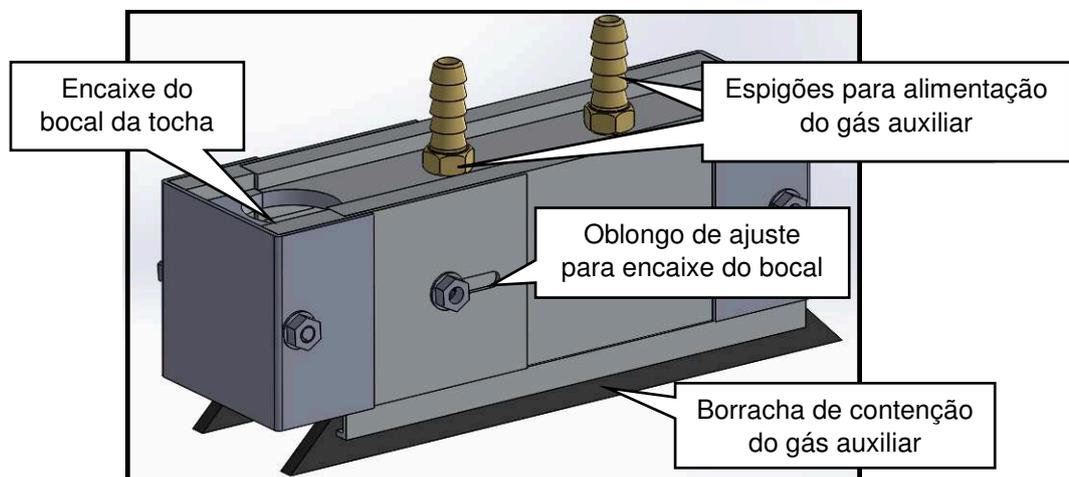
Fonte: Lowke (1997, p. 926)

### 3.2. Desenvolvimento de um *trailing shield*

Para a concepção do *trailing shield* foi desenvolvido um projeto em software CAD (*Computer Aided Design*), o qual teve como premissas a capacidade de injetar misturas gasosas na região do cordão de solda adjacente a poça de fusão e a praticidade de fabricação e operação.

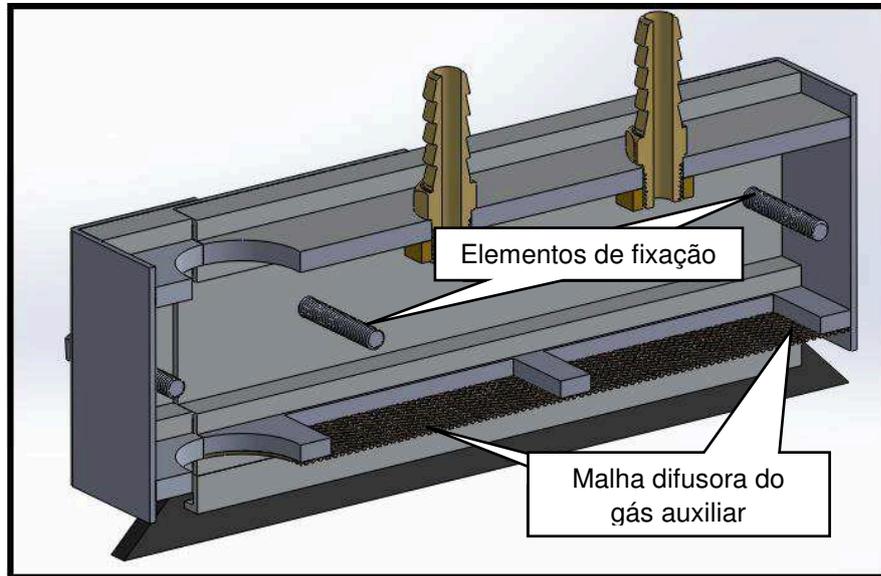
O projeto CAD do dispositivo desenvolvido pode ser visto nas Figuras 14 e 15.

Figura 14- Vista isométrica do projeto do *trailing shield* em software CAD



Fonte: O Autor (2019)

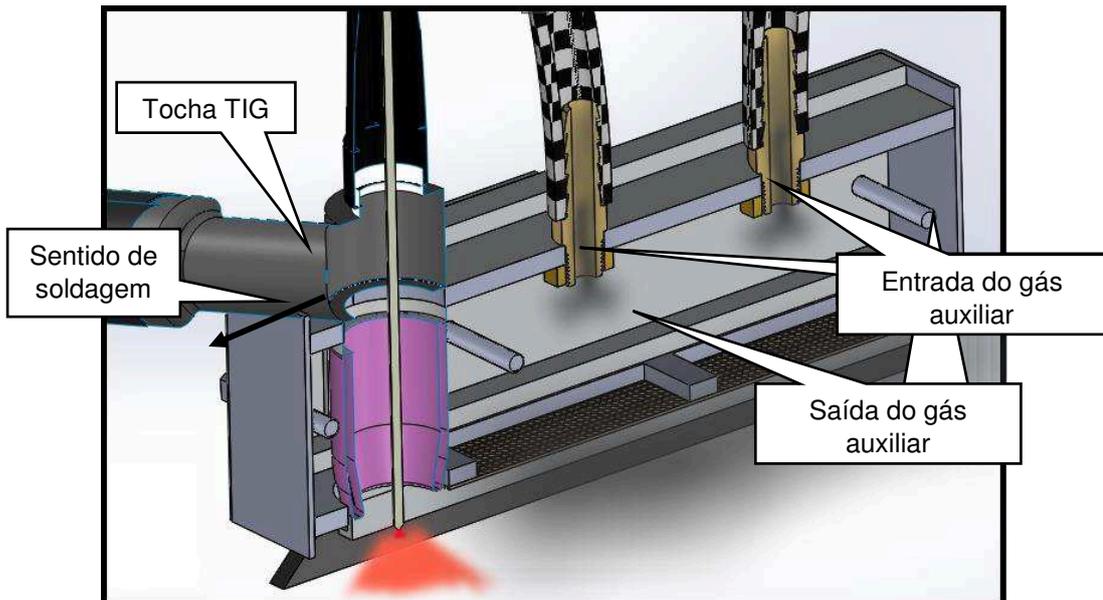
Figura 15- Vista seccionada do projeto do *trailing shield* em software CAD



Fonte: O Autor (2019)

A Figura 16 apresenta o funcionamento do *trailing shield* acoplado à tocha TIG.

Figura 16- Representação do funcionamento do *trailing shield*



Fonte: O Autor (2019)

Para a manufatura do *trailing shield*, utilizou-se chapas de alumínio, uma malha difusora de aço inoxidável, perfis de alumínio comerciais, espigões de cobre, e elementos de fixação (barras roscadas, porcas e arruelas). Todo o processo de fabricação e montagem foi manual e realizado no LTS. Além disso, foram utilizadas borrachas de contenção nas laterais do dispositivo, de forma a evitar o escoamento dos gases através destas regiões. As borrachas utilizadas suportam uma temperatura de pico de até 250°C, fator que garantiu a depreciação relativamente baixa do material durante os experimentos.

O corpo do dispositivo foi confeccionado a partir das chapas e perfis de alumínio. As chapas foram utilizadas para a fixação do bocal da tocha, dos espigões e da malha difusora do gás. Para tanto, foram furadas e cortadas conforme a Figura 17.

Figura 17- Chapas de alumínio usadas na confecção do *trailing shield*



Fonte: O Autor (2019)

Os perfis de alumínio possuem a função de sustentar as chapas de alumínio, de modo a garantir um volume de gás adequado dentro do dispositivo, além de fixar a borracha de contenção dos gases na parte inferior do *trailing shield*, a qual evita o escoamento dos gases pelas laterais. Para tanto, os perfis foram cortados e furados conforme a Figura 18.

Figura 18- Perfil de alumínio usado na confecção do *trailing shield*



Fonte: O Autor (2019)

A malha difusora possui a função de promover um escoamento laminar do fluido em direção ao corpo de prova, reduzindo possíveis turbulências geradas no interior do mesmo. A Figura 19 apresenta a malha cortada nas dimensões do *trailing shield*.

Figura 19- Malha difusora usada na confecção do *trailing shield*



Fonte: O Autor (2019)

A Figura 20 apresenta o corpo do *trailing shield* manufaturado e montado.

Figura 20- Corpo do *trailing shield* montado



Fonte: O Autor (2019)

Para fixar o dispositivo no bocal da tocha de soldagem, a peça de encaixe do *trailing shield* foi fabricada com os mesmos perfis e chapas de alumínio, conforme pode-se visualizar na Figura 21.

Figura 21- Parte frontal do *trailing shield* usada na fixação do dispositivo



Fonte: O Autor (2019)

A Figura 22 exibe o dispositivo completo montado.

Figura 22- *Trailing shield* montado



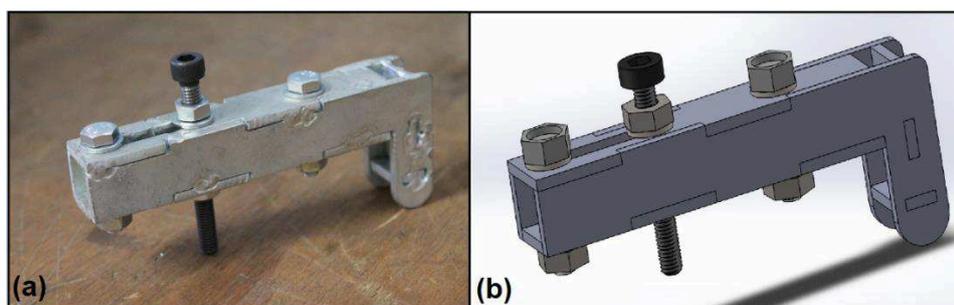
Fonte: O Autor (2019)

### 3.3. Desenvolvimento de um dispositivo de fixação dos corpos de prova

O dispositivo de fixação dos corpos de prova foi desenvolvido com a premissa de garantir uma fixação adequada das chapas ensaiadas, de modo a garantir a mínima interferência possível na deformação das mesmas devido à expansão térmica ocorrida durante os ensaios.

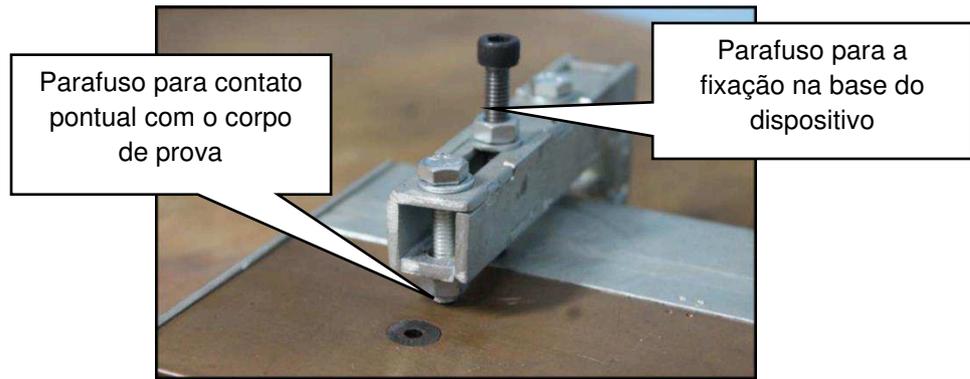
A fim de garantir a fixação adequada com o mínimo de interferência no deslocamento dos corpos de prova foram desenvolvidos grampos de fixação que possuem contato pontual com a peça de trabalho como pode ser visto nas Figuras 23 e 24.

Figura 23- Grampo de contato pontual manufaturado (a) e seu projeto CAD (b)



Fonte: O Autor (2019)

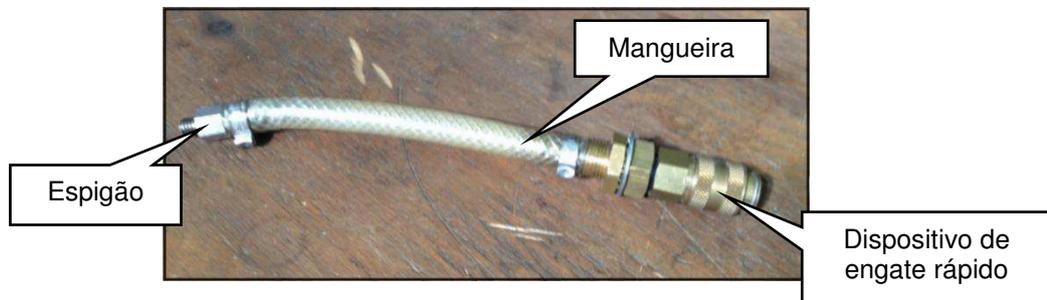
Figura 24- Representação da atuação do grampo de contato linear no dispositivo



Fonte: O Autor (2019)

O dispositivo também foi projetado de forma a garantir que a raiz do cordão de solda fosse protegida, através da injeção de um gás de purga na região da mesma. Para a injeção do gás de purga, um espigão foi fixado na base do dispositivo junto à uma mangueira e um dispositivo de engate rápido, como pode ser visto na Figura 25.

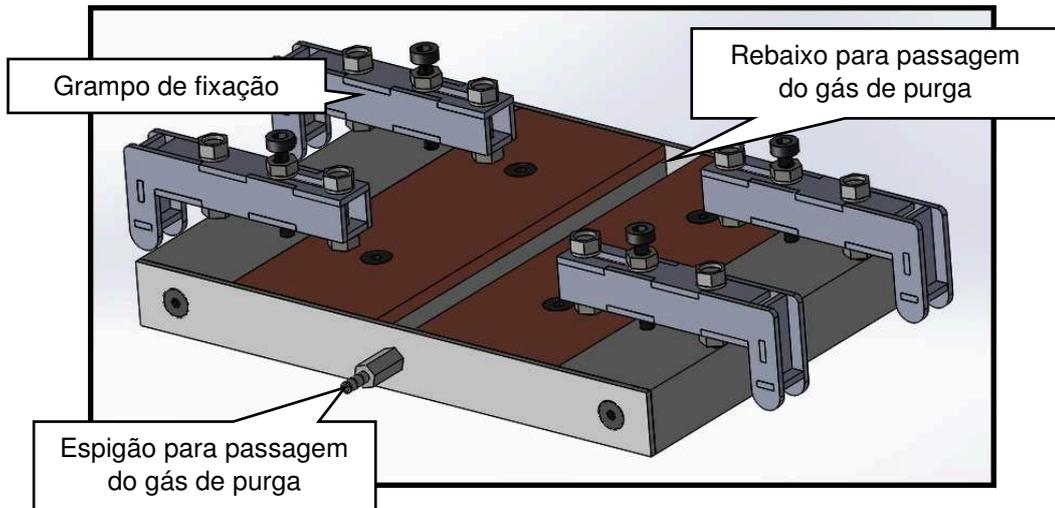
Figura 25- Sistema de injeção do gás de purga



Fonte: O Autor (2019)

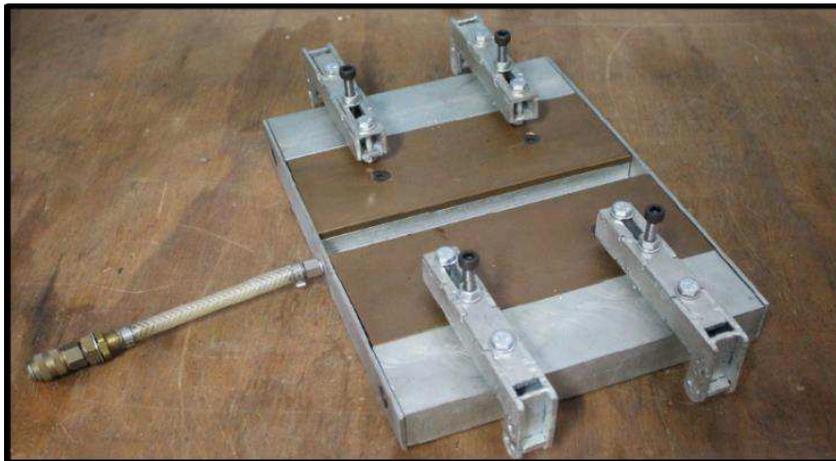
As Figuras 26 e 27 apresentam o dispositivo de fixação via projeto CAD e manufaturado, respectivamente.

Figura 26- Projeto CAD do dispositivo de fixação dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2019)

Figura 27- Dispositivo de fixação dos corpos de prova manufacturado



Fonte: O Autor (2019)

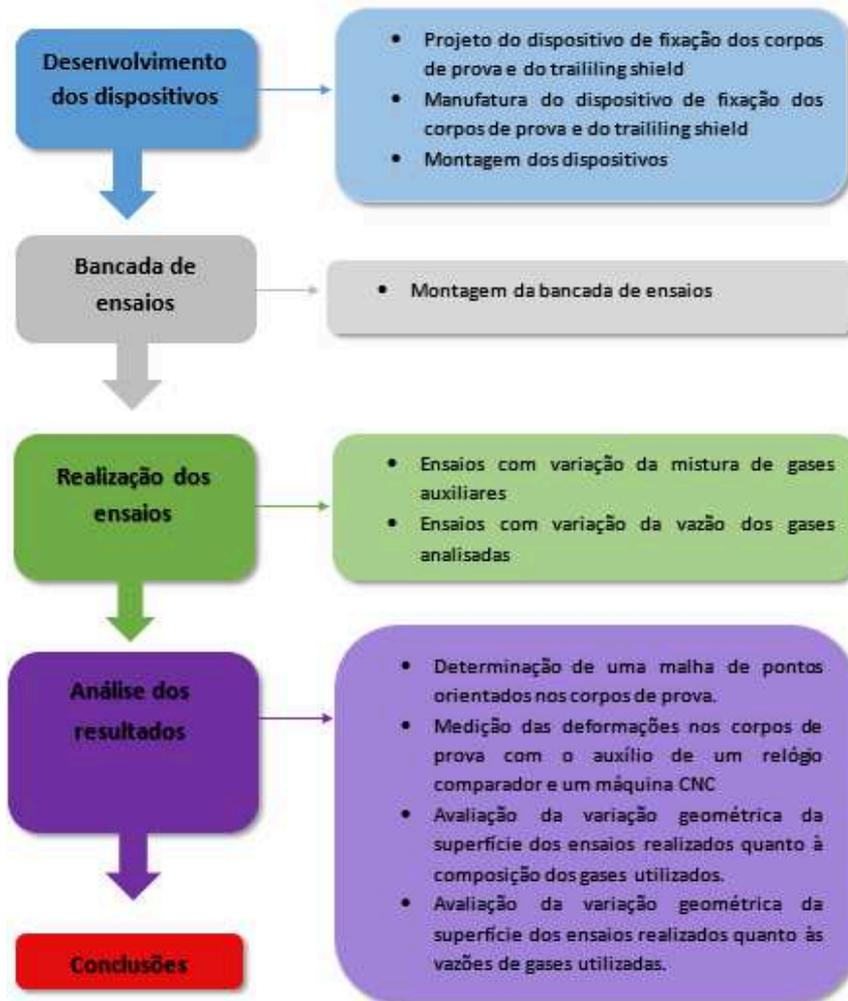
## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Seguindo o escopo de uma pesquisa experimental, neste capítulo serão descritos a metodologia e o planejamento empírico empregados neste trabalho, além da descrição do aparato experimental, bem como os ensaios realizados.

### **4.1. Metodologia**

Com a finalidade de atingir os objetivos propostos neste trabalho, o mesmo foi estruturado em 5 etapas, as quais constituem outras sub-etapas. Sendo assim, para um entendimento mais eficaz da estruturação do trabalho, a Figura 28 contempla o organograma sintetizado das atividades realizadas.

Figura 28- Organograma do trabalho

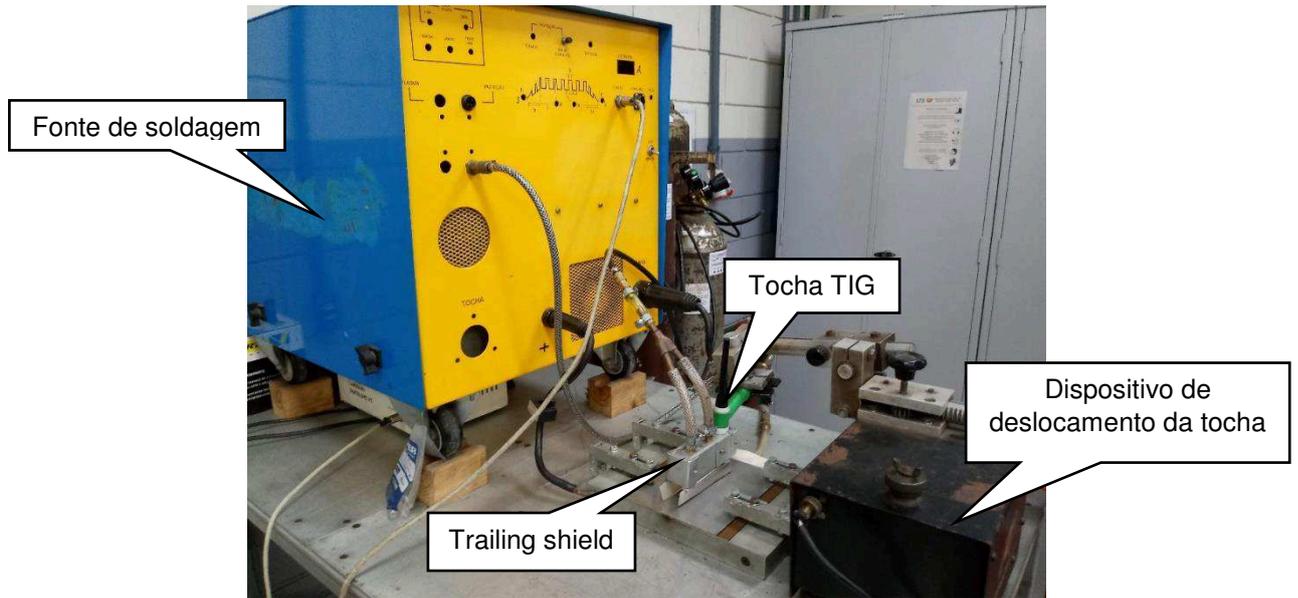


Fonte: O Autor (2019)

#### 4.2. Bancada de ensaios

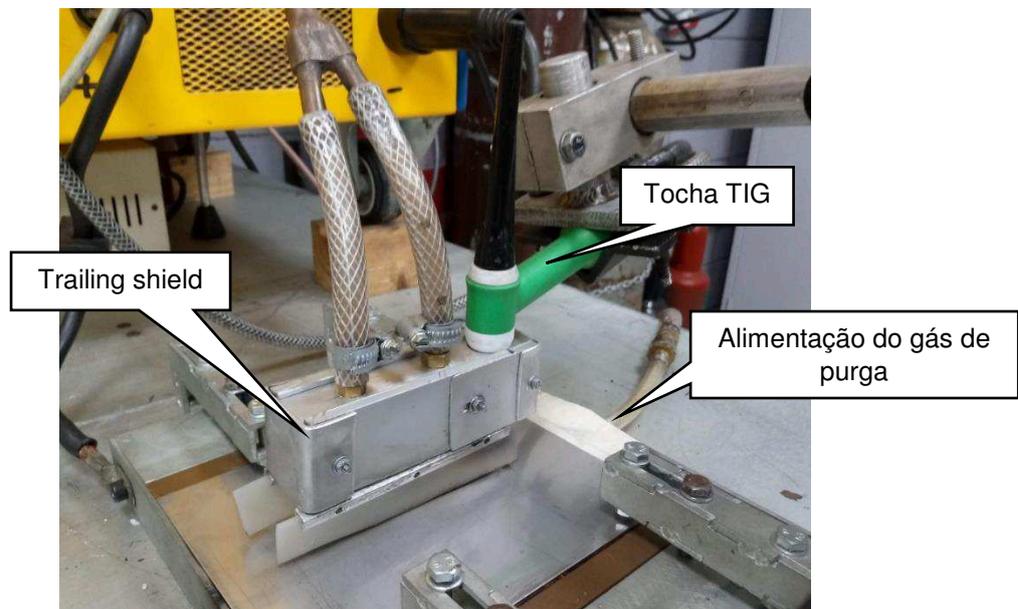
A bancada de ensaios montada no laboratório constituiu de uma fonte de soldagem, uma tocha de soldagem TIG, um sistema de deslocamento da tocha, um dispositivo de fixação dos corpos da prova e o *trailing shield*. Tais equipamentos e dispositivos podem ser visualizados nas Figuras 29 e 30.

Figura 29- Bancada de ensaios



Fonte: O Autor (2019)

Figura 30- Detalhe da bancada de ensaios



Fonte: O Autor (2019)

### 4.3. Ensaios

Os corpos de prova utilizados nos experimentos são de aço inoxidável austenítico (AISI 304), o mesmo empregado na construção náutica, na fabricação de

itens como guarda- mancebos, cunhos para amarração, escadas e suportes. As dimensões dos corpos de prova são de 180x160x1 mm (CxLxE).

Os ensaios foram realizados com duas variações na composição da mistura gasosa utilizada com gás auxiliar: Ar + 5% H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> puro, sendo estes gases de alta condutividade térmica e disponíveis no laboratório. Além disso, a vazão de saída do gás auxiliar foi alterada da seguintes forma: 10 l/min, 15 l/min, 20 l/min e 25 l/min.

Com o intuito de averiguar a eficácia dos resultados obtidos com a proposta deste trabalho, realizou-se ensaios conservando os mesmos parâmetros de soldagem e sem a utilização de um gás auxiliar. Tais ensaios foram denominados REF, e foram utilizados como referência no presente estudo. A fim de garantir a repetitividade dos experimentos, foram realizados 3 (três) ensaios para cada condição citada.

Com o intuito de auxiliar na identificação de cada corpo de prova, foi criada uma tabela, a qual apresenta a nomenclatura do mesmo conforme cada ensaio, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1- Nomenclatura dos corpos de prova

<b>Nomenclatura</b>	<b>Gás auxiliar</b>	<b>Vazão [l/min]</b>
REF	-	-
AH10	Ar + 5% H <sub>2</sub>	10
AH15	Ar + 5% H <sub>2</sub>	15
AH20	Ar + 5% H <sub>2</sub>	20
AH25	Ar + 5% H <sub>2</sub>	25
C10	CO <sub>2</sub>	10
C15	CO <sub>2</sub>	15
C20	CO <sub>2</sub>	20
C25	CO <sub>2</sub>	25

Fonte: O Autor (2019)

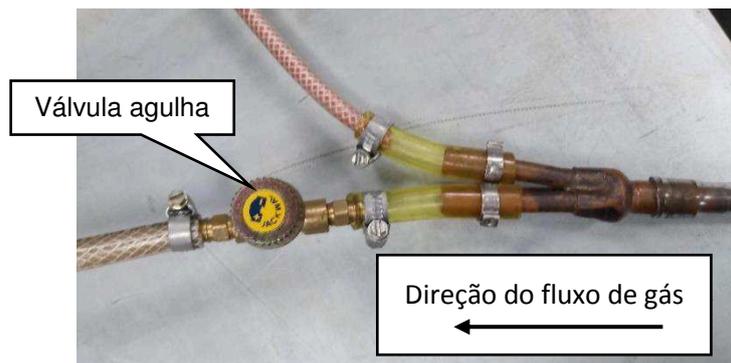
A fim de selecionar os parâmetros ideais para a realização dos ensaios, foram realizados ensaios preliminares para a determinação dos mesmos.

Segundo CUNHA (2013), na soldagem TIG de chapas finas de aço inoxidável, é consenso utilizar uma corrente de 30 A para cada milímetro de espessura. De tal

forma, a corrente foi pré-estabelecida, variando-se a velocidade de soldagem com o intuito de selecionar aquela que produzisse penetração adequada para tais ensaios.

Para garantir a qualidade do processo, utilizou-se argônio como gás de proteção na face e na raiz da solda (purga). A fim de assegurar as vazões apropriadas para as proteções gasosas, utilizou-se uma bifurcação na mangueira de gás, com o auxílio de uma válvula do tipo agulha, visto que o mesmo cilindro de argônio foi empregado para a função de proteção da face e da raiz do cordão. Sendo assim, foi ajustada uma vazão de 15 l/min no regulador de vazão do cilindro, e uma vazão de 10 l/min na válvula que restringia o fluxo do gás do cilindro para a fonte de soldagem, de forma que o gás de proteção da raiz tivesse uma vazão de 5 l/min, conforme a Figura 31.

Figura 31- Válvula utilizada para controle da vazão do gás de proteção



Fonte: O Autor (2019)

O critério adotado para a validação dos parâmetros de soldagem foi de alcançar uma penetração total da solda e largura de cordão regular na face e raiz da mesma. A Figura 32 ilustra a raiz da solda obtida com os parâmetros adotados.

Figura 32- Raiz da solda adotada como padrão para estabelecimento dos parâmetros de soldagem



Fonte: O Autor (2019)

A Tabela 2 relaciona todos os parâmetros utilizados nos ensaios do presente trabalho.

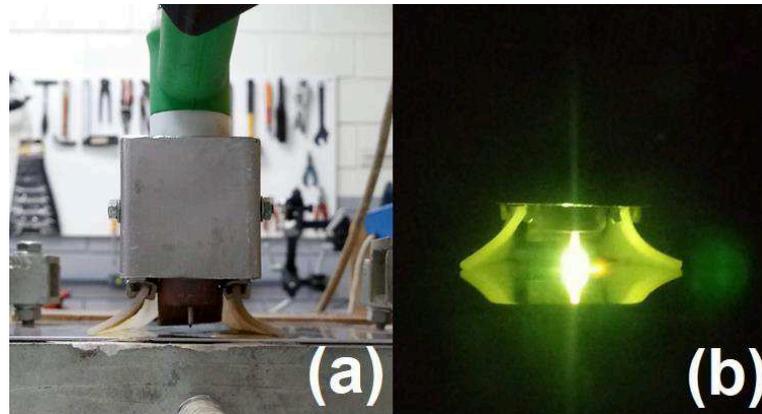
Tabela 2- Parâmetros de soldagem

Material do corpo de prova	A304
Distância eletrodo- peça [mm]	3
Tipo do eletrodo	Ewth-2
Diâmetro do eletrodo [mm]	1,6
Ângulo de afiação [°]	45
Velocidade de soldagem [cm/min]	11
Corrente de soldagem [A]	30
Gás de proteção	Ar
Vazão de gás de proteção (face) [l/min]	10
Vazão de gás de proteção (raiz) [l/min]	5

Fonte: O Autor (2019)

A fim de eliminar variáveis não pertinentes ao presente estudo, os ensaios foram realizados de forma a analisar-se apenas o efeito do arco elétrico perante aos corpos de prova. De tal modo, realizou-se uma soldagem “bead on plate” (deposição simples sobre a chapa), a qual não utilizou metal de adição. A Figura 33 apresenta a condição de análise citada, evidenciando o dispositivo na mesma posição, no instante anterior à abertura do arco elétrico (a) e no instante seguinte à abertura do arco elétrico (b).

Figura 33- Representações do dispositivo no início dos ensaios- no instante anterior à abertura do arco (a) e no instante posterior à abertura do arco (b)



Fonte: O Autor (2019)

Com o intuito de padronizar os ensaios e evitar possíveis divergências entre os experimentos com relação à geração das tensões residuais, definiu-se que o início e o fim dos ensaios ocorreriam de forma a fundir o material das extremidades dos corpos de prova, causando uma pequena perfuração na superfície, como pode ser visto na Figura 34.

Figura 34- Padronização do ensaio com base na superfície de solda

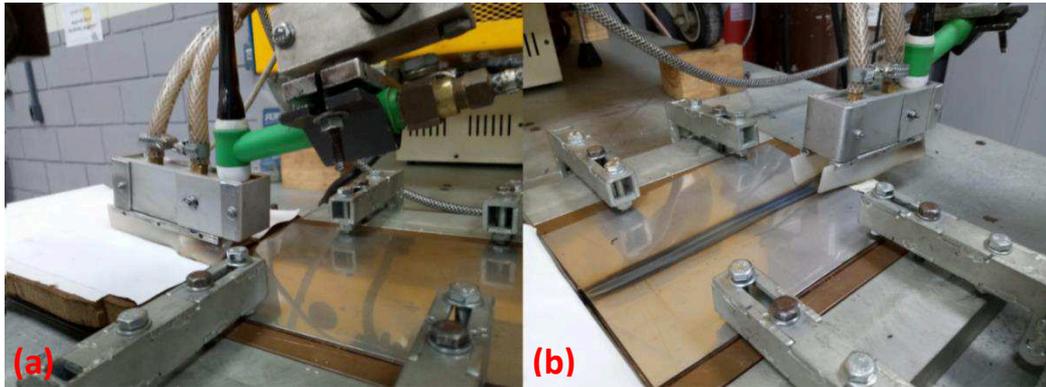


Fonte: O Autor (2019)

O *trailing shield* atuou no cordão de solda mesmo com o arco desligado, de forma que o dispositivo fosse capaz de injetar gases na extremidade final do cordão de solda, como é possível observar na Figura 35. A Figura 35 (a) identifica a posição

inicial da atuação do *trailing shield*, enquanto a Figura 35 (b) mostra a posição final do mesmo durante a realização dos ensaios.

Figura 35- Padronização de deslocamento do *trailing shield* no início do ensaio (a) e no fim do ensaio (b)

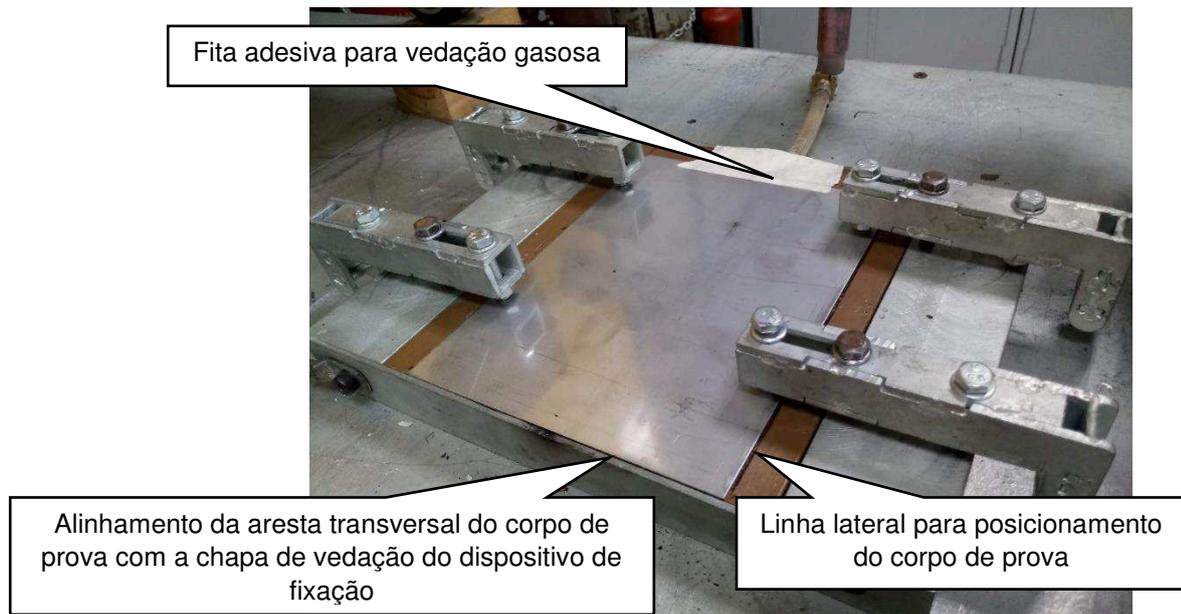


Fonte: O Autor (2019)

Com o propósito de padronizar o posicionamento dos corpos de prova, os ensaios foram realizados de forma que o corpo de prova tivesse uma aresta da direção transversal alinhada à chapa de vedação do dispositivo de fixação. Além disso, para auxiliar na vedação da proteção gasosa da raiz dos corpos de prova, utilizou-se uma fita adesiva para cobrir a fresta resultante da diferença de comprimentos entre o dispositivo de fixação e o corpo de prova. Para que o cordão de solda ficasse sempre localizado no centro da chapa, desenhou-se duas linhas laterais sobre os apoios de cobre do dispositivo de fixação que serviram como guias para o posicionamento dos corpos de prova.

A padronização do posicionamento dos corpos de prova no dispositivo de fixação citada pode ser vista na Figura 36.

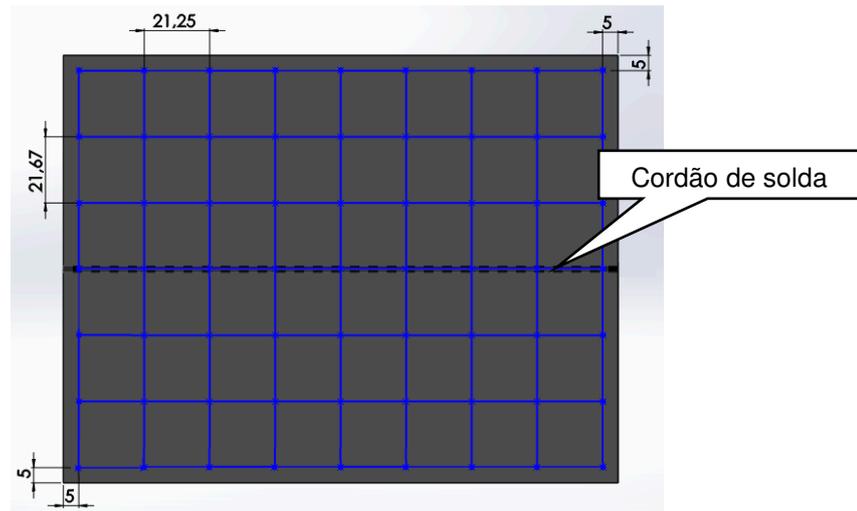
Figura 36- Padronização do posicionamento dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2019)

Após a finalização dos ensaios propostos, foi gerada uma malha na superfície dos corpos de prova, de modo a mapear as distorções provocadas pelo processo de soldagem. A premissa para a elaboração da mesma foi a capacidade de representar as distorções de forma satisfatória sem demandar alto custo computacional. Para tanto, optou-se pela geração de uma malha composta por 48 elementos retangulares com dimensões de 21,67 x 21,25 mm, os quais abrangeram toda a extensão dos corpos de prova. Os 63 pontos que delimitam o tamanho da malha foram projetados de forma que as deformações geradas exatamente no centro da chapa, nos sentidos longitudinal e transversal pudessem ser medidas. Além disso, também foi definido que a malha estaria limitada à uma distância de cinco milímetros das extremidades dos corpos de prova, com o intuito de garantir continuidade de superfície durante as medições, visto o padrão de execução adotado na metodologia de ensaios. A malha gerada para obtenção das deformações pode ser vista na Figura 37.

Figura 37- Malha superficial representada em software CAD



Fonte: O Autor (2019)

A fim de assegurar a precisão adequada para a aquisição dos pontos selecionados, utilizou-se o centro de usinagem baseado em Comando Numérico Computadorizado (CNC) em parceria com o Laboratório de Manufatura da UFSC. De tal modo, foi possível fazer uma varredura da superfície com o auxílio de um relógio comparador INSIZE com resolução de 0,01mm acoplado ao eixo árvore da máquina, como mostra a Figura 38.

Figura 38- Mapeamento da superfície dos corpos de prova com o auxílio de uma máquina CNC



Fonte: O Autor (2019)

Com a finalidade de padronizar as medições, e assim garantir as mesmas condições de avaliação para todos os ensaios, os quatro vértices das chapas ensaiadas foram nomeados conforme sua posição perante o ensaio de soldagem, conforme mostra a Figura 39.

Figura 39- Nomenclatura dos vértices dos corpos de prova

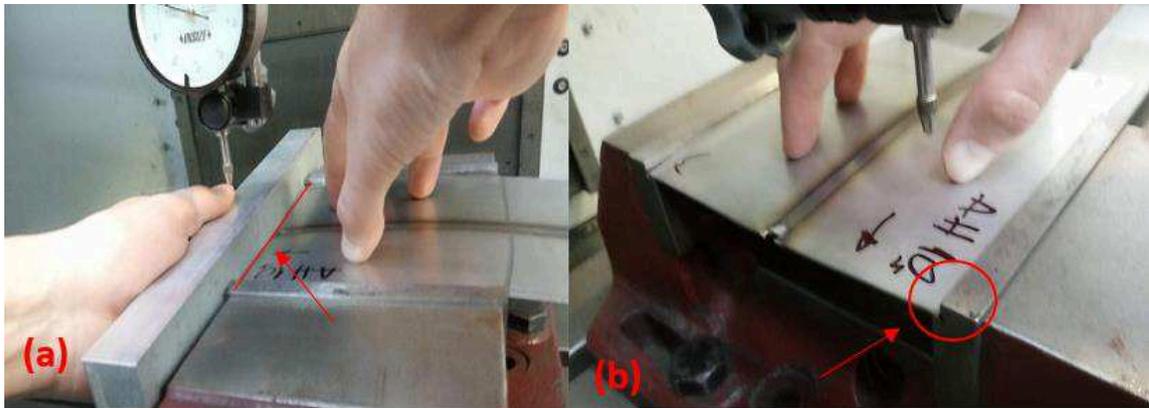


Fonte: O Autor (2019)

A partir da nomeação dos vértices dos corpos de prova, notou-se que o vértice número “1” da maioria dos ensaios apoiava-se sobre a superfície em que era colocado sobre repouso. Por tal motivo, optou-se por referenciar as medições a partir do mesmo.

Os corpos de prova foram posicionados na máquina CNC de forma que as arestas 1-3 e 2-4 fossem apoiadas pelos mordentes da morsa da máquina, sempre no mesmo sentido, e a aresta 3-4 ficasse alinhada em relação à ferramenta, apoiando-se sobre os mordentes da morsa, como pode ser visto na Figura 40 (a). Além disso, o vértice 4 foi apoiado sobre o degrau do mordente de seu lado (Figura 40 (b)).

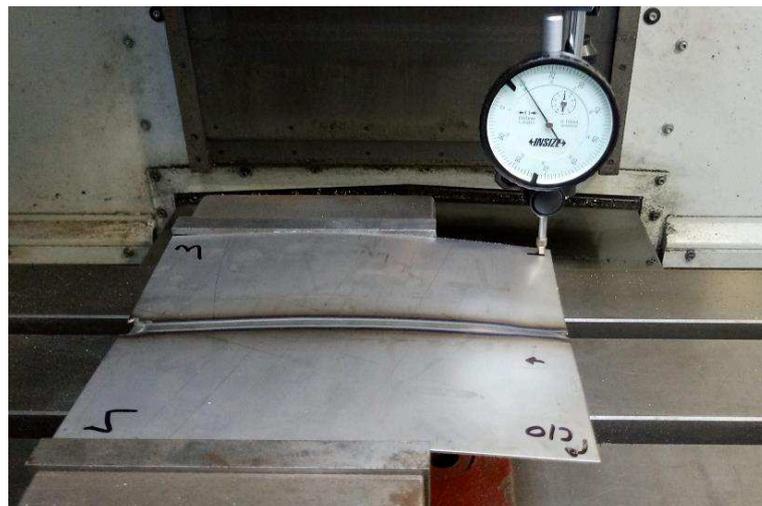
Figura 40- Posicionamento dos corpos de prova na máquina CNC. Alinhamento da aresta transversal 3-4 (a) e alinhamento do vértice 4 (b)



Fonte: O Autor (2019)

A fim de definir a origem dos eixos cartesianos da máquina para realizar a medição, o relógio comparador foi posicionado à cinco milímetros das extremidades do vértice 1, conforme demonstrado na Figura 37. Já o eixo z teve sua origem determinada no instante em que o relógio comparador tocou a superfície da chapa nos eixos  $x=0$  e  $y=0$ , conforme pode ser visto na Figura 41.

Figura 41- Determinação da origem do sistema de coordenadas cartesianas



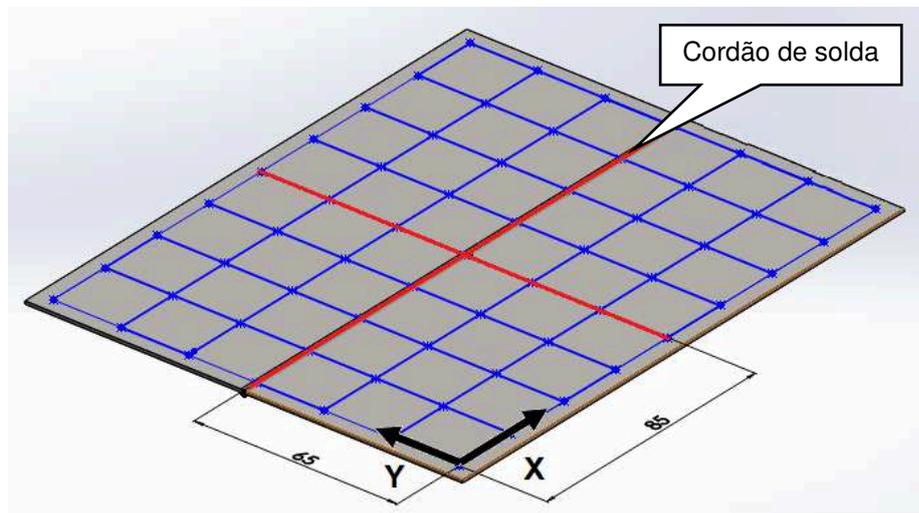
Fonte: O Autor (2019)

Após o mapeamento da superfície de todos os corpos de prova, obteve-se a quantificação das variações dimensionais captadas pelo relógio comparador. A partir da compilação destes dados foi possível analisar o comportamento de tais variações perante a aplicação dos gases auxiliares, a qual é reproduzida no capítulo seguinte.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base no mapeamento superficial das deformações dos corpos de prova, foi realizada uma avaliação qualitativa do perfil das distorções, de forma a comparar a variação das deformações ao longo do corpo de prova. Para caracterizar o perfil de tais distorções, utilizou-se como base as duas linhas centrais que cruzam o eixo longitudinal e transversal da malha gerada, como ilustrado na Figura 42 (representadas pelas linhas vermelhas).

Figura 42- Segmentos utilizados para caracterização do perfil das distorções

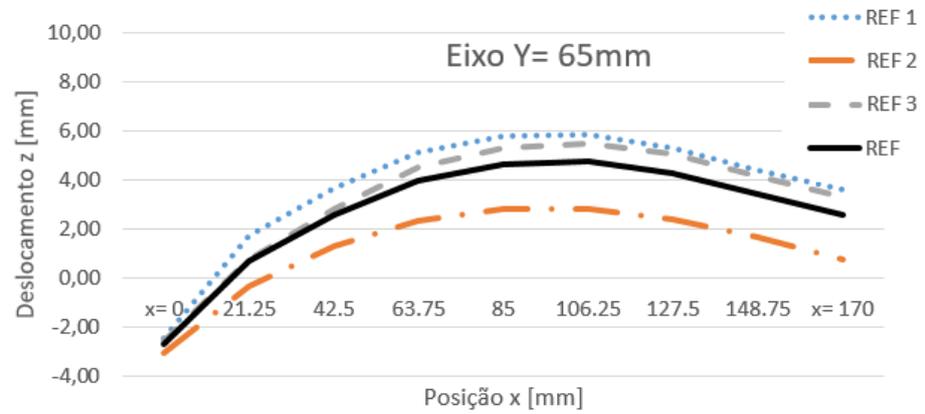


Fonte: O Autor (2019)

De tal modo, houve uma varredura dos pontos na direção X sobre o cordão de solda ( $Y = 65\text{mm}$ ), denominado neste capítulo, para efeitos didáticos, de direção longitude e uma varredura dos pontos na direção Y, em  $X = 85\text{mm}$ , denominada de direção latitude.

A partir dos 3 ensaios realizados para cada condição citada no item 4, realizou-se uma média entre os pontos capturados a fim de conferir maior robustez aos resultados obtidos. De tal forma, foram gerados perfis de distorção que contemplam o deslocamento geométrico dos corpos de prova, os quais são descritos nos parágrafos seguintes. A Figura 43 representa os ensaios de referência na direção longitude, a qual contempla os três ensaios realizados (REF 1, REF 2 e REF 3) e a média dos mesmos (REF), representada pela linha sólida em preto.

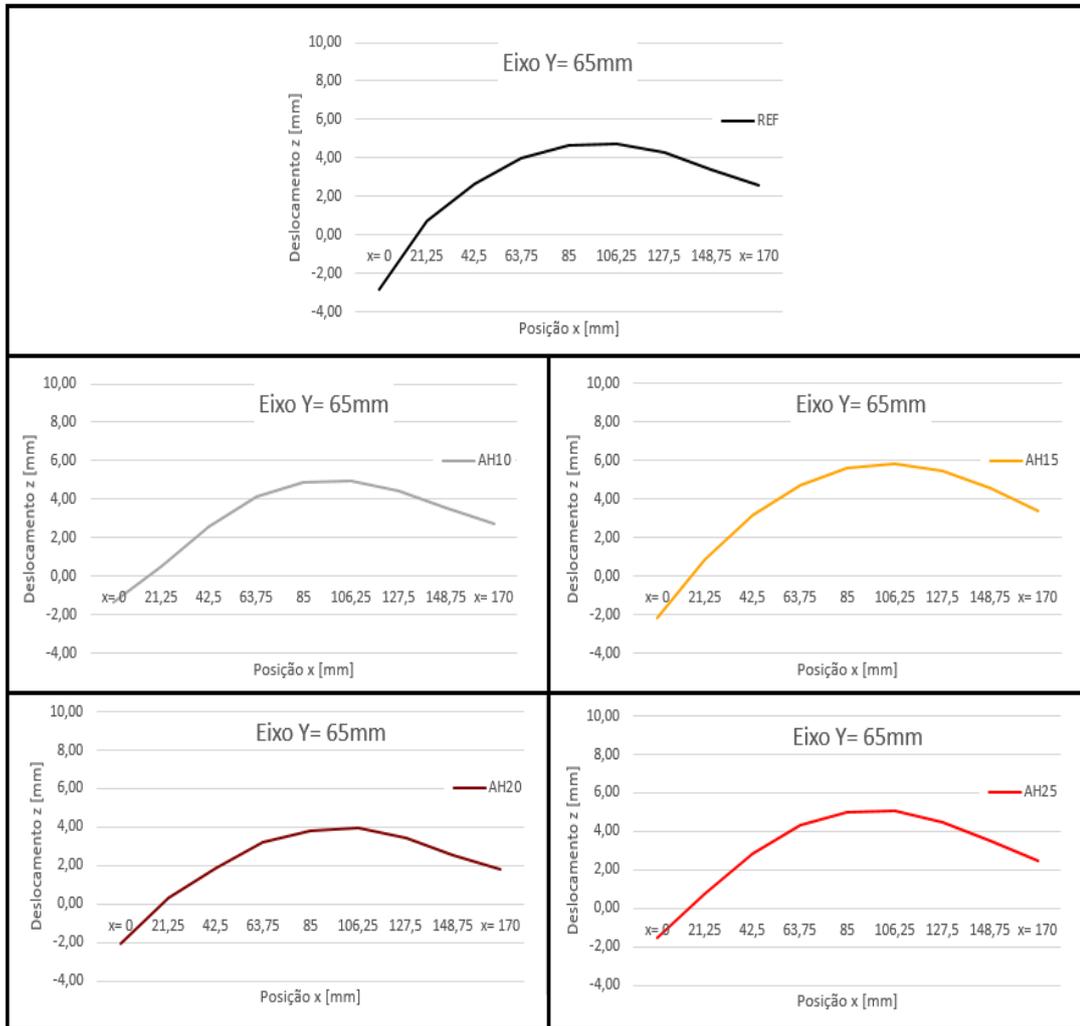
Figura 43- Perfis de distorção dos ensaios de referência na direção longitude



Fonte: O Autor (2019)

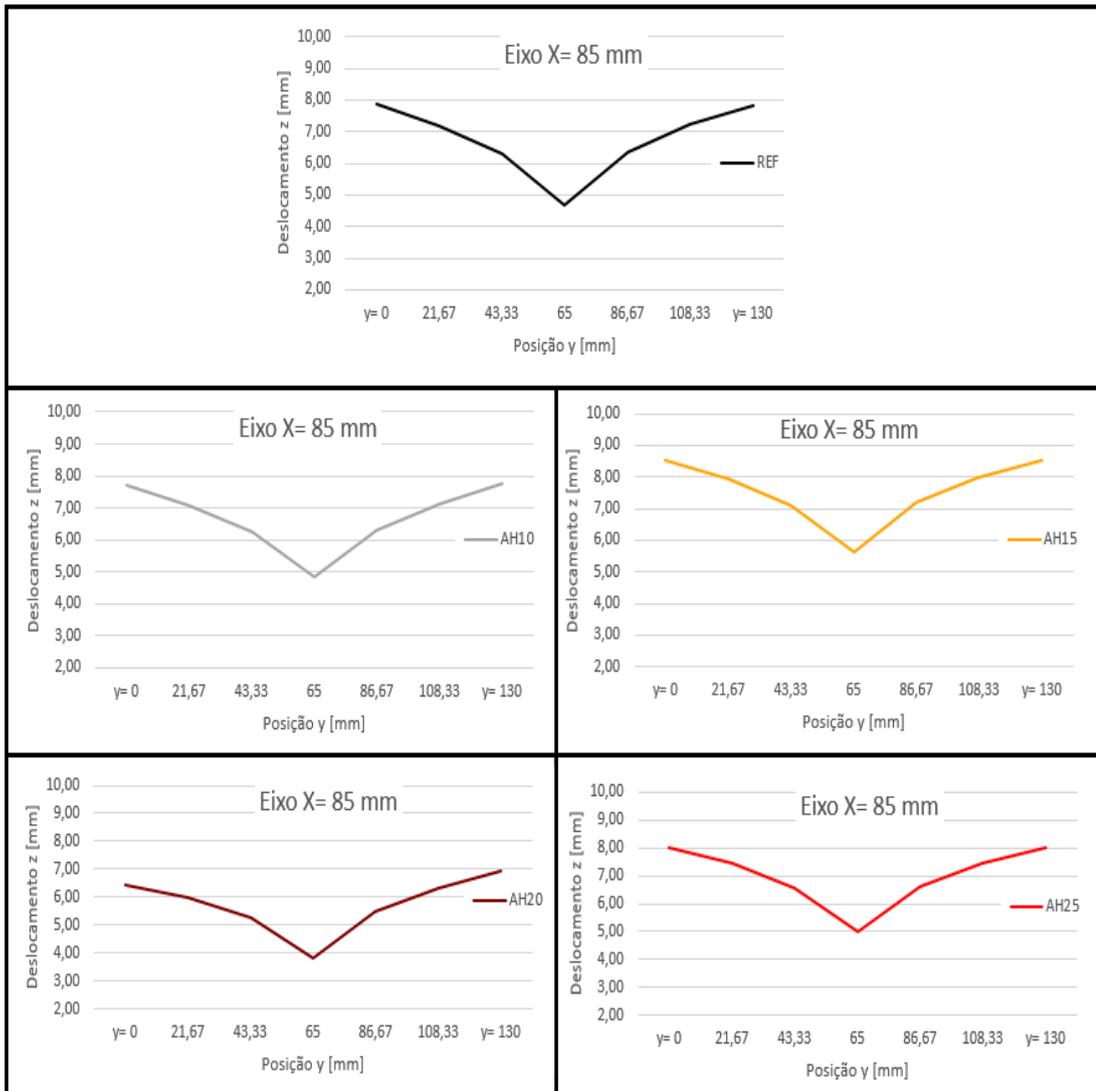
Os perfis de distorção para as condições em que foi utilizado o gás auxiliar Ar + 5% H<sub>2</sub>, bem como o ensaio de referência podem ser vistos nas Figuras 44 (longitude) e 45 (latitude).

Figura 44- Perfil de distorções para o gás auxiliar Ar + 5% H<sub>2</sub> na direção longitudinal



Fonte: O Autor (2019)

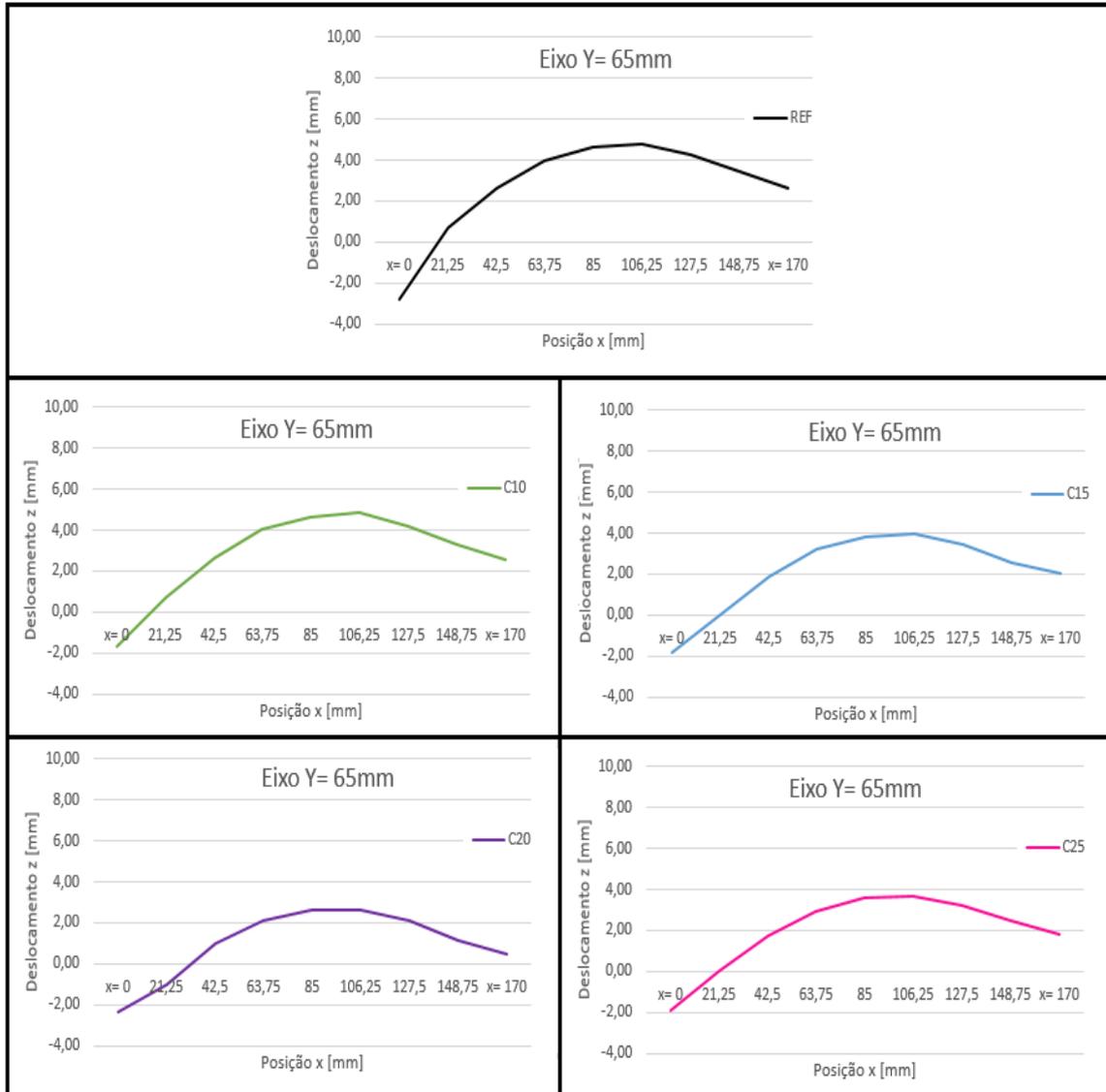
Figura 45- Perfil de distorções para o gás auxiliar Ar + 5% H<sub>2</sub> na direção latitude



Fonte: O Autor (2019)

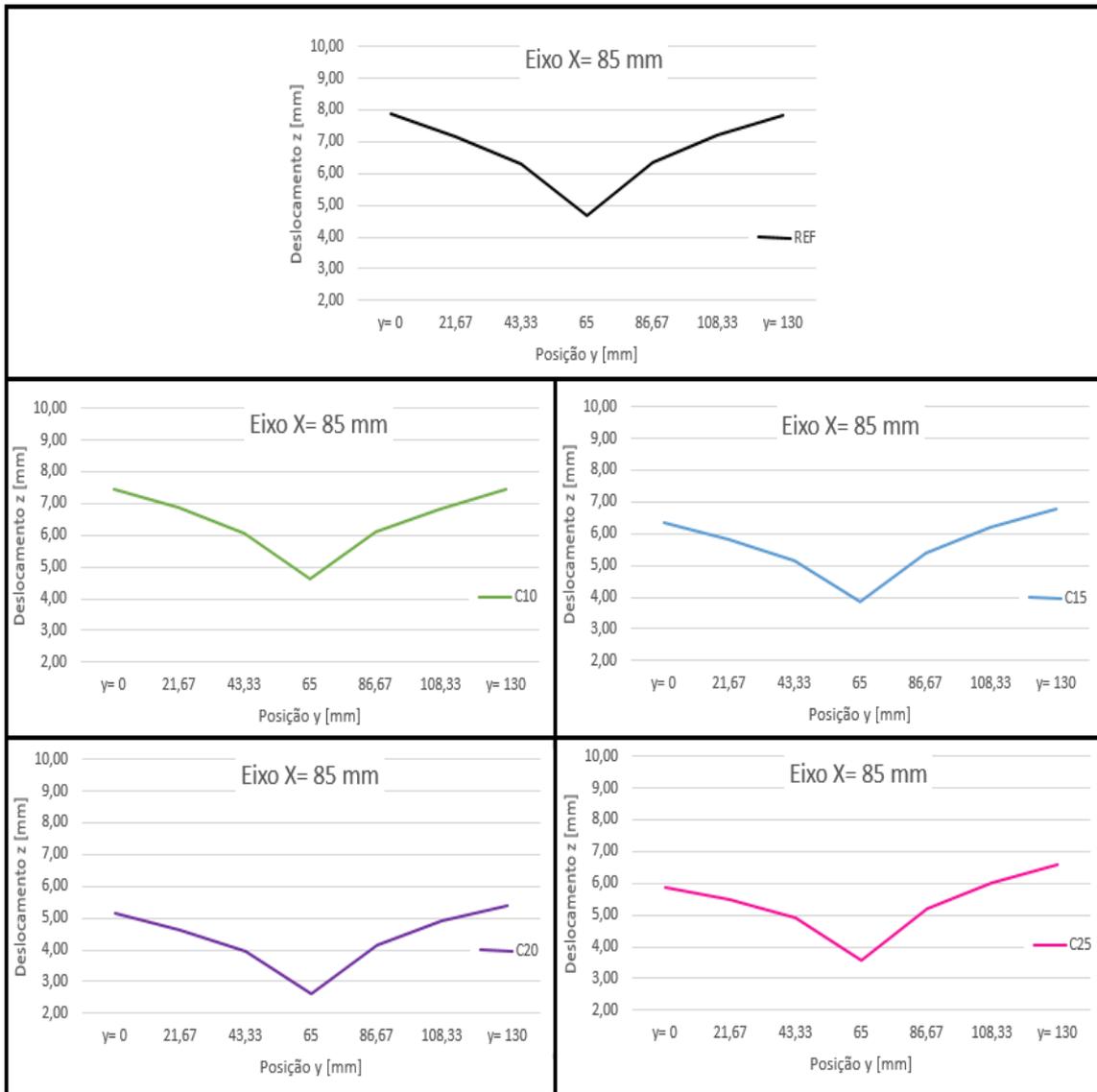
Assim como realizado para a mistura gasosa de Argônio e Hidrogênio, o mesmo perfil foi avaliado para o gás CO<sub>2</sub>. As Figuras 46 (longitude) e 47 (latitude) representam a caracterização das variações geométricas dos experimentos contendo todas as vazões utilizadas com o CO<sub>2</sub>, bem como o perfil do ensaio de referência.

Figura 46- Perfil de distorções para o gás auxiliar CO<sub>2</sub> na direção longitude



Fonte: O Autor (2019)

Figura 47- Perfil de distorções para o gás auxiliar CO<sub>2</sub> na direção latitude

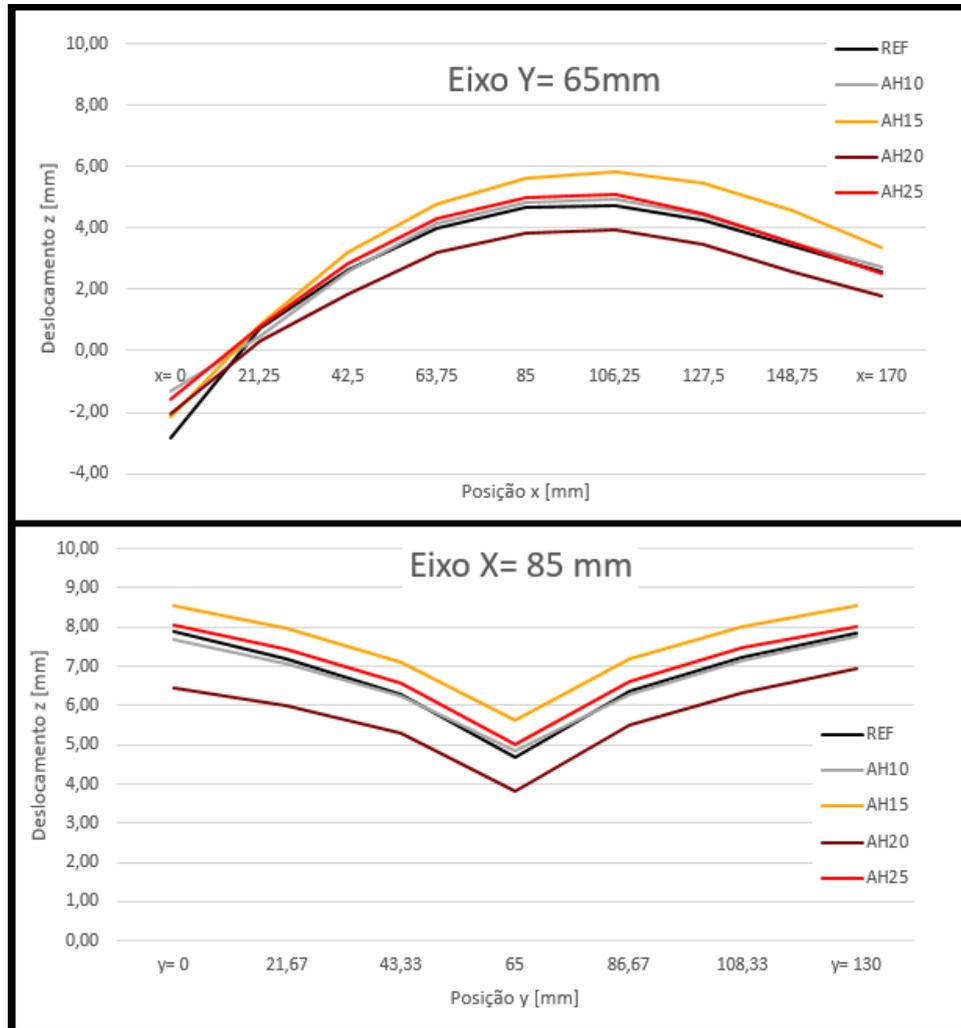


Fonte: O Autor (2019)

Como é possível observar, o perfil médio de todas as condições de ensaio se manteve semelhante, com algumas variações de magnitude quanto à natureza do gás auxiliar utilizado e sua vazão, as quais serão discutidas a seguir.

Ao analisar os perfis geométricos resultantes para a condição em que foi usado Ar + 5% H<sub>2</sub> como gás auxiliar (Figura 48), nota-se um efeito de aumento das distorções para as vazões de 10 e 15 L/min em relação aos ensaios de referência. Porém, nos ensaios com vazão de 20 L/min, há uma redução destas distorções, e um novo efeito de aumento das distorções é notado nos ensaios com vazão de 25 L/min.

Figura 48- Comparação dos perfis de distorção utilizando a mistura Ar + 5% H<sub>2</sub> como gás auxiliar

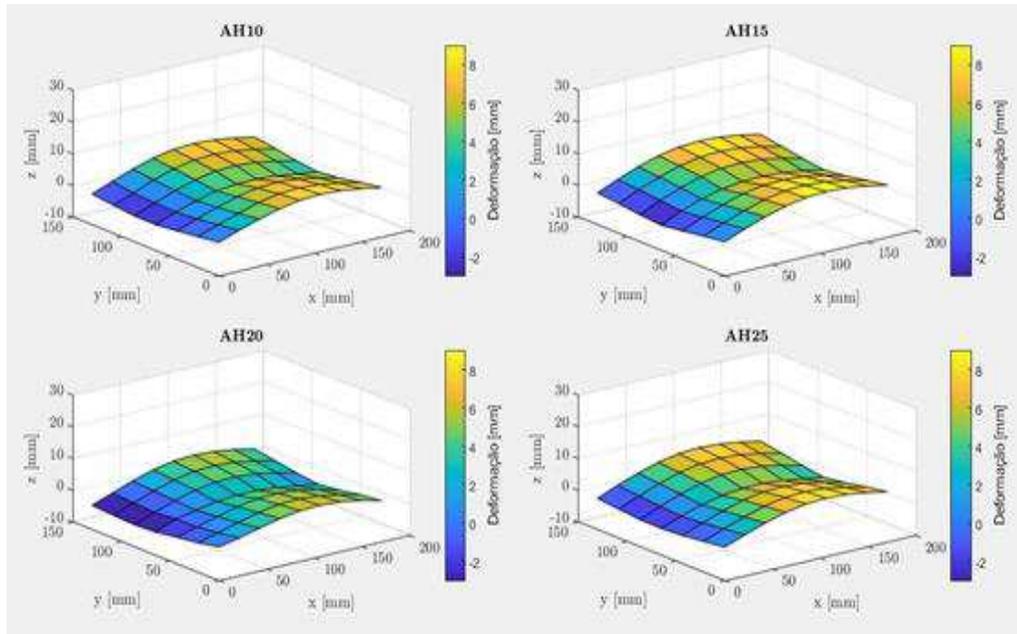


Fonte: O Autor (2019)

Tal efeito não se restringe apenas às condições de latitude e longitude citadas. Ao se analisar o gráfico de superfície destes ensaios, nota-se que este resultado é representado em toda a extensão dos corpos de prova.

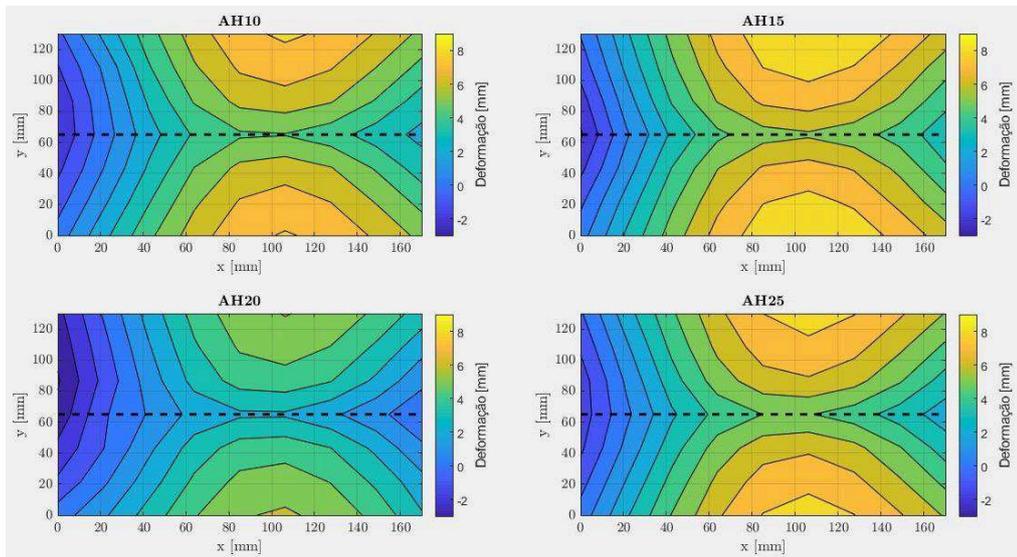
As Figuras 49 e 50 apresentam os gráficos de superfície tridimensional e bidimensional, respectivamente, dos médias dos ensaios com a mistura Ar + 5% H<sub>2</sub>.

Figura 49- Gráfico de superfície tridimensional para as condições que utilizam a mistura Ar + 5% H<sub>2</sub> como gás auxiliar



Fonte: O Autor (2019)

Figura 50- Gráfico de superfície bidimensional para as condições que utilizam a mistura Ar + 5% H<sub>2</sub> como gás auxiliar

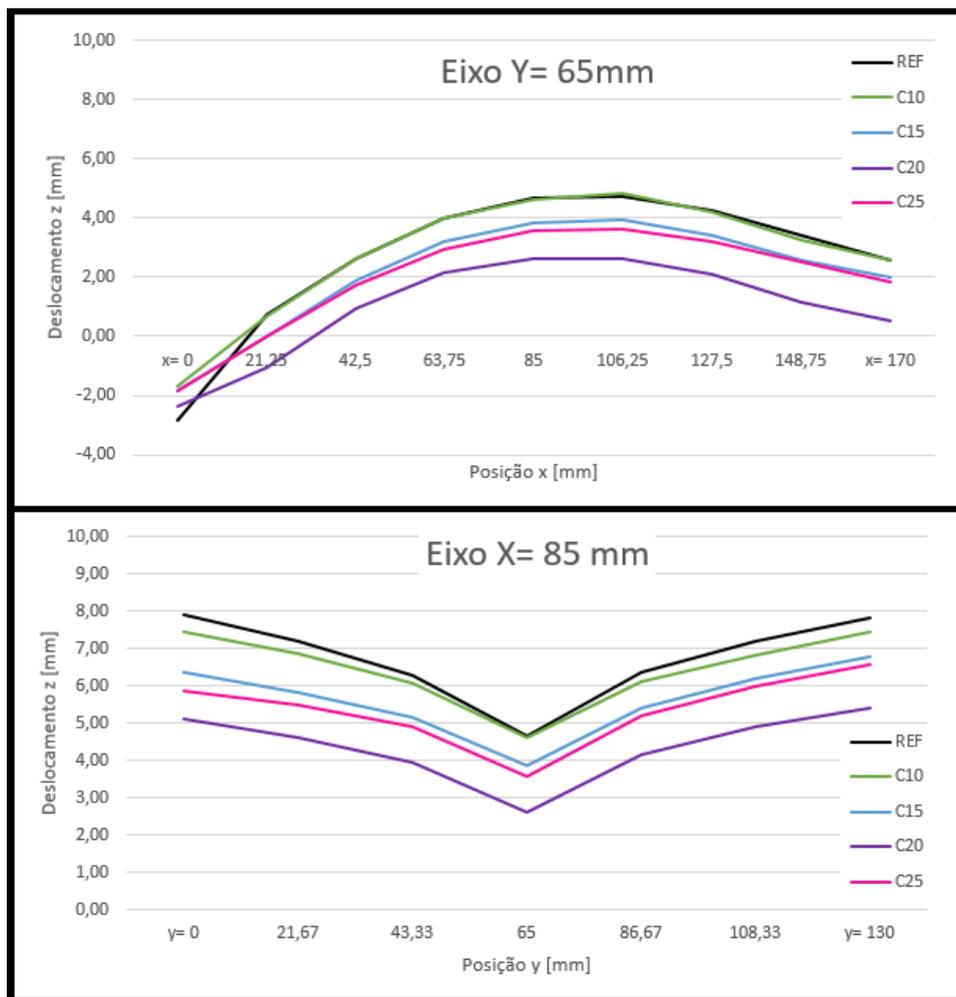


Fonte: O Autor (2019)

Ao analisar os perfis de distorção para as condições em que foi usado CO<sub>2</sub> como gás auxiliar foi possível notar a redução da magnitude de distorções de forma

proporcional ao aumento da vazão nas condições de 10, 15 e 20L/min. Porém, o perfil médio dos ensaios com vazão de 25L/min obteve magnitude de distorções maior que os ensaios com vazão de 20L/min, assim como os ensaios com Ar + 5% H<sub>2</sub>. O gráfico comparativo dos perfis de tais ensaios nas direções de longitude e latitude pode ser visto na Figura 51.

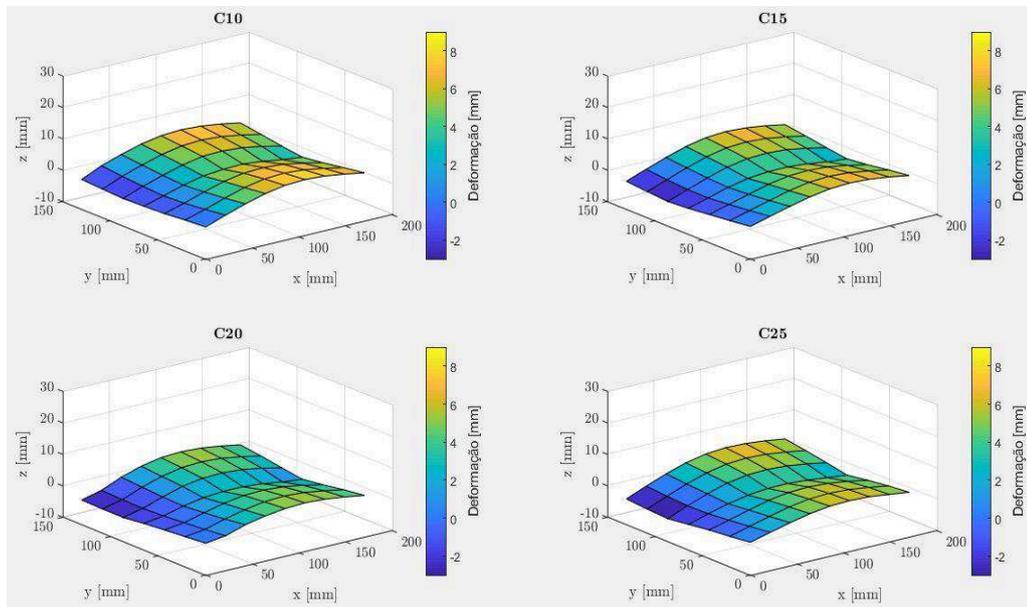
Figura 51- Comparação dos perfis de distorção utilizando CO<sub>2</sub> como gás auxiliar



Fonte: O Autor (2019)

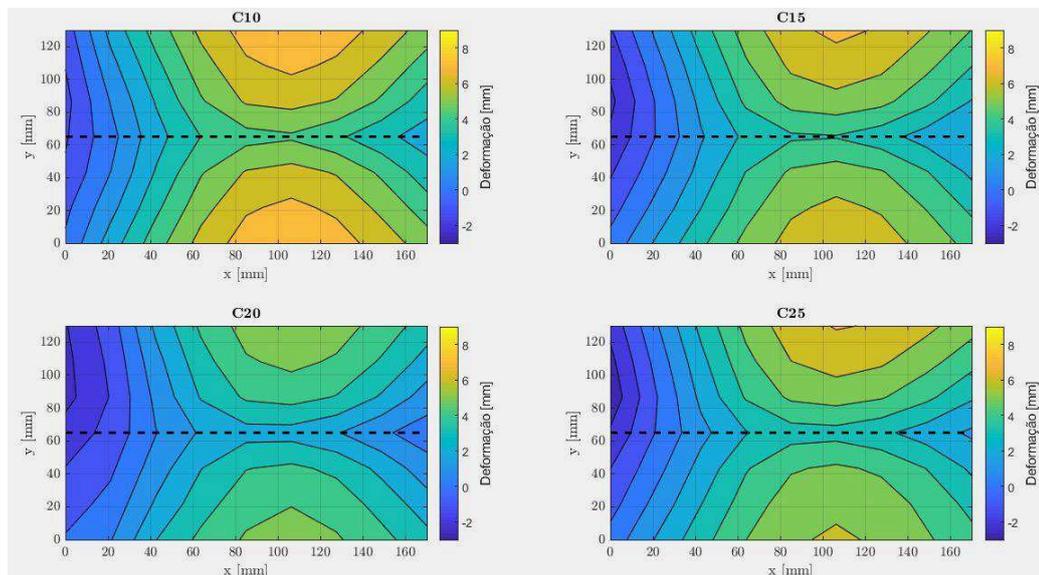
Assim como nos ensaios realizados com Argônio e Hidrogênio, os efeitos notados na análise realizada nas direções de latitude e longitude citadas também ocorrem ao longo da extensão dos corpos de prova que utilizaram CO<sub>2</sub> como gás auxiliar. As Figuras 52 e 53 apresentam os gráficos de superfície tridimensional e bidimensional, respectivamente, de tais ensaios.

Figura 52- Gráfico de superfície tridimensional para as condições que utilizam CO<sub>2</sub> como gás auxiliar



Fonte: O Autor (2019)

Figura 53- Gráfico de superfície bidimensional para as condições que utilizam CO<sub>2</sub> como gás auxiliar



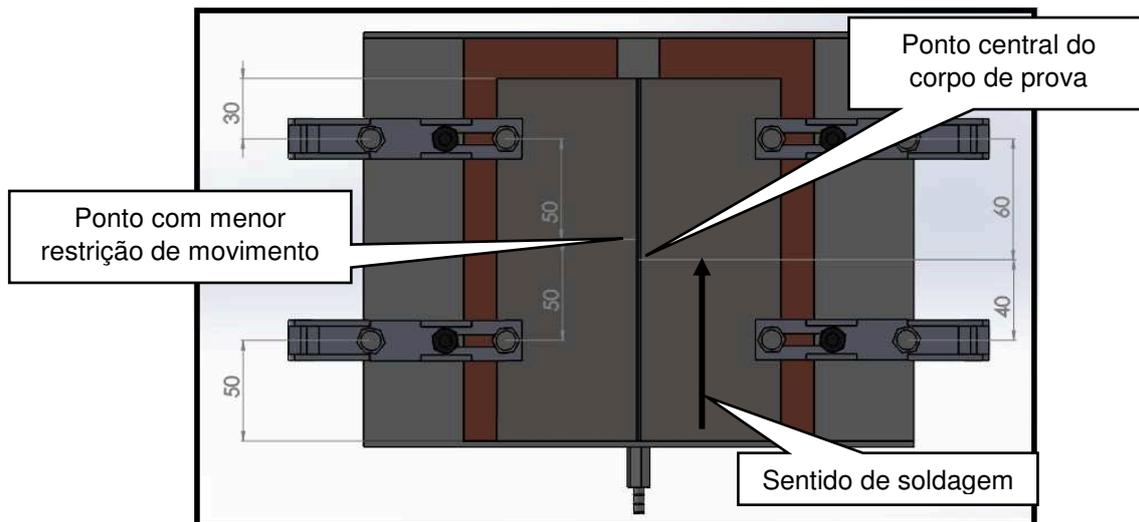
Fonte: O Autor (2019)

Conforme observado, o perfil médio de todos os ensaios reproduzidos segue um padrão de distorção único, o qual se caracteriza por um perfil parabólico, na direção longitude, com concavidade voltada para baixo e um pico de magnitude de

distorção próximo ao centro do cordão, no ponto  $X=106,25\text{mm}$ . Tal efeito pode ser explicado conforme as circunstâncias descritas nos parágrafos a seguir.

Como os grampos de fixação não foram fixados de forma simétrica em relação às extremidades dos corpos de prova no sentido longitudinal de soldagem, a formação das tensões residuais pode ter sido afetada, de modo a gerar assimetria nas mesmas, favorecendo também a assimetria das distorções em tal direção. A partir da Figura 54, é possível notar que o ponto com menor restrição de movimentos do corpo de prova encontra-se entre os dois grampos de fixação, referente à distância de 100mm do início da soldagem. Logo, a posição de maior distorção longitudinal encontrada nos corpos de prova é plausível com as condições de ensaio realizadas.

Figura 54- Representação das distâncias longitudinais de fixação dos corpos de prova em relação ao centro e às extremidades da chapa



Fonte: O Autor (2019)

Além disso, conforme Ribeiro (2010), as tensões residuais tendem a ser maiores no final do cordão de solda devido ao acúmulo de tensões térmicas decorrentes do ciclo térmico originado pela execução do cordão neste sentido. Logo, também presume-se que as distorções em tais posições sejam maiores, posto a condição que não existam restrições às suas variações dimensionais.

Soma-se também o fato de que as propriedades físicas e mecânicas do material variam com o aumento da temperatura, as quais podem afetar o fluxo de calor e a uniformidade de sua distribuição ao longo da peça.

Assim como os perfis médios na direção longitude seguem um único padrão de distorção, o mesmo ocorre para os perfis de distorção na direção latitude, os quais possuem seu valor máximo nas extremidades e seu valor mínimo no centro. Tal fenômeno é decorrente da distorção angular, e pode ser explicado devido às forças de contração geradas na região do cordão de solda. Segundo Adamczuk (2017), a contração térmica de um volume de controle é restringida pelo metal adjacente, resultando na formação de forças internas no material. A acomodação das forças de contração até o restabelecimento do equilíbrio causa a deformação do metal.

Conforme descrito no item 4, a fixação dos corpos de prova na direção latitude foi simétrica, objetivando a soldagem no centro do corpo de prova. Logo, não foram observadas assimetrias de distorção, como observado na direção longitude.

Dadas tais circunstâncias, os perfis de soldagem obtidos nas direções longitude e latitude são coerentes com as condições de soldagem e fixação às quais os experimentos foram submetidos. O fato da redução das distorções não seguir uma relação de proporcionalidade com o aumento da vazão dos gases indica uma possível condição de eficiência máxima, nas condições de ensaio avaliadas. Uma justificativa para tal fenômeno é a formação de uma possível turbulência gerada nos gases auxiliares no momento em que os mesmos são injetados do *trailing shield*, visto que a eficiência máxima observada ocorre na mesma vazão de gás independente da composição utilizada. Uma hipótese levantada para o comportamento das distorções em relação à vazão dos gases aplicados é melhor descrita no parágrafo seguinte.

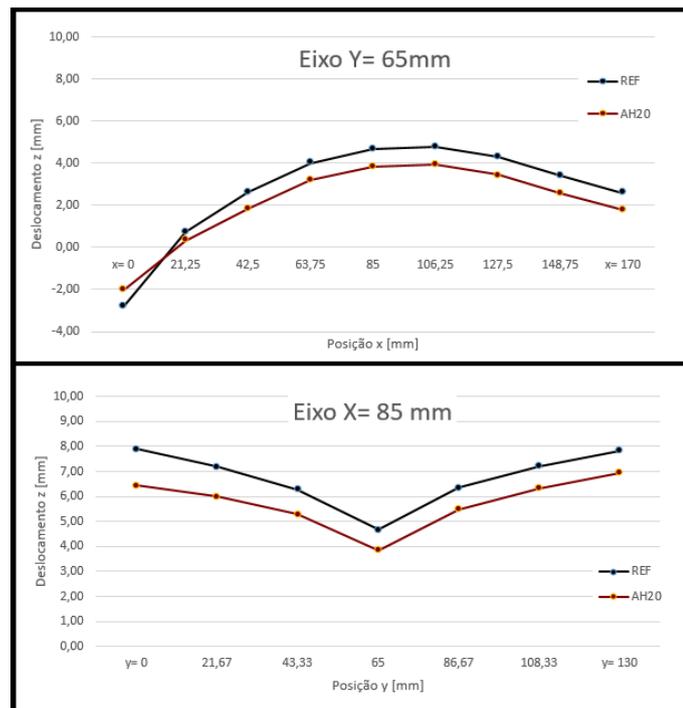
O comportamento das distorções indica que na aplicação de baixas vazões dos gases estudados ocorre a formação de uma camada gasosa sobre a chapa, a qual afeta na transferência de calor contida na região soldada. Quando aplicada a vazão de 20l/min (condição de máxima eficiência), a velocidade do escoamento é aumentada, forçando uma movimentação mais rápida das partículas de gás existentes na região, aumentando o potencial de transferência de calor das mesmas. Porém, quando utilizada a vazão de 25l/min, presume-se que o aumento na velocidade do escoamento destes gases seja tal que o período de contato das partículas gasosas com a região quente se torna insuficiente para que haja uma transferência de calor efetiva. Apesar de apresentarem valores absolutos diferentes, ambas as misturas apresentaram comportamento semelhante.

A fim de comparar os melhores resultados obtidos nos ensaios os quais são utilizados gases auxiliares com os ensaios de referência, criou-se gráficos

comparativos, os quais reproduzem os perfis de distorção nas direções de longitude e latitude.

Na Figura 55, estão representados os perfis de distorção para as condições de referência e Ar + 5% H<sub>2</sub> com vazão de 20L/min.

Figura 55- Comparativo de perfis de distorção entre os ensaios REF e AH20



Fonte: O Autor (2019)

Com base nestes ensaios apresentados, nota-se uma redução das distorções ao longo da extensão dos corpos de prova quando utilizado o gás auxiliar contendo a mistura Ar + 5% H<sub>2</sub> com vazão de 20l/min em relação aos ensaios de referência. As reduções nas distorções equivalem a cerca de 20% na direção longitude e 3% na direção latitude na variação total das amplitudes destas distorções. As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores de distorção em cada ponto.

Tabela 3- Distorções dos ensaios REF e AH20 na direção longitude

Posição x [mm]		0	21,25	42,5	63,75	85	106,25	127,5	148,75	170
Distorção [mm]- Direção longitude	REF	-2,82	0,73	2,62	3,99	4,66	4,75	4,28	3,41	2,59
	AH20	-2,03	0,32	1,85	3,20	3,82	3,96	3,44	2,56	1,79

Fonte O Autor (2019)

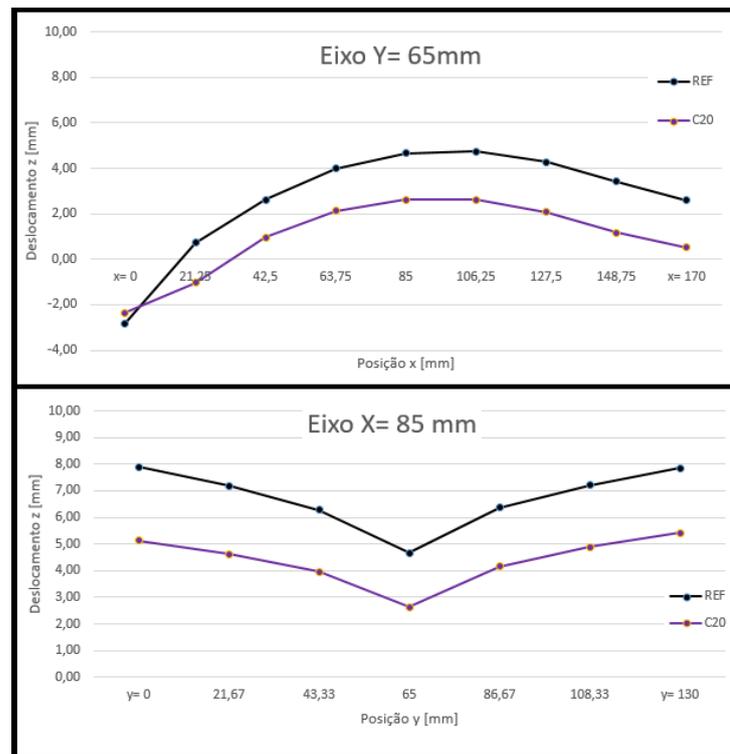
Tabela 4- Distorções dos ensaios REF e AH20 na direção latitude

Posição y [mm]		0	21,67	43,33	65	86,67	108,33	130
Distorção [mm]- Direção latitude	REF	7,89	7,18	6,28	4,66	6,37	7,21	7,84
	AH20	6,47	5,99	5,29	3,82	5,50	6,33	6,94

Fonte O Autor (2019)

A mesma representação demonstrada foi realizada comparando-se os perfis dos ensaios de referência e os ensaios utilizando CO<sub>2</sub> com vazão de 20L/min. A Figura 56 apresenta a comparação entre estes dois perfis de distorção nas direções longitude e latitude.

Figura 56- Comparativo de perfis de distorção entre os ensaios REF e C20



Fonte: O Autor (2019)

Assim como nos ensaios realizados utilizando Argônio e Hidrogênio como gás auxiliar, ao se utilizar o CO<sub>2</sub> como agente dissipador de calor, também observa-se um efeito de mitigação das distorções com relação aos ensaios de referência, quando utilizada a vazão de 20l/min. As reduções na amplitude das distorções equivalem a cerca de 33% na direção longitude e de 14% na direção latitude.

As Tabelas 5 e 6 apresentam os valores reais de distorção e suas respectivas reduções em termos percentuais analisando os ensaios REF e C20 nas direções longitude e latitude, respectivamente.

Tabela 5- Distorções dos ensaios REF e C20 na direção longitude

<b>Posição x [mm]</b>		<b>0</b>	<b>21,25</b>	<b>42,5</b>	<b>63,75</b>	<b>85</b>	<b>106,25</b>	<b>127,5</b>	<b>148,75</b>	<b>170</b>
<b>Distorção [mm]- Direção longitude</b>	<b>REF</b>	-2,82	0,73	2,62	3,99	4,66	4,75	4,28	3,41	2,59
	<b>C20</b>	-2,36	-1,04	0,96	2,13	2,63	2,61	2,08	1,16	0,51

Fonte O Autor (2019)

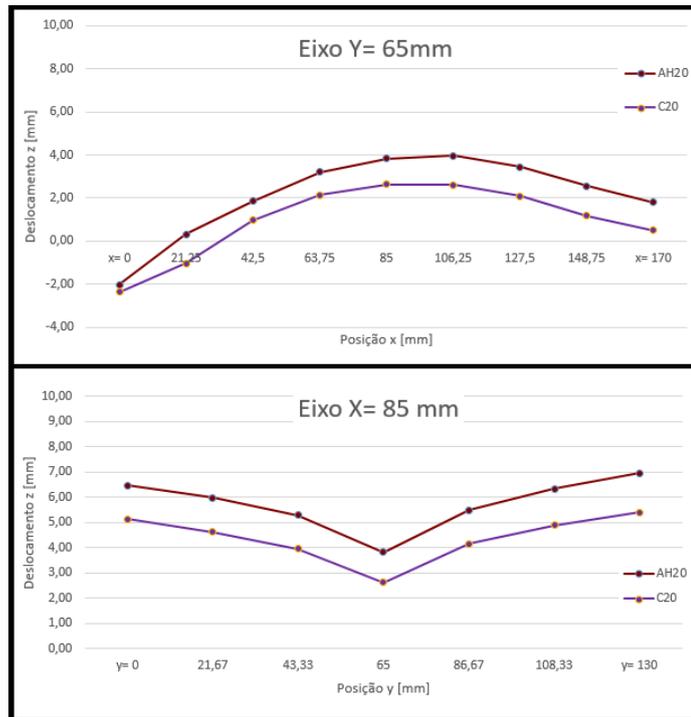
Tabela 6- Distorções dos ensaios REF e C20 na direção latitude

<b>Posição y [mm]</b>		<b>0</b>	<b>21,67</b>	<b>43,33</b>	<b>65</b>	<b>86,67</b>	<b>108,33</b>	<b>130</b>
<b>Distorção [mm]- Direção latitude</b>	<b>REF</b>	-7,89	7,18	6,28	4,66	6,37	7,21	7,84
	<b>C20</b>	5,13	4,63	3,97	2,63	4,15	4,89	5,41

Fonte O Autor (2019)

Com o intuito de averiguar a melhor opção de gás auxiliar para mitigação das distorções nos corpos de prova analisados, a análise comparativa realizada acima também foi utilizada para confrontar os ensaios AH20 e C20, os quais apresentaram os melhores resultados. A Figura 57 reproduz os perfis de distorção para os ensaios AH20 e C20.

Figura 57- Comparativo de perfis de distorção entre os ensaios AH20 e C20



Fonte: O Autor (2019)

Com base na Figura apresentada, percebe-se a maior eficiência do gás  $\text{CO}_2$  utilizado como agente dissipador de calor quando comparado à mistura  $\text{Ar} + 5\% \text{H}_2$ , ambos com vazão de 20l/min. A redução na amplitude de distorção para tais condições é de cerca de 16% na direção longitude e de 11% na direção latitude.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os valores de distorção e suas respectivas reduções em termos percentuais analisando os dois experimentos citados nas direções longitude e latitude, respectivamente. Os valores em vermelho e azul representam, respectivamente, as maiores e as menores reduções de distorção para o perfil analisado.

Tabela 7- Distorções dos ensaios AH20 e C20 na direção longitude

Posição x [mm]		0	21,25	42,5	63,75	85	106,25	127,5	148,75	170
Distorção [mm]- Direção longitude	AH20	-2,03	0,32	1,85	3,20	3,82	3,96	3,44	2,56	1,79
	C20	-2,36	-1,04	0,96	2,13	2,63	2,61	2,08	1,16	0,51

Fonte O Autor (2019)

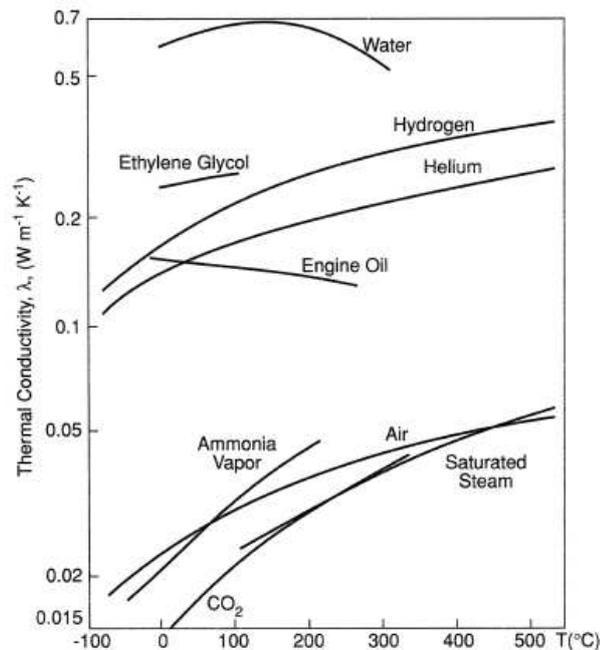
Tabela 8- Distorções dos ensaios AH20 e REF na direção latitude

Posição y [mm]		0	21,67	43,33	65	86,67	108,33	130
Distorção [mm]- Direção latitude	AH20	6,47	5,99	5,29	3,82	5,50	6,33	6,94
	C20	5,13	4,63	3,97	2,63	4,15	4,89	5,41

Fonte: O Autor (2019)

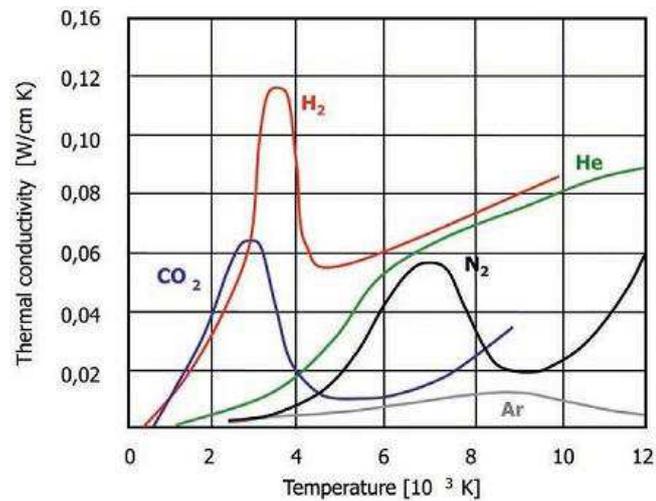
Conforme pode ser observado, o gás auxiliar com maior eficácia na redução das distorções, para as condições estudadas, é o CO<sub>2</sub>. Segundo Kai (2016), a temperatura de fusão do aço inoxidável A304 varia entre 1398°C e 1454°C. Logo, é razoável afirmar que, no instante logo após a soldagem, a temperatura na peça, e conseqüentemente, no gás auxiliar, está abaixo do intervalo citado. Embora o gás hidrogênio possua condutividade térmica maior que o CO<sub>2</sub> em grande parte do intervalo de temperaturas possivelmente atingidas no presente estudo, conforme visto nas Figuras 58 e 59, a pequena fração de hidrogênio na mistura Ar + 5% H<sub>2</sub> pode ter influenciado de modo que tal gás não se apresentasse efetivo em respeito à redução das distorções.

Figura 58- Condutividade térmica de gases no intervalo de temperaturas de 100°C a 500°C



Fonte: TOULOKIAN (1970)

Figura 59- Condutividade térmica de gases no intervalo de temperaturas de 0K a 12000K



Fonte: SARMA (2014)

Além disso, o dióxido de carbono possui uma massa específica maior que o argônio e o hidrogênio nas condições normais de temperatura e pressão. Tal fato indica que dada uma mesma vazão volumétrica de gás, o CO<sub>2</sub> possui maior quantidade de massa efetiva para realizar a troca de calor que o Ar e o H<sub>2</sub>.

Devido ao fato da mistura gasosa Ar + 5% H<sub>2</sub> possuir baixa condutividade térmica, acredita-se que esta seja a razão das distorções terem sido intensificadas quando aplicado tal gás em baixas vazões, indicando a formação de uma possível camada de gás sobre a chapa, a qual influenciou de forma negativa na transferência do calor contido na região soldada.

A fim de realizar uma análise de viabilidade entre custo e benefício destas duas misturas gasosas utilizadas, recorreu-se a fornecedores dos mesmos a fim de se obter o seu custo de aquisição. Como o CO<sub>2</sub> é comercializado por peso e a mistura Ar + 5% H<sub>2</sub> por volume, elaborou-se a Tabela 9 a qual compara os valores de ambos os gases.

Tabela 9- Valor financeiro dos gases estudados

Composição	Volume gás [m <sup>3</sup> ]	Peso gás [kg]	Custo/cilindro [R\$]	Valor [R\$/m <sup>3</sup> ]
CO <sub>2</sub> (pureza mín. 99,99%)	13,57	25,00	250,00	18,42
Ar + 5%H	6,00	9,49	350,00	58,33

Fonte: O Autor (2019)

De tal modo, o dióxido de carbono além de apresentar melhores resultados quanto à redução das distorções, possui menor custo operacional, o que faz do mesmo a melhor opção para se aplicar quando se deseja reduzir as distorções de soldagem nas condições estudadas no presente trabalho.

## 6. CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho, podemos concluir que:

- O dispositivo de aplicação dos gases auxiliares cumpriu com seu objetivo;
- Os perfis de distorção obtidos seguem um padrão único de deformação, independente da vazão e composição do gás;
- A fixação dos corpos de prova influenciou no desenvolvimento dos perfis de distorção observados nos experimentos;
- Os resultados obtidos sugerem que, nas condições estudadas, existe uma vazão ótima (20 L/min) para reduzir as distorções de soldagem;
- O gás CO<sub>2</sub> apresentou-se mais eficaz que a mistura Ar + 5% H<sub>2</sub> com respeito à redução das distorções provenientes da soldagem.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante da realização deste trabalho e com os resultados obtidos, sugere-se como temas para trabalhos futuros:

- Analisar o escoamento dos gases através do *trailing shield* desenvolvido;
- Averiguar o ciclo térmico produzido através da técnica utilizada;
- Investigar o comportamento das tensões residuais geradas ao longo dos corpos de prova;
- Avaliar a efetividade dos gases em temperaturas inferiores à temperatura ambiente;
- Averiguar a autenticidade da hipótese sugerida quanto ao efeito da malha termicamente isolante gerada por gases que possuem baixa condutividade térmica.

## REFERÊNCIAS

ADAK, M.; MANDAL N. R. Numerical and experimental study of mitigation of welding distortion. **Journal Applied Mathematical Modelling**. v. 34, issue 1, p. 146-158, 2010.

ADAMCZUK, P. C. **Análise e previsão da distorção angular na soldagem de juntas a topo em aço estrutural**. 243 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ADAMS JR, C.M. "**Cooling rates and peak temperatures in fusion welding**", *Welding Journal*, Maio 1958, pp. 210s-215s.

AMARAL, D.; ESTEFEN, S. Distorções de Fabricação na Construção Naval e Offshore. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS. 2 a 5 de outubro, Salvador, **Anais...** 2005.

AMERICAN WELDING SOCIETY, **Welding Handbook**, vol. 1, 8ª Ed., AWS, Miami, 1987.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AÇO INOXIDÁVEL**. São Paulo. Ed. Grips, n. 43, maio/agosto, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CONSTRUTORES DE BARCOS E SEUS IMPLEMENTOS. **Indústria náutica brasileira: fatos e números 2005**. Relatório Anual. 2005.

BRASIL. Ministério do Turismo. **Turismo náutico: orientações básicas**. Coordenação Geral de Segmentação 2. ed. Brasília: Ministério do Turismo, 2008. Disponível em: <[http://www.turismo.gov.br/sites/default/turismo/o\\_ministerio/publicacoes/downloads\\_publicacoes/Turismo\\_Nxutico\\_Versxo\\_Final\\_IMPRESSxO\\_.pdf](http://www.turismo.gov.br/sites/default/turismo/o_ministerio/publicacoes/downloads_publicacoes/Turismo_Nxutico_Versxo_Final_IMPRESSxO_.pdf)>. Acesso em: 29 set. 2017.

CATARINA, A. S.; MATHIAS, E. Mapeamento do mercado náutico de lazer de Santa Catarina. In: V SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 24 a 26 de maio, Joinville, **Anais...** 2017.

ÇENGEL, Yunus A.. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática**. 4. ed. São Paulo: Mcgraw Hill, 2012.

COFIÑO, R. C. **Análise das tensões residuais em uma junta soldada em condição overmatch**. 2010. 81 f. TCC (Graduação) Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário, Fundação Educacional Inaciana. São Bernardo do Campo, 2010.

CUNHA, T.V. **Desenvolvimento e avaliação de tecnologia para soldagem TIG com pulsação ultrassônica**. 266 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-

graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

ERICSSON, T. Residual stresses caused by thermal and thermochemical surface treatments. In: NIKU- LARI, A. **Advances in surface treatments**. Oxford. Editora Pergamon. 1987. p 87- 113. v. 4.

HILSRATH, Joseph et al. **Tables of thermal properties of gases**: Comprising tables of thermodynamic and transport properties of air, argon, carbon dioxide, carbon monoxide, hydrogen, nitrogen, oxygen and steam. Washington: Govt. Print. Off, 1955. 488 p.

KAI, X.; SHU-QUAN, Z.; ZHENG-LAI, Q. Numerical Simulation Research on Welding Temperature Field of 304 Stainless Steel. In: INTERNATIONAL FORUM ON MECHANICAL, CONTROL AND AUTOMATION, 1., 2016, Wuhu. **Paper**. Shenzhen: Atlantis Press, 2016. p. 1 - 5.

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

MANDAL, N. R. **Welding Techniques, distortion control and line heating**. New Delhi: Narosa Publishing House. 2009. 220 p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2009.

MASUBUCHI, K. **Analysis of welded structures**: Residual stresses, distortion and their consequences. Massachusetts: . Pergamon Press, 1980. v. 33.

MOCHIZUKI M.; TOYODA M. Welding distortion control during Welding process with reverse- side heating. **Journal of Engineering Materials and Technology**. v. 129, issue 2, p. 265-270, 2006.

MODENESI, P. J. **Efeitos mecânicos do ciclo térmico**. 2001. 24 p. Apostila (Graduação) - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2001.

MOURA, D. A.; BOTTER, R. C. Uma visão geral do segmento de construção náutica, turismo e lazer no Brasil. In: XXII CONGRESSO PANAMERICANO DE INGENIERÍA NAVAL, TRANSPORTE MARÍTIMO E INGENIERÍA PORTUARIA. 27 a 30 de setembro, Buenos Aires, **Anais...** 2011.

Murphy A.B., Lowke J.J. **Heat Transfer in Arc Welding**. In: Kulacki F. (eds) Handbook of Thermal Science and Engineering. Springer, Cham. 2018.

LOWKE J. J. et al. Prediction of gas tungsten arc welding properties in mixtures of argon and hydrogen. **Journal Transactions on Plasma Science**, v. 25, n. 5, p. 925-930, 1997.

RIBEIRO, João Carlos Rodrigues dos Santos. **Análise de tensões residuais e deformações em soldadura**. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 2010.

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

SARMA D. Improving GMAW efficiency through shielding gases. **Welding Journal**, Miami, 2014.

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

SHEN, C. **Low distortion welding for shipbuilding industry**. University of Wollongong Thesis Collection, 2013.

SOUZA, D. A. **Determinação de tensões residuais em materiais metálicos por meio de ensaio de dureza**. 2012. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei. São João Del-Rei, 2012.

SUBAN, M.; TUŠEK, J.; URAN, M. Use of hydrogen in welding engineering in former times and today. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 119, issues 1–3, p. 193–198. 2001.

SUDHEESH, R. S.; PRASAD, N. S. Comparative study of heat transfer parameter estimation using inverse heat transfer models of a trailing liquid nitrogen jet in welding". **Heat Transfer Engineering**. v. 36, issue 2, p. 178-185, 2015.

TANAKA, M. et al. Influence of shielding gas composition on arc properties in TIG welding. **Journal Science and Technology of Welding and Joining**. v. 13, p. 225-231, 2008.

TSENG, K. H.; CHOU, C. P. Effects of pulsed gas tungsten arc welding on angular distortion in austenitic stainless steel weldments. **Journal: Science and Technology of Welding and Joining**. v. 6, p. 149-153, 2013.

TSENG, K. H.; CHOU C. P. The study of nitrogen in argon gas on the angular distortion of austenitic stainless steel weldments. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 142, p. 139-144, 2003.

TOULOKIAN, Y.; LILEY P.; SAXENA S. **Thermophysical properties of matter: Thermo-physical properties of matter**. The TRPC Data Series. 3. ed. Nova Iorque: IFI/plenum, 1970.

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

WELLS, A.A. "**Heat flow in welding**", *Welding Journal*, Maio 1952, pp. 263s-267s.