

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

Henrique Ferreira de Mello

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS GASES DE PROTEÇÃO NO  
PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG SOBRE DISTORÇÕES DE  
CHAPAS DE AÇO

Joinville, 2015

Henrique Ferreira de Mello

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS GASES DE PROTEÇÃO NO  
PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG SOBRE AS DISTORÇÕES DE  
CHAPAS DE AÇO

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: Dr. Tiago Vieira da Cunha

Joinville, 2015

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe Mirian Rosani Ferreira de Mello e pai Ângelo Ferreira de Mello, por todo amor, suporte, paciência e aprendizados proporcionados em todos os momentos de minha vida.

Ao meu irmão, Rafael Ferreira de Mello, pelo companheirismo, apoio e afeto desenvolvidos nos últimos 21 anos.

À minha namorada, Jaciara Fernandes Dörner, pelo amor, carinho e incentivos neste último ano.

Ao meu orientador Tiago Vieira da Cunha, pelo grande apoio durante todo trabalho e por despertar em mim o gosto pela soldagem.

Aos meus amigos de longa data de Jaraguá do Sul, pelos diversos momentos de muita alegria e companheirismo.

Às minhas amigas na UFSC, as quais me proporcionaram momentos inesquecíveis, tanto academicamente como pessoalmente.

Aos meus colegas da empresa júnior ESATI e projeto Barco Solar Babitonga pelo grande crescimento pessoal e profissional e oportunidade criadas.

À Embraco e Lincon Schafranski, que cederam equipamentos, materiais, tempo e conhecimento essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

À UFSC e seus fantásticos profissionais, que me concederam a oportunidade de uma formação de ponta.

## RESUMO

A indústria naval brasileira, devido aos crescentes investimentos principalmente no setor de petróleo e gás, encontra-se hoje em grande expansão com a construção de plataformas e embarcações de apoio a este setor. Os estaleiros brasileiros, para tornarem-se competitivos nesse cenário devem, portanto, apresentar constantes evoluções em seus processos. Visando ganho de produtividade, o processo de construção de embarcações é realizado pelo método de construção em blocos. Este consiste em montar a embarcação em várias partes, produzidas em suas oficinas para, posteriormente, serem unidos no picadeiro ou carreira para compor a embarcação como um todo. Estes blocos, em sua grande maioria, são fabricados a partir de chapas de aço enrijecidas reforçadas por vigas transversais e longitudinais, unidas por soldagem. Em estaleiros, o retrabalho durante a construção de embarcações é um fator a ser evitado, pois agrega custos adicionais e diminuição da produtividade. Uma grande fonte desses retrabalhos é, justamente, o problema de distorções nos painéis enrijecidos que compõem os blocos da embarcação. As distorções, causadas pelo aquecimento desigual dos painéis durante a soldagem, dificultam a posterior junção dos blocos devido à falta de alinhamento das partes. Deste modo, estes desvios na forma de projeto dos painéis necessitam ser corrigidos, implicando em maior tempo de trabalho. Desta forma, se torna pertinente o estudo dos efeitos que o processo de soldagem exerce sobre as distorções de estruturas metálicas. Neste contexto, o presente trabalho tem por intuito analisar a influência de diferentes composições de gases de proteção no processo MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas) sobre as distorções de um modelo de corpo de prova em aço carbono ASTM A 569. Neste estudo foram realizados ensaios com as composições de gases de proteção Ar puro, Ar+5%O<sub>2</sub>, Ar+20%CO<sub>2</sub>+5%O<sub>2</sub>, Ar+15%CO<sub>2</sub> e Ar+8%CO<sub>2</sub>. Os resultados indicaram a inexistência de qualquer efeito sobre as distorções oriundas da soldagem dentre os gases de proteção utilizados nos ensaios, evidenciando que a energia de soldagem é um fator determinante sobre estas.

**Palavras chave:** Distorções, Gases de proteção, MIG/MAG, Construção naval.

## ABSTRACT

The Brazilian naval industry, mainly due to increasing investments in the oil and gas sector, is now booming with the construction of platforms and support vessels in this sector. To become competitive in this scenario, the Brazilian shipyards should therefore provide constant upgrades in its processes. In order to gain in productivity, the vessel construction process is performed by the method of block building. This is, to assemble the craft in various parts, produced in their workshops, to later be joined in the drydock to render the vessel as a whole. These blocks, for the most part, are made from hardened steel plates reinforced by transverse and longitudinal beams, joined by welding. In shipyards, rework during construction vessels is a factor to be avoided because it adds additional costs and decreased productivity. A major source of these reworks is precisely the problem of distortions in stiff panels that make up the building blocks of the vessel. The distortions caused by uneven heating of the panels during welding, hinder the subsequent joining of the blocks due to misalignment of parts. Thus, these deviations in the design of the panels so need to be corrected, resulting in longer working time. Thus, it is pertinent to study the effects that the welding process has on the distortion of metal structures. In this context, this study is meant to examine the influence of different protective gas compositions in the MIG / MAG process (Metal Inert Gas / Metal Active Gas) on the distortions of a specimen model of carbon steel ASTM A 569. This study tests performed with the protective gas compositions of pure Ar, Ar+5%O<sub>2</sub>, Ar+20%CO<sub>2</sub>+5%O<sub>2</sub>, Ar+15%CO<sub>2</sub> and Ar+8%CO<sub>2</sub>. The results indicated that there is no effect on the distortions arising from the welding shielding gases used in the tests, showing that the welding power is a determining factor on these.

**Keywords:** Distortions, Protective gases, MIG/MAG, Shipbuilding.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS – Associação Brasileira de Soldagem

AWS – American Welding Society

CF – Calor efetivo de Fusão (J/mm)

CI – Calor Imposto (J/mm)

DBCP – Distância entre o bico de contato e a peça (mm)

E – Energia de Soldagem (J/mm)

i – Corrente instantânea (A)

MIG/MAG – Metal Inert Gas / Metal Active Gas

PROMEF – Programa de Modernização e Expansão da Frota

SAP – Sistema de Aquisição de Dados

SINAVAL - Sindicato Nacional da Indústria da Construção e Reparação Naval e Offshore

u – Tensão instantânea (V)

$v_s$  – Velocidade de soldagem instantânea

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

$\eta_{\text{fusão}}$  – Rendimento de fusão

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Potencial de ionização de gases e vapores metálicos em eletron volts (eV) .....	24
Tabela 2: Gases de proteção utilizados e suas respectivas nomenclaturas conforme a AWS .....	31
Tabela 3: Propriedades químicas do aço ASTM A569 (percentagem em massa).....	32
Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço ASTM A569 .....	32
Tabela 5: Parâmetros encontrados nos testes preliminares .....	38
Tabela 6: Dados de valores ajustados, resultados obtidos dos ensaios e energia de soldagem calculada .....	39
Tabela 7: Valores de distorção obtidos, por vértice.....	40
Tabela 8: Módulos dos vértices e média geral das distorções de cada composição de gás de proteção ensaiada.....	45

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Painel enrijecido. a) Reforço transversal b) Reforço longitudinal .....	11
Figura 2: Junção de bloco ao restante da embarcação .....	12
Figura 3: Método de construção de blocos, com a representação do painel enrijecido indicado em uma de suas etapas. ....	15
Figura 4: Painel enrijecido. a) Reforço transversal b) Reforço longitudinal .....	16
Figura 5: Distorção causada pelo processo de soldagem .....	16
Figura 6: Exemplo da geometria complexa de um bloco da embarcação .....	17
Figura 7: Representação genérica da distribuição de temperaturas de arco de soldagem ...	18
Figura 8: Esquema de três barras, com aquecimento da barra central.....	19
Figura 9: Formas de distorção.....	20
Figura 10: Esquema das regiões do arco elétrico. Indicação das manchas catódicas em destaque. ....	21
Figura 11: Condutividade de gases x Temperatura.....	26
Figura 12: Transferência metálica e penetração do cordão de solda: (a) Hélio; (b) Argônio. 27	
Figura 13: Bancada de testes a) Fonte de soldagem com sistema de aquisição de dados de soldagem embutido b) Sistema de movimentação mecanizado da tocha c) Cilindro do gás de proteção d) Unidade portátil de refrigeração e) Tocha de soldagem.....	29
Figura 14: Tocha de soldagem do processo MIG/MAG. a) Saída de gás de proteção b) Entrada de água fria c) Saída de água quente d) Entrada de arame .....	30
Figura 15: Modelo de corpo de prova. a) vista superior e b) vista lateral.....	33
Figura 16: Posicionamento do corpo de prova para a medição das distorções.....	34
Figura 17: Procedimento de medição do corpo de prova .....	35
Figura 18: Procedimento de medição da DBCP.....	35
Figura 19: Corpo de prova posicionado para o ensaio.....	36
Figura 20: Corpo de prova alinhado com tocha de soldagem para ensaio.....	37
Figura 21: Valores de distorção obtidos nos ensaios com diferentes composições de gases de proteção a) Argônio b) Ar+15%CO <sub>2</sub> c) Ar+5%O <sub>2</sub> d) Ar+8%CO <sub>2</sub> e) Ar+20%CO <sub>2</sub> +5%O <sub>2</sub>	41
Figura 22: Padrões criados, identificando as diagonais de maior e menor distorção. a) Padrão 1-3 b) Padrão 2-4 .....	42
Figura 23: Valores de distorções médias dos padrões 1–3 e 2–4 obtidos nos ensaios com diferentes composições de gases de proteção. a) Argônio b) Ar+15%CO <sub>2</sub> c) Ar+5%O <sub>2</sub> d) Ar+8%CO <sub>2</sub> e) Ar+20%CO <sub>2</sub> +5%O <sub>2</sub> .....	43



Figura 24: Operações realizadas para soma das médias dos padrões de distorção.....	44
Figura 25: Soma de padrões de distorção, resultando no novo padrão de análise. ....	44
Figura 26: Valores de distorções global obtidos nos ensaios com diferentes composições de gases de proteção.....	44
Figura 27: Cordões de solda realizados com a) Argônio b) Ar+15%CO <sub>2</sub> c) Ar+5%O <sub>2</sub> d) Ar+8%CO <sub>2</sub> e) Ar+20%CO <sub>2</sub> +5%O <sub>2</sub> .....	47

## Sumário

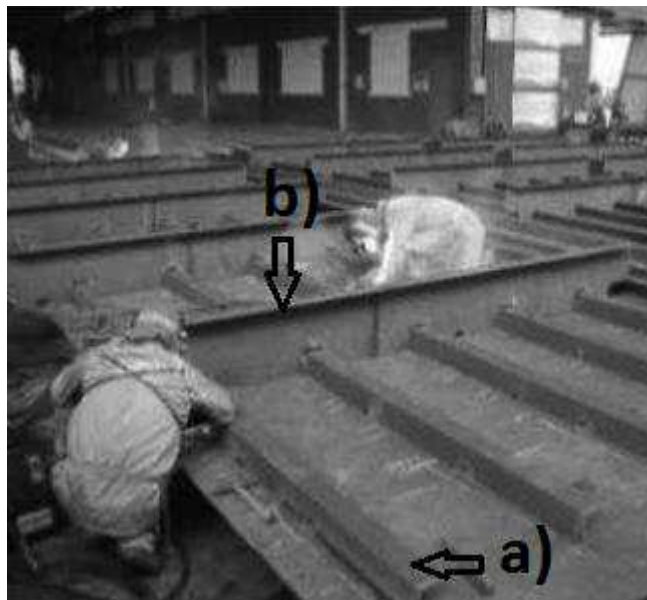
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1.OBJETIVO PRINCIPAL .....	14
1.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1.BLOCOS E PAINÉIS ENRIJECIDOS .....	15
2.2.DISTORÇÕES.....	17
2.3.ENERGIA DE SOLDAGEM .....	20
2.4.GASES DE PROTEÇÃO .....	23
2.4.1. Potencial de ionização .....	23
2.4.2. Dissociação .....	25
2.4.3. Condutividade térmica .....	25
2.4.4. Potencial de oxidação.....	28
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>29</b>
3.1.BANCADA DE ENSAIOS.....	29
3.2.REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS .....	33
3.2.1. Ensaio Preliminares .....	37
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>39</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>48</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>50</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Embarcações de grande porte, em sua grande maioria, são fabricadas pelo método de construção de blocos. Neste, grandes partes da embarcação, chamadas de blocos, são construídas separadamente e unidas posteriormente no picadeiro, para compor a embarcação. Dessa forma é possível trabalhar na montagem dos blocos de forma simultânea em diferentes oficinas, ganhando em tempo de produção e garantindo maior disponibilidade do picadeiro.

Em sua grande parte, os blocos da embarcação são compostos por painéis enrijecidos, produto intermediário da construção destes. Estes painéis são compostos por chapas de metal enrijecidas por reforços transversais e longitudinais, conforme pode ser visto na Figura 1. Durante seu processo construtivo, basicamente utilizam-se os processos de corte e soldagem. Porém, o calor introduzido pela soldagem dos painéis enrijecidos causa gradientes de temperatura sobre estes, gerando distorções e tensões residuais na peça.

Figura 1: Painel enrijecido. a) Reforço transversal b) Reforço longitudinal



Fonte: Souza (2013)

Quando estas partes intermediárias apresentam demasiadas distorções e as montagens divergem da geometria de projeto, criam-se dificuldades na composição dos blocos. Correções passam a ser necessárias para adaptar os blocos às formas desejadas, gerando assim retrabalho e postergando a entrega da embarcação.

Segundo Andersen (2000), o retrabalho gerado pelas distorções aumenta o tempo total de construção da embarcação em aproximadamente 30%. Visto isso, é necessário um bom controle da precisão destes painéis enrijecidos e sub-montagens. A Figura 2 demonstra a montagem de um bloco ao restante da embarcação, dando uma ideia da importância da precisão em sua fabricação.

Figura 2: Junção de bloco ao restante da embarcação



Fonte: Amante (2006)

Os gases de proteção usados no processo de soldagem *MIG/MAG* têm como principais funções proteger a poça de fusão e de proporcionar estabilidade ao arco elétrico. No entanto, diferentes materiais, seja em função da sua composição química ou geometria, e condições de soldagem, podem conduzir a necessidade de utilização de gases com composições químicas diferentes visando a obtenção de resultados específicos. A simples alteração da composição química dos gases de soldagem pode resultar em cordões com diferentes geometrias (largura, penetração, reforço), influenciar na estabilidade do arco, no modo de transferência do material de adição, além do aporte térmico. Desta forma, a escolha do gás de proteção tem

papel fundamental sobre a qualidade do cordão e calor introduzido à peça e, conseqüentemente, na geração de distorções.

Sociedades classificatórias podem reprovar estruturas com tensões residuais excessivas e distorções demasiadamente grandes. O retrabalho necessário à correção destes problemas amplia custos e o tempo de fabricação da embarcação. Vista a necessidade do aumento da qualidade no setor para competir com o exterior, tornam-se necessário para os estaleiros os estudos que contribuam para a diminuição dos retrabalhos.

### 1.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Identificar a influência de cinco diferentes composições de gases de proteção sobre as distorções obtidas em corpos de prova confeccionados em aço carbono na soldagem de filete.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

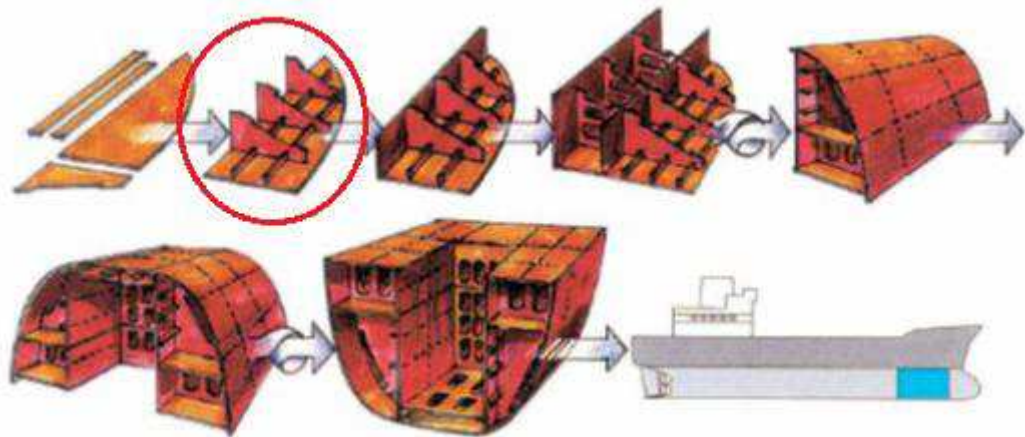
- Quantificar as distorções resultantes das soldagens com estas cinco diferentes composições de gás de proteção.
- Comparar as distorções obtidas com estes diferentes gases de proteção.
- Identificar padrões de distorções obtidos.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. BLOCOS E PAINÉIS ENRIJECIDOS

Na indústria naval, o método mais empregado na construção de embarcações de grande porte é o de blocos. Este consiste na fabricação simultânea de divisões da embarcação, unido-as posteriormente para compor o tamanho final da embarcação. O processo permite além da construção simultânea e, conseqüente, maior disponibilidade do picadeiro, a fabricação em escala de produtos intermediários semelhantes. A evolução da montagem por blocos pode ser vista na Figura 3.

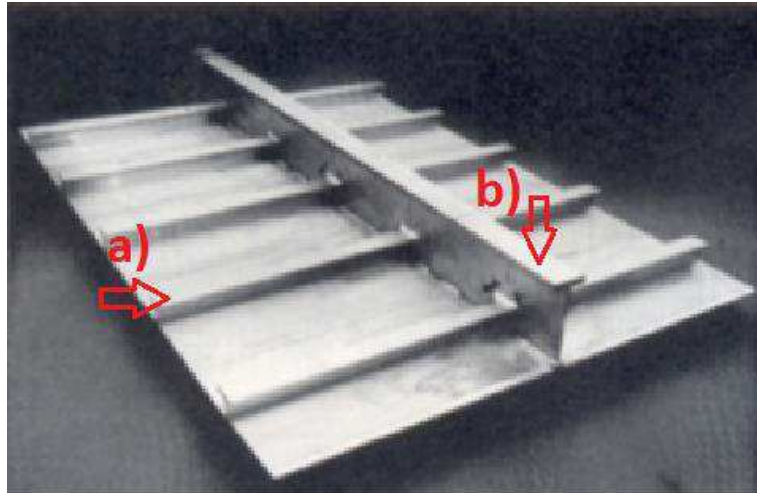
Figura 3: Método de construção de blocos, com a representação do painel enrijecido indicado em uma de suas etapas.



Fonte: Andersen (2000)

Um dos produtos intermediários do bloco, conforme indicado na Figura 3, é o painel enrijecido. Este sub-produto passa a compor o bloco em montagens posteriores. Basicamente, os painéis enrijecidos consistem em chapas metálicas enrijecidas por reforços longitudinais e transversais, os quais são unidos pelo processo de soldagem. Segundo Melo (2006), cerca de 50% do aço utilizado na indústria naval é aplicado na fabricação destas estruturas. A Figura 4 apresenta o painel enrijecido.

Figura 4: Painel enrijecido. a) Reforço transversal b) Reforço longitudinal



Fonte: Andersen (2000)

Porém, o processo de soldagem acarreta em entrega de calor à peça. Este calor por sua vez, acaba por introduzir distorções e tensões residuais ao painel enrijecido. Um caso de distorção causado por soldagem pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Distorção causada pelo processo de soldagem

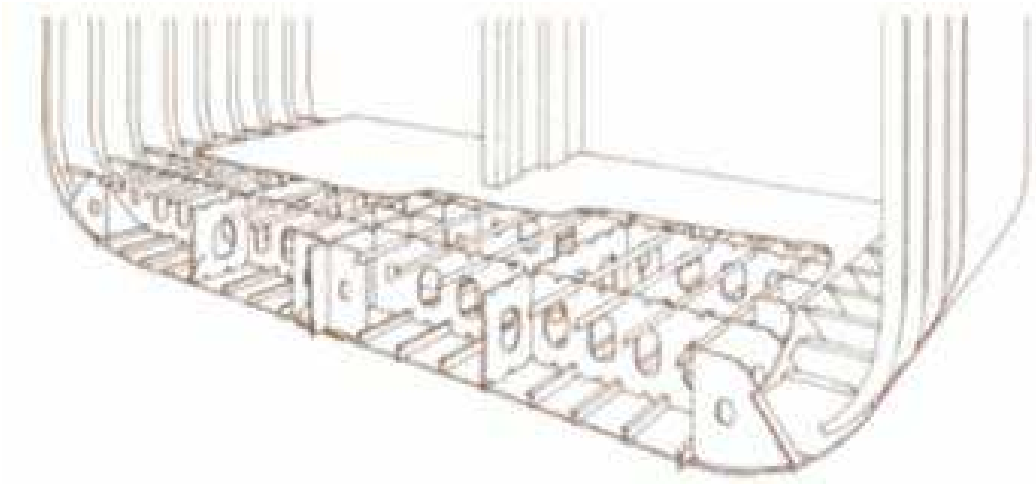


Fonte: Souza (2013)

Quando divergências da forma de projeto são introduzidas em partes e subpartes de um bloco, a própria construção deste bloco fica prejudicada. Isso se deve à dificuldade de se realizar a junção destes componentes, visto a geometria complexa que um bloco possui. Desvios demasiadamente grandes necessitam de retrabalho para a realização adequada das partes, implicando em aumento de horas-homem e atraso na entrega da embarcação. A Figura 6 apresenta um exemplo da geometria de um bloco.



Figura 6: Exemplo da geometria complexa de um bloco da embarcação



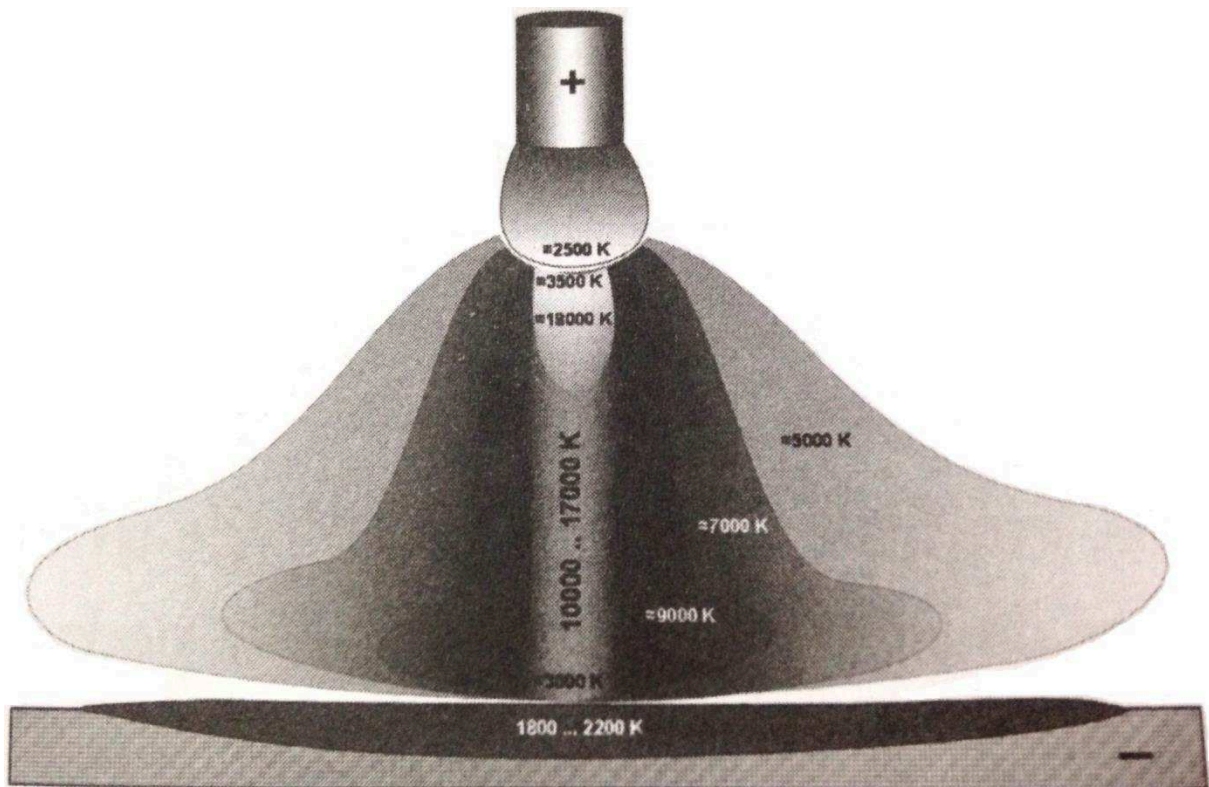
Fonte: Amante (2006)

## 2.2. DISTORÇÕES

As distorções representam quantitativamente o afastamento de uma superfície real daquela desenvolvida na etapa de projeto. Em um estaleiro, a principal causa disto é o processo de soldagem utilizado para a união das estruturas metálicas, devido à adição inerente de calor dada por este.

Segundo Scotti (2008), durante a soldagem ocorre o aquecimento da região de união, submetendo a peça a temperaturas que giram em torno de 1800K a 2200K, conforme pode ser visto na representação das temperaturas do processo MIG/MAG da Figura 7. Ressalta-se que as temperaturas mencionadas dependem de vários fatores como o gás de proteção utilizado, comprimento do arco, intensidade de corrente, velocidade de alimentação de arame, entre outros, e por isso são apresentadas em intervalos.

Figura 7: Representação genérica da distribuição de temperaturas de arco de soldagem

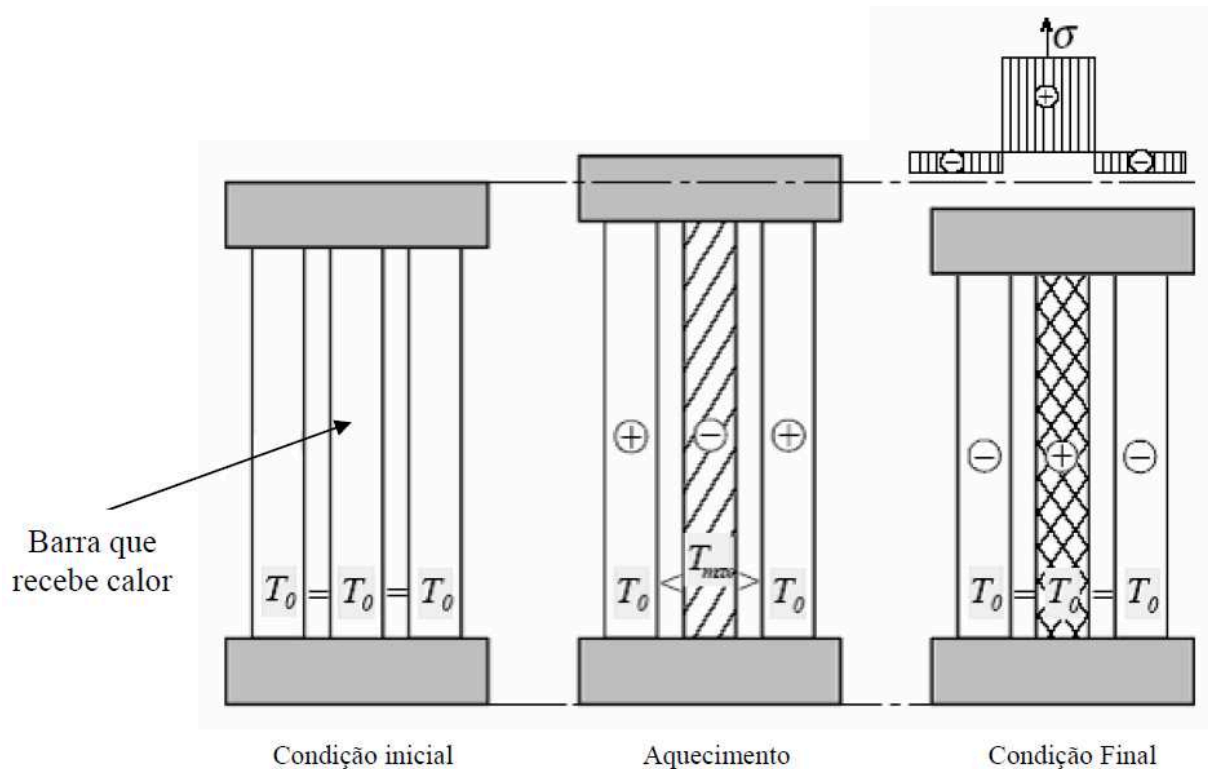


Fonte: Scotti, A. (2008)

Esta região aquecida pela soldagem sofre expansões térmicas, porém, parte desta é restringida pelas regiões frias do restante da peça, gerando campos de tensões complexos. Durante o processo, o limite de escoamento do metal diminui e as tensões sofrem um aumento relativo a altas temperaturas. Resultado disso é a deformação plástica na zona de soldagem. Após a soldagem, as deformações plásticas permanecem parcialmente e entram em equilíbrio elástico com a região adjacente, produzindo tensões residuais (OKUMURA; TANIGUSHI, 1982). Este processo é exemplificado por Modenesi (2001) e Amante (2006) através de um esquema de três barras, onde estas possuem o mesmo comprimento e têm suas extremidades presas a bases comuns (Figura 8). Calor é fornecido somente à barra central, resultando em sua expansão térmica. Como as barras laterais não receberam aporte de calor, estas não expandirão da mesma forma que a barra central, portanto, oferecendo resistência a este movimento. Esta resistência, por sua vez, gera tensões de tração na barra central e de compressão nas barras laterais. Após a suspensão do fornecimento de calor, a barra central passa a contrair com a diminuição da temperatura, o que é novamente restringido pelas barras laterais.

Desta forma, a barra central sofrerá tensões de tração, enquanto as barras laterais sofrerão tensões de compressão. Quando as três barras alcançarem a temperatura ambiente, apresentarão um encolhimento (deformação plástica) e tensões residuais para equilíbrio das forças internas.

Figura 8: Esquema de três barras, com aquecimento da barra central.



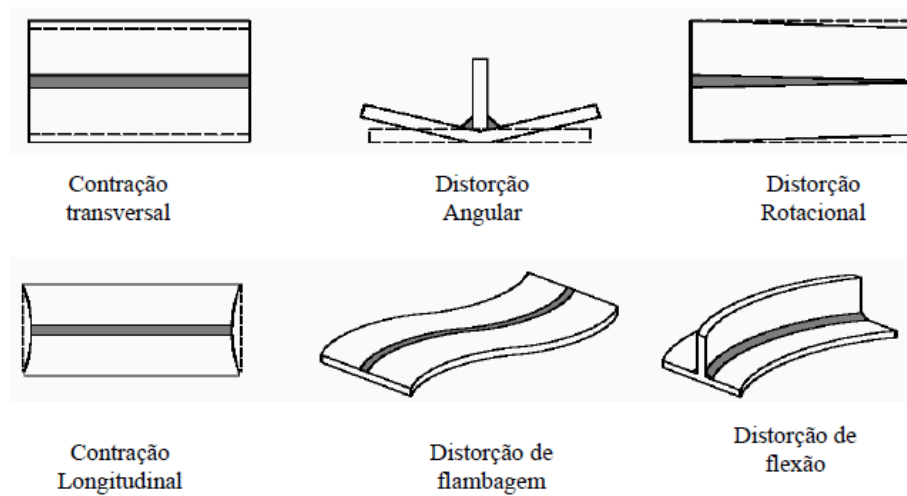
Fonte: Amante (2006)

Segundo Masubuchi (1991), existem seis tipos de fundamentais de distorções:

- Contração transversal;
- Distorção angular;
- Distorção rotacional;
- Contração longitudinal;
- Distorção de flambagem;
- Distorção de flexão.

Os tipos de distorções podem ser observados na Figura 9.

Figura 9: Formas de distorção



Fonte: Amante (2006)

De acordo com Dydo (1999), as distorções mais importantes na indústria naval, e as que ocorrem com maior frequência, são as de flambagem e as angulares. As distorções angulares são encontradas em painéis enrijecidos, visto que estes possuem os reforços unidos em solda por filete. Diante dos vários modelos de distorções, os que ocorrem com maior frequência em painéis de seção fina são as distorções de flambagem. Segundo Masubuchi (1991), na prática, mais de uma das formas de distorção apresentadas na Figura 9 podem estar presentes em uma peça, sendo difícil fazer a distinção entre as mesmas.

As distorções implicam em uma série de problemas na indústria naval, sendo os principais citados abaixo:

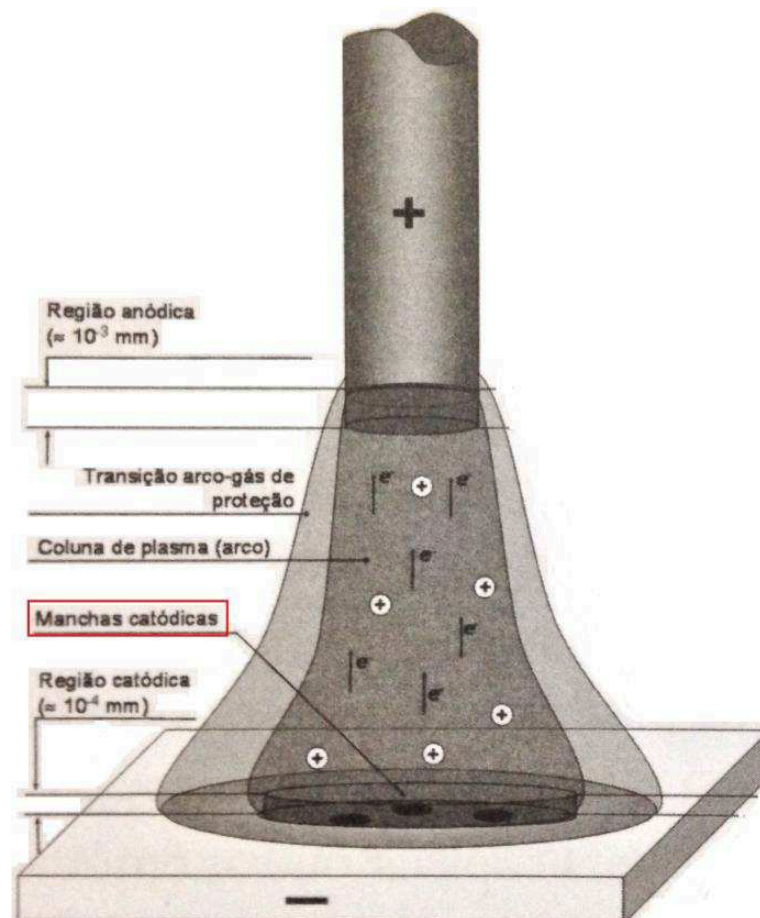
- Redução de eficiência durante a construção da embarcação;
- Necessidade de retrabalho nas estruturas soldadas;
- Imprecisão no formato final da embarcação;
- Aumento dos custos totais de fabricação;
- Maior tempo total de projetos;
- Desalinhamento de componentes estruturais.

### 2.3. ENERGIA DE SOLDAGEM

Durante o processo de soldagem, o arco elétrico gera uma grande quantidade de calor. Este calor pode ser introduzido à peça de duas formas. A primeira se dá

pelo acoplamento entre o arco elétrico com a peça a ser soldada, que acontece através das manchas catódicas (Figura 10). É nestas manchas que ocorrem concentrações de corrente, grandes quedas de tensão e uma elevada geração de calor. O calor gerado neste processo é transferido à peça por meio de condução, sendo que uma parte dele é utilizado para fundir o material de adição e de base e outra parte é difundida para o material na vizinhança da zona fundida. Outra forma de introdução de calor à peça é através da entalpia dos gases de proteção. Neste caso, o calor é transferido à peça por meio de convecção forçada, por meio de um jato incidindo sobre a mesma. Entalpia é definida como a energia absorvida (processo endotérmico) ou perdida (processo exotérmico) em uma reação. Neste caso, a entalpia representa a energia absorvida no gás de proteção quando este passa do estado gasoso para o plasmático. Quando o gás retorna ao estado gasoso, este libera este calor para a peça (SCOTTI, 2008).

Figura 10: Esquema das regiões do arco elétrico. Indicação das manchas catódicas em destaque.



Fonte: Scotti, A. (2008)

Segundo Scotti (2008), a energia de soldagem ( $E$ ) pode ser definida como a relação entre a potência elétrica gasta para manter um arco, dividido pela velocidade de soldagem (Equação 1). Nota-se que os valores de tensão de arco ( $u$ ), corrente de soldagem ( $i$ ) e velocidade de soldagem ( $v_s$ ) são instantâneos.

$$E = \sum \frac{u \cdot i}{v_s} \quad (1)$$

Apesar disso, nem toda essa energia é transferida à peça, pois parte da energia de soldagem se perde para o meio ambiente. Dessa forma, para se obter a energia efetivamente transferida à peça, denominada calor imposto ( $CI$ ), é necessário descontar essa parcela perdida, caracterizada pela eficiência térmica ( $\eta_{t\acute{e}rmico}$ ). A Equação 2 apresenta o calor imposto à peça.

$$CI = \left( \sum \frac{u \cdot i}{v_s} \right) \cdot \eta_{t\acute{e}rmico} \quad (2)$$

Por fim, caracteriza-se a energia utilizada para a fusão do material, descontando-se parte da energia que é transferida às regiões vizinhas à poça de fusão. Assim, o rendimento de fusão ( $\eta_{fusão}$ ) corrige o valor de  $CI$  para chegar à parcela de calor utilizada efetivamente na fusão, chamado de calor efetivo de fusão ( $CF$ ). Esta operação é retratada na Equação 3.

$$CF = \left( \sum \frac{u \cdot i}{v_s} \right) \cdot \eta_{t\acute{e}rmico} \cdot \eta_{fusão} \quad (3)$$

Segundo Scotti (2008), o rendimento térmico tem relação com a geometria do arco e propriedades dos gases de proteção, principalmente sobre a capacidade de troca de calor destes.

As distorções são causadas pelo gradiente de temperaturas que acontecem devido ao aquecimento desigual imposto pelo processo de soldagem, o que nos remete à energia que provoca essa condição. Estudos de Masubuchi (1984) indicam que um aumento de apenas 1% da energia de soldagem durante a soldagem pode gerar uma distorção de até 25% maior. Porém, este valor deve ser tratado com

cautela, visto que as distorções dependem de outros fatores, como geometria da peça, tipo da junta, propriedades do metal base, quantidade de restrições e processo utilizado. Posto isso, o aporte térmico à peça tem um papel decisivo sobre a distorção causada nela.

## 2.4. GASES DE PROTEÇÃO

No processo MIG/MAG, o gás de proteção, além de proteger a região que está sendo soldada contra a contaminação pelo ar atmosférico, exerce uma influência marcante na estabilidade do processo de soldagem, nas características operacionais, nas características geométricas do cordão e nas propriedades do metal depositado (LIAO; CHEN, 1998). O gás de proteção possui, portanto, importante papel durante a execução do processo, influenciando diretamente a qualidade do cordão de solda, além de determinar a eficiência térmica na transferência do calor à peça. Assim, identificar a composição ideal do gás de proteção para uma dada aplicação é requisito essencial, considerando as propriedades dos cordões de solda almejadas e o custo envolvido na operação.

### 2.4.1. Potencial de ionização

A ionização de um gás ocorre quando seus átomos recebem energia suficiente para que os elétrons localizados numa determinada órbita passem para órbitas de maior energia. Dependendo da quantidade de energia recebida estes elétrons podem ou não sair da influência do campo eletromagnético do átomo, tornando-se um elétron livre (WAINER, 2004). Átomos que possuem déficit ou excesso de elétrons são chamados de íons. Assim, a ionização também pode ser vista como um processo químico que resulta em íons que não existiam anteriormente e elétrons livres. A facilidade com que este fenômeno ocorre é definida através do potencial de ionização do gás de proteção. Segundo Wainer (2004) o potencial de ionização é a energia necessária para produzir um elétron livre, ou seja, para retirar este elétron de sua camada de valência. Durante o processo de soldagem, existe uma atmosfera complexa, composta por gases de proteção, metais vaporizados e fluxos. A facilidade de ionização destes elementos

implica diretamente sobre fatores como abertura do arco elétrico, condução elétrica através do arco e estabilidade do arco. (TESKE, 2006 apud LINNERT,1994)

Lancaster (1986) apresenta em seu livro os potenciais de ionização de alguns materiais (Tabela 1). Os potenciais de cada material são apresentados nas linhas, sendo que as colunas apresentam o estágio da ionização, ou seja, a quantidade de elétrons perdidos. Nota-se que nem todos os materiais possuem valores em todos os estágios, devido à falta de elétrons na camada de valência de alguns. Além disso, percebe-se que à medida que cresce o estágio de ionização, a energia necessária para se retirar um elétron cresce. Justificativa disso é que, conforme o átomo perde elétrons, a atração do núcleo àqueles que restaram cresce. Por fim, verificou-se que elementos de camada de valência mais distante ao núcleo, como o Césio (camada de valência P ou 6), apresentaram potenciais menores do que elementos com camadas de valência mais próximas, como é o caso do Hélio (Camada de valência K ou 1), 3,893eV contra 24,58eV, respectivamente.

Tabela 1: Potencial de ionização de gases e vapores metálicos em eletron volts (eV)

Potencial de Ionização (eV)						
Elemento	Estágio de ionização*					
	I	II	III	IV	V	VI
Alumínio	5,984	18,823	28,44	119,96	153,77	190,42
Argônio	15,755	27,62	40,90	59,79	75,0	91,3
Cálcio	6,111	11,87	51,21	67	84,39	
Carbono	11,264	24,376	47,864	64,476	391,986	498,84
Césio	3,893	25,1				
Hélio	24,580	54,40				
Hidrogênio	13,595					
Ferro	7,90	16,18	30,64			
Criptônio	13,99	24,56	36,9			
Magnésio	7,644	15,03	80,12	109,29	141,23	186,86
Mercúrio	10,44	18,8				
Nióbio	6,77	14				
Nitrogênio	14,54	29,605	47,426	77,450	97,863	551,92
Oxigênio	13,614	35,146	54,934	77,394	113,873	138,08
Platina	8,9	18,5				
Potássio	4,339	31,81	46	60,90		99,7
Silício	8,149	16,34	33,46	45,33	166,73	205,11
Prata	7,574	21,48				
Sódio	5,138	47,29	71,65	98,88	138,60	172,36
Estrôncio	5,692	11,027		57		
Titânio	6,83	13,63	28,14	43,24	99,8	120
Tungstênio	7,94					
Xenônio	12,13	21,2				

Fonte: Lancaster (1986)



Desta forma, o potencial de ionização tem forte influência sobre a abertura do arco e estabilidade do mesmo. O Argônio, que possui potencial de ionização mais baixo, apresenta maior facilidade na abertura do arco elétrico e melhor estabilidade do que o gás Hélio, de maior potencial de ionização. Visto isso, para um mesmo comprimento de arco e corrente de soldagem, a tensão será maior para o gás Hélio do que para o Argônio. Devido a este fato, o Hélio é popularmente chamado de gás de arco “quente”, assim como o Argônio é chamado de gás de arco “frio”. Desta forma é possível dizer que, para uma mesma tensão de arco e corrente de soldagem, será introduzido um maior aporte de calor na soldagem empregando-se gases de proteção de maior potencial de ionização e, conseqüentemente, tendendo a provocar maiores distorções à peça.

#### 2.4.2. Dissociação

Com a introdução de energia ao gás de proteção, se este possuir moléculas de dois ou mais átomos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{O}_2$ ) em sua composição, estas podem vir a se dissociar em seus componentes atômicos. Neste processo, energia é absorvida nestes átomos, representando um processo endotérmico. Esta energia se soma àquela necessária para a ionização destes mesmos átomos para compor a energia total no gás de proteção durante a soldagem. Em contato com a poça de fusão, estes gases passam a se recombinar, liberando esta energia acumulada neste ponto. Isto implica que misturas de Argônio com  $\text{CO}_2$  ou outros gases dissociáveis demandem maior tensão de soldagem do que o Argônio puro, tornando-se gases mais “quentes” (SCOTTI, 2008).

#### 2.4.3. Condutividade térmica

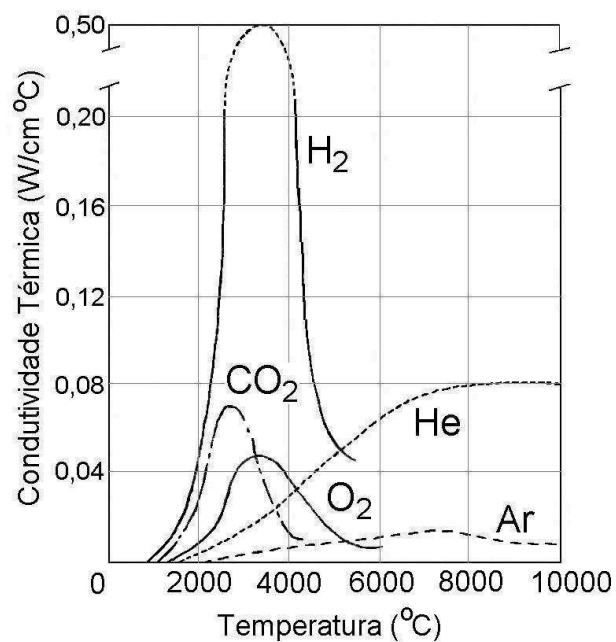
Condução térmica é definida como a transferência de calor entre átomos devido a um gradiente de temperatura. A condutividade térmica de um elemento define a capacidade deste em transmitir energia térmica. Em nível atômico, essa transferência de energia é explicada pelo choque das partículas dos gases presentes na coluna de plasma. Portanto, a condutividade térmica dos gases que compõem a coluna de plasma têm grande influência sobre a coluna de plasma, o

que reflete na penetração do cordão, na quantidade de metal depositado e na distorção da peça.

Teske (2006) apud Lyttle e Stapon (1990), Suban e Tusek, 2001 e Vaidya (2002) afirmam que gases que possuem maior condutividade térmica apresentam colunas mais largas, resultando em um formato de sino e tendendo a diminuir a altura da coluna. Além disso, os autores verificaram que o gradiente de temperatura entre o centro e a periferia da coluna é menor do que o apresentado pelos gases de proteção de baixa condutividade térmica. Isso resulta em uma distribuição mais uniformidade do cordão de solda.

A Figura 11 apresenta a condutividade térmica de alguns gases frequentemente usados no MIG/MAG em função da temperatura. Verifica-se que gases moleculares como  $H_2$  e  $CO_2$  possuem maiores condutividades térmicas se comparadas a gases monoatômicos como He e Ar ao se aproximar da região de 3273K, onde encontramos picos de condutividade devido ao efeito de dissociação da forma molecular dos gases para a forma atômica. Nota-se também que, o Ar possui a menor condutividade entre os gases, independente da faixa de temperatura. (SUBAN; TUSEK, 2001; AWS, Welding Handbook, v.1, 2001)

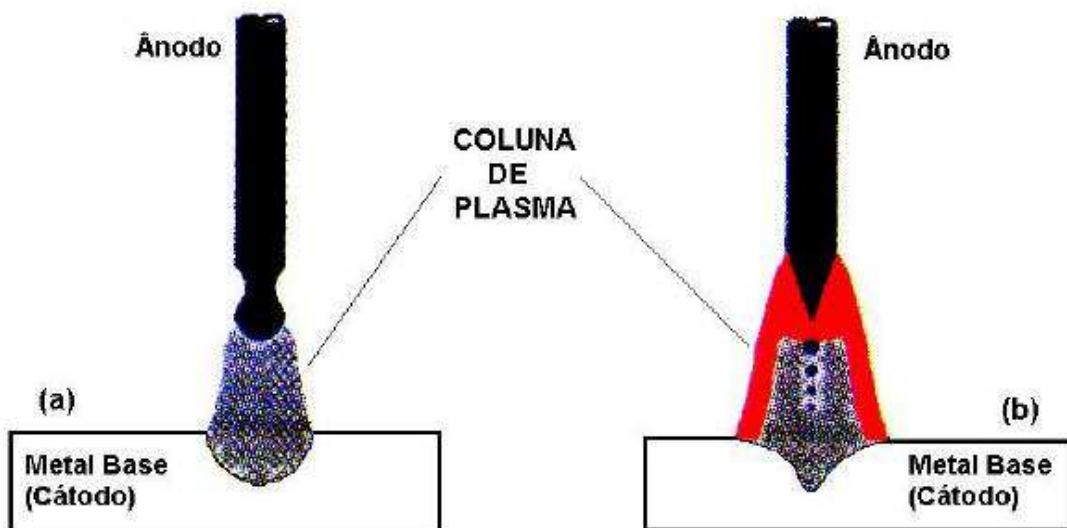
Figura 11: Condutividade de gases x Temperatura



Fonte: Suban e Tusek (2001)

Na Figura 12 é apresentado o perfil da soldagem usando-se como gases de proteção o hélio (a) e o argônio (b), sendo o primeiro de mais alta condutividade térmica e o segundo de mais baixa condutividade térmica. No arco com argônio observa-se uma expansão do gás em direção ao eletrodo, criando uma maior superfície para condensação de elétrons aquecidos. Este aumento da área de superfície acarreta na fusão do eletrodo, causando um estreitamento na sua ponta, que favorece uma maior deposição do metal de adição, resultando em um fluxo de gotas de pequenos diâmetros sobre o metal de base (Transferência goticular). Devido à baixa condutividade térmica do argônio, e o conseqüentemente grande gradiente de temperaturas entre centro e periferia da coluna, o cordão de solda apresenta uma penetração mais centralizada. No caso do arco com hélio, a alta condutividade térmica impede concentração de elétrons nas laterais do ânodo, resultando em menor temperatura na ponta do arame, diminuindo a probabilidade de ocorrer a transferência goticular. Em relação à penetração, esta será mais distribuída, visto que gases de maior condutividade apresentam menores gradiente de temperatura no sentido radial da coluna (TESKE, 2006 apud VAIDYA, 2002; JÖNSSON; EAGAR; SZEKELY, 1995).

Figura 12: Transferência metálica e penetração do cordão de solda: (a) Hélio; (b) Argônio



Fonte: Vaidya (2002)

#### 2.4.4. Potencial de oxidação

O potencial de oxidação de um gás de proteção tem relação com a quantidade de elementos oxidantes em sua composição. Se este possui teores de  $\text{CO}_2$  ou  $\text{O}_2$ , o valor do potencial será proporcional à quantidade destes no gás de proteção. A presença de óxidos é uma condição necessária para a estabilidade do arco. Apesar disso, Scotti (2008) alerta que sua presença pode acarretar em perdas significativas de elementos de liga, afetar a quantidade de escória, a taxa de emissão de fumos, a fluidez da poça de fusão e as propriedades mecânicas do cordão de solda. Visto isso, é necessário fazer uma seleção cuidadosa em busca do equilíbrio entre estabilidade e contrapontos. Dependendo do metal a ser soldado, este possui diferentes teores de óxidos sobre sua superfície. Se o metal for reativo, gases inertes devem ser empregados para compensar a quantidade de óxido no cordão final. Porém, se o metal for menos reativo, como é o caso do aço carbono, deve-se buscar a utilização de gases de proteção com adição de elementos oxidantes. Neste contexto, o arame tem papel importante sobre os efeitos da oxidação do cordão de solda. A composição do arame costuma conter elementos antioxidantes, atuando como amenizadores dos problemas citados anteriormente. Porém, a seleção da composição do arame deve ser criteriosa, pois assim como estes elementos antioxidantes podem ser bem-vindos, também podem ser prejudiciais. Gases de proteção com um baixo potencial de oxidação demandam arames com menores teores de desoxidantes, pois, no caso do elemento desoxidante não se combinar com óxidos, este ficará “sobrando” no cordão de solda, ao invés de ir para a escória. Esse excesso de antioxidantes passa a fazer parte do cordão de solda em forma de elementos de liga, geralmente representando um componente fragilizante.

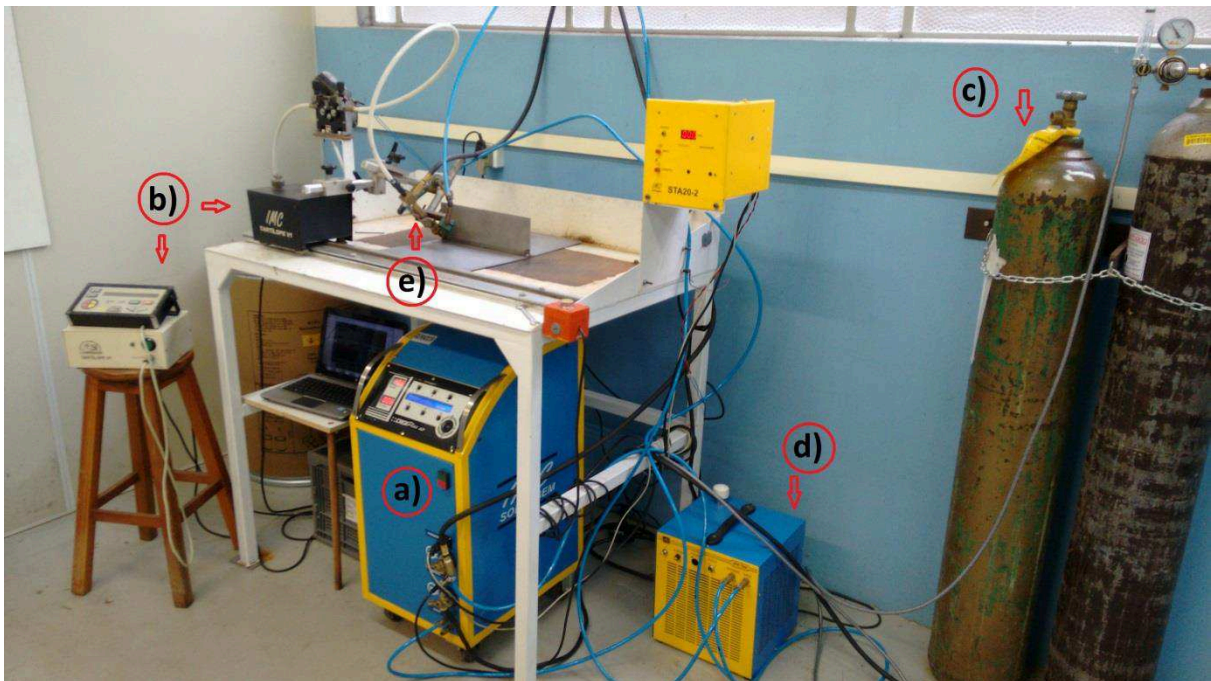
Além disso, o potencial de oxidação tem efeitos sobre o formato do cordão de solda. Este afeta a tensão superficial entre o metal fundido e o meio à sua volta, ou seja, impactando sobre a molhabilidade do cordão. Gases com alto potencial de oxidação apresentam cordões de solda de maior molhabilidade, enquanto gases de baixo potencial de oxidação tendem a produzir cordões irregulares e convexos.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. BANCADA DE ENSAIOS

A bancada de ensaios foi montada no laboratório de ligações permanentes da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville. Esta é composta por fonte de soldagem, tocha de soldagem MIG/MAG, alimentador de arame, sistema de refrigeração da tocha, sistema de movimentação mecanizado da tocha e sistema de aquisição de dados de soldagem. A Figura 13 apresenta todos os equipamentos mencionados, na bancada montada.

Figura 13: Bancada de testes a) Fonte de soldagem com sistema de aquisição de dados de soldagem embutido b) Sistema de movimentação mecanizado da tocha c) Cilindro do gás de proteção d) Unidade portátil de refrigeração e) Tocha de soldagem

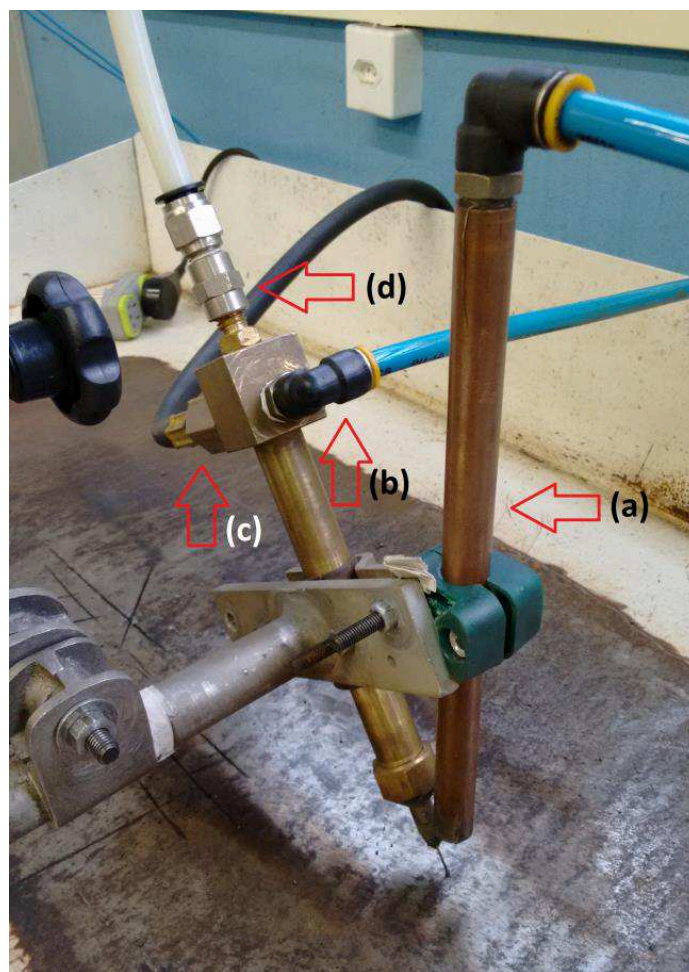


Fonte do autor

A fonte de soldagem usada é do tipo multiprocesso, modelo DigiPLUS A7 da marca IMC, com capacidade de corrente de até 800A. A tocha de soldagem utilizada não é um modelo comercial. Foi especialmente projetada para operações industriais automatizadas, sendo empregada em uma empresa parceira de Joinville e cedida para este trabalho. Como pode ser visto na Figura 14, a refrigeração e circuito de gás têm arranjos diferentes em relação às tochas convencionais. A passagem do

gás de proteção ocorre por um circuito externo à tocha. Isto visa permitir uma maior área para circulação da água no interior da tocha, aumentando a eficiência da refrigeração. Desta forma, além de permitir o uso de maiores correntes na soldagem, implica em um aumento do ciclo de trabalho, contribuindo para uma maior produção. O circuito de refrigeração é constituído por mangueiras e sua entrada e saída de água se encontram na parte superior da tocha. A tocha permite o emprego de arames de 0,8mm a 1,6mm de diâmetro.

Figura 14: Tocha de soldagem do processo MIG/MAG. a) Saída de gás de proteção b) Entrada de água fria c) Saída de água quente d) Entrada de arame



Fonte do autor

O sistema de refrigeração consiste em um circuito de mangueiras e uma unidade portátil de refrigeração do modelo UPR-7500 da marca IMC. Esta possui fluxo máximo de 10l/min e apresenta capacidade de retirada de calor de 2000W a um fluxo de 2l/min (em um ambiente de 25 °C).

Na realização dos ensaios utilizou-se o sistema de aquisição SAP 4.0, com o objetivo de registrar detalhadamente os dados de tensão e corrente obtidos na realização dos ensaios. Através deste foi possível obter os valores instantâneos de tensão e corrente durante a soldagem, os quais foram utilizados posteriormente para determinação da energia de soldagem (Equação 1).

Os gases de proteção utilizados nos ensaios são apresentados na Tabela 2, de acordo com suas composições e respectivas nomenclaturas conforme a AWS. A seleção dos gases de proteção utilizados neste trabalho se deveu pela disponibilidade destes no laboratório e por estes serem gases empregados no processo MIG/MAG.

Tabela 2: Gases de proteção utilizados e suas respectivas nomenclaturas conforme a AWS

<b>Composição do gás</b>	<b>Classificação</b>
Argônio puro	SG - Ar
Argônio + 5% oxigênio	SG - Ar O - 95/5
Argônio + 8% dióxido de carbono	SG - Ar CO <sub>2</sub> - 92/8
Argônio + 15% dióxido de carbono	SG - Ar CO <sub>2</sub> - 85/15
Argônio + 20% dióxido de carbono + 5% oxigênio	SG - Ar CO <sub>2</sub> O <sub>2</sub> - 75/20/5

Fonte do autor

O arame utilizado nos ensaios foi o ER70S-6 de 1,2mm de diâmetro. Este é comumente usado para soldagem de aços carbono, sendo muito empregado na construção naval. Seu elevado teor de manganês e silício proporciona excelente desoxidação do metal de solda para situações de moderada oxidação superficial. Sua resistência à tração e limite de escoamento são de 480MPa e 400MPa, respectivamente.

Com o intuito de simular uma condição semelhante a uma parte da embarcação, o corpo de prova utilizado nos ensaios teve um arranjo próximo ao de um painel enrijecido, se diferenciando deste somente pela ausência do reforço longitudinal. Este reforço não foi considerado nestes corpos de prova com o

propósito de facilitar a realização dos ensaios, visto que está disponível no laboratório um sistema de movimentação de tocha de apenas um grau de liberdade. A Figura 15 apresenta o modelo de corpo de prova a ser empregado. Utilizou-se para a confecção dos corpos de prova, o aço ASTM A569, cedido por uma empresa parceira da cidade de Joinville. O material, geralmente utilizado em processos de conformação, possui as especificações apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Propriedades químicas do aço ASTM A569 (percentagem em massa).

<b>C</b> <b>Máx</b>	<b>Mn</b> <b>Máx</b>	<b>P</b> <b>Máx</b>	<b>S</b> <b>Máx</b>	<b>Cu</b> <b>Máx</b>	<b>Al</b> <b>Máx</b>	<b>B</b>
0,15	0,6	0,05	0,05	0,2	0,06	0,0008 - 0,0035

Fonte do autor

Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço ASTM A569

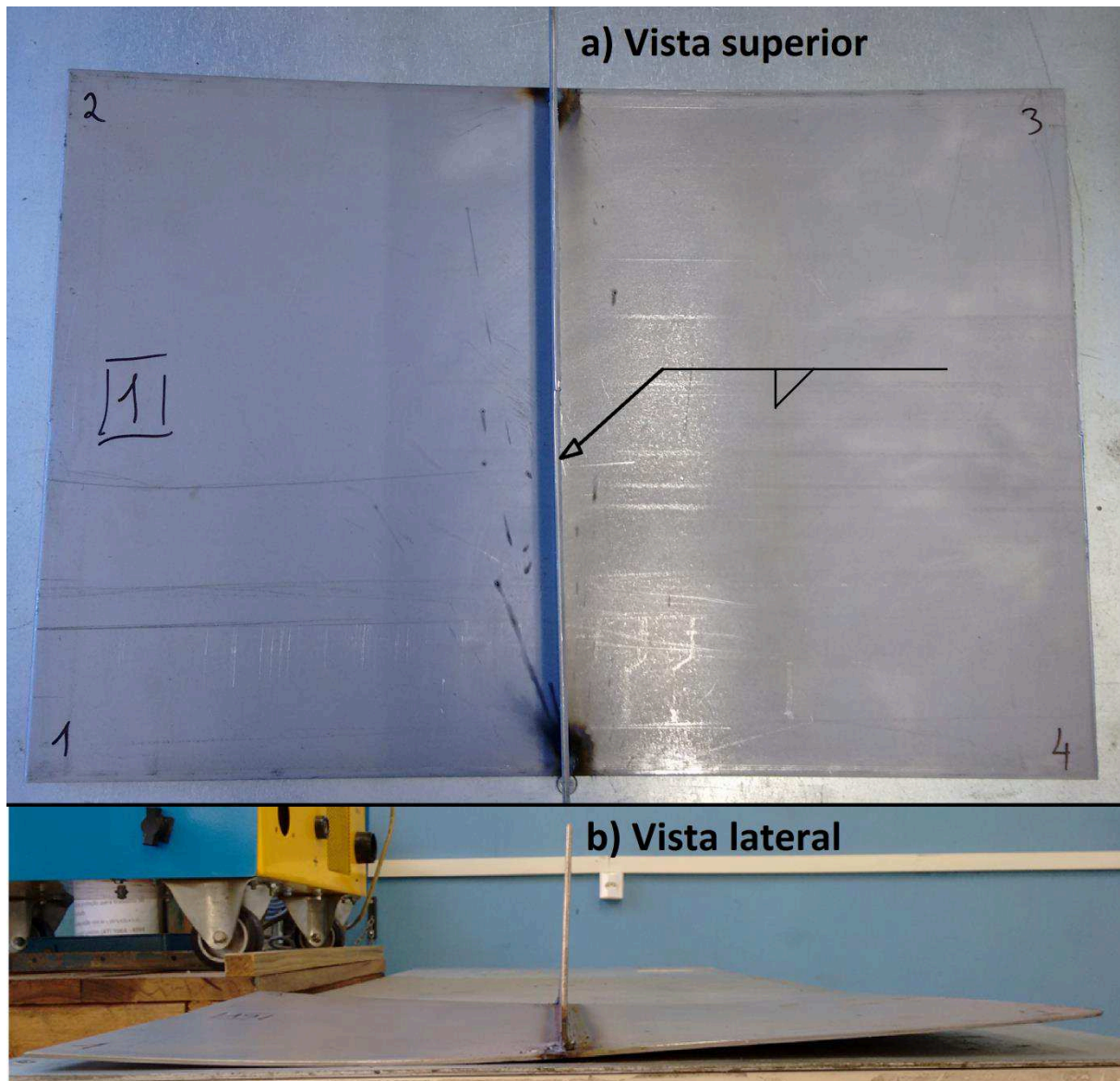
<b>Densidade [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>	<b>Módulo de elasticidade [GPa]</b>
7700 - 8030	0,27 - 0,30	190 - 210

Fonte do autor

Os vértices do corpo de prova foram nomeados como “vértice 1”, “vértice 2”, “vértice 3” e “vértice 4”, sendo anotados na chapa somente seus números. O lado dos vértices 1 e 2 recebeu a marcação do número do corpo de prova. A soldagem ocorreu sempre no lado dos vértices 3 e 4, no sentido do vértice 4 para o vértice 3.



Figura 15: Modelo de corpo de prova. a) vista superior e b) vista lateral



Fonte do autor

### 3.2. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

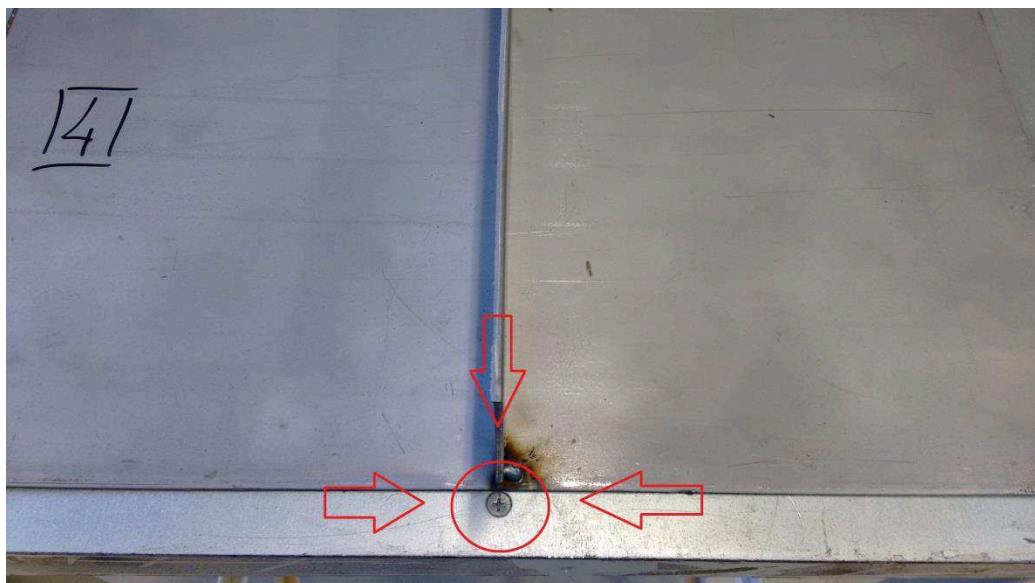
Foram realizados três ensaios de soldagem para cada composição do gás de proteção. Assim, foi possível obter dados cujos valores são resultados da média realizada a partir dos valores adquiridos nos três ensaios. Isto permite, além de resultados mais confiáveis, obter dados que representem melhor o efeito de cada gás de proteção.

Processos como o transporte das chapas, corte e preparação para os ensaios podem introduzir distorções nos corpos de prova antes mesmo destes serem

submetidos à soldagem. Com o intuito de excluir estas possíveis distorções iniciais dos resultados, os corpos de prova foram medidos antes e depois da soldagem. Desta forma, os resultados são apresentados sempre como distorções relativas, possibilitando analisar somente aquelas causadas pelo processo de soldagem. Salienta-se que as medições realizadas após a soldagem ocorreram apenas após o resfriamento total da peça, ou seja, quando o corpo de prova voltou à temperatura ambiente. Será adotada neste trabalho a convenção de distorção positiva, para um aumento do valor da distorção em relação a seu valor anterior à soldagem e, distorção negativa, para uma diminuição do valor da mesma.

Todas as medições foram realizadas nas mesmas condições. O procedimento de medição das distorções ocorreu sempre na mesma superfície, numa mesma posição, visando eliminar possíveis inconsistências nas medidas. Como referência para o posicionamento do corpo de prova foi utilizado o reforço do mesmo e um parafuso existente na bancada onde foram realizadas as medições. O lado de maior comprimento do corpo de prova foi mantido sempre paralelo à borda da bancada, ficando os vértices 1 e 4 do mesmo lado do parafuso. O posicionamento da chapa pode ser visto na Figura 16.

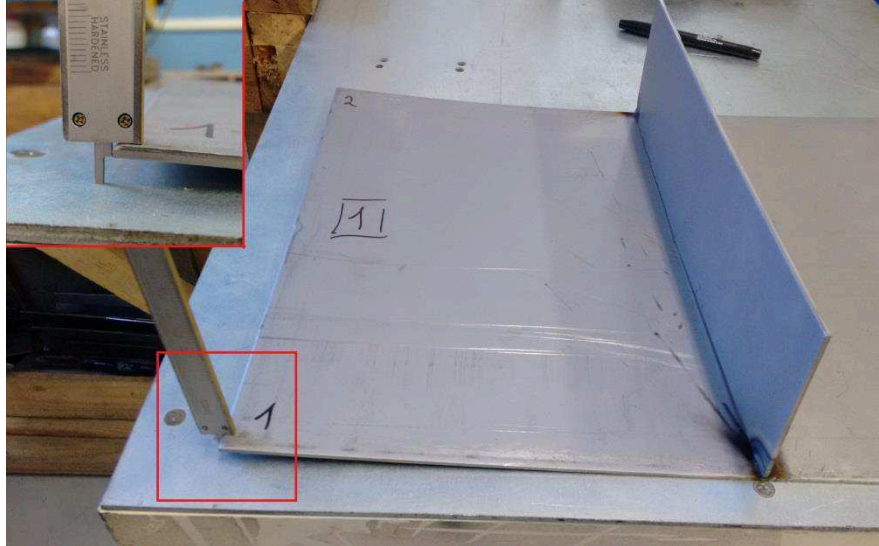
Figura 16: Posicionamento do corpo de prova para a medição das distorções



Fonte do autor

As medidas das distorções foram realizadas com um paquímetro de resolução 0,02mm. Tais medidas foram realizadas sempre sobre os vértices da chapa, conforme pode ser visto na Figura 17.

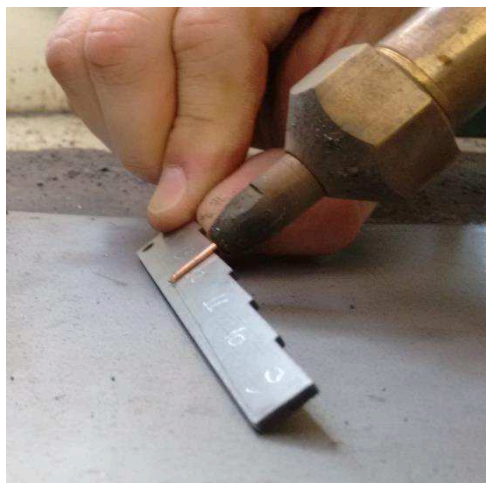
Figura 17: Procedimento de medição do corpo de prova



Fonte do autor

Neste trabalho a tocha está posicionada a  $45^\circ$  em relação à chapa. Desta forma, uma mesma distância entre bico de contato e peça (DBCP) pode apresentar diferentes valores de acordo com o modo no qual é tomada sua medida. Em função disso, este procedimento foi padronizado de modo a se tomar a medida sempre na diagonal, abaixo do arame, como pode ser visto na Figura 18.

Figura 18: Procedimento de medição da DBCP



Fonte do autor

Com o intuito de manter as condições de realização dos ensaios a mais próxima possível, utilizou-se do mesmo modo de transferência metálica em todos os ensaios, sendo este o curto-circuito. A escolha do modo de transferência por curto-circuito se deve, fundamentalmente, ao fato deste permitir o uso de uma maior gama de composições de gases de proteção.

Além dos ajustes da fonte de soldagem, vazão de gás de proteção, velocidade de avanço da tocha e acionamento do sistema de refrigeração, realizou-se individualmente em cada corpo de prova a medição do DBCP e o alinhamento da junta com a trajetória do sistema de movimentação mecanizado da tocha. Dessa, forma, as Figuras 19 e 20 demonstram os corpos de prova devidamente posicionados e alinhados para os ensaios.

Figura 19: Corpo de prova posicionado para o ensaio



Fonte do autor

Figura 20: Corpo de prova alinhado com tocha de soldagem para ensaio



Fonte do autor

### 3.2.1. Ensaios Preliminares

Foram realizados ensaios preliminares com o intuito de definir parâmetros de soldagem que resultassem em uma mesma energia de soldagem e em um mesmo modo de transferência. O valor da tensão de arco foi fixado para todos os gases (21V), variando-se a velocidade de arame com o intuito de ajustar a corrente de soldagem a um valor alvo. Com o intuito de propiciar um maior aporte de calor à peça, já que o objetivo deste trabalho é analisar as distorções nela induzida pelo processo de soldagem, procurou-se trabalhar com os maiores valores de tensão e corrente possíveis para o curto circuito, porém sem entrar nas regiões de transferência globular ou goticular. A velocidade de soldagem foi mantida em todos os ensaios em 30cm/min. Ao final destes ensaios preliminares chegaram-se aos valores e configurações mostradas na Tabela 5, os quais foram utilizadas durante a realização dos ensaios deste trabalho.

Tabela 5: Parâmetros encontrados nos testes preliminares

Parâmetros dos ensaios		Valores/Especificações
Modo de transferência metálica		Curto Circuito
Comprimento de cordão		280 mm
Especificação de arame		ER70S-6
Diâmetro de arame		1,2mm
Inclinação da tocha		45°
Ângulo de ataque da tocha		0°
DBCP		12mm
Vazão de gás de proteção		15 L/min
Tensão de arco		21V
Corrente de soldagem		170A
Velocidade de soldagem		30cm/min
Velocidade do arame	Ar puro	5 m/min
	Ar + 15%CO <sub>2</sub>	4,3 m/min
	Ar + 5%O <sub>2</sub>	4,3 m/min
	Ar + 8%CO <sub>2</sub>	4,6 m/min
	Ar + 20%CO <sub>2</sub> + 5%O <sub>2</sub>	4,5 m/min

Fonte do autor

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos com a realização dos ensaios de soldagem para todos os gases de proteção considerados neste trabalho.

Tabela 6: Dados de valores ajustados, resultados obtidos dos ensaios e energia de soldagem calculada

Corpo de Prova	Gás de proteção	Vel. de arame ajustada [m/min]	Vel. De Soldagem ajustada [cm/min] ([mm/s])	Tensão ajustada [V]	Tensão média medida [V]	Corrente média medida [A]	Energia de Soldagem calculada [J/mm]
20 16 13	Argônio	5	30 (5)	21	20,3 20,4 20,4	169,3 170,1 172,1	700,0 705,4 712,9
5 9 3	Ar + 15%CO <sub>2</sub>	4,3	30 (5)	21	20,2 20,2 20,2	170,7 169,6 165,8	697,7 693,9 678,3
7 6 2	Ar + 5%O <sub>2</sub>	4,3	30 (5)	21	20,2 20,2 20,2	169,3 165,1 169,3	683,3 670,6 687,9
24 27 28	Ar + 8%CO <sub>2</sub>	4,6	30 (5)	21	20,2 20,2 20,2	164,5 167,8 172,2	670,4 684,4 699,9
26 25 21	Ar + 20%CO <sub>2</sub> + 5%O <sub>2</sub>	4,5	30 (5)	21	20,2 20,2 20,2	172,0 167,0 171,5	704,3 683,4 701,6

Fonte do autor

Na Tabela 6, os dados de tensão média medida e corrente média medida foram retirados das aquisições do SAP e a energia de soldagem foi calculada através da Equação 1. Nota-se que os valores de corrente média medidos apresentaram-se todos em um pequeno intervalo, cerca de 8A. Conforme esperado de um processo de tensão constante, as tensões médias de arco registradas não apresentaram valores muito diferentes. Dessa forma, como pode ser visto na última coluna da Tabela 6, as energias de soldagem obtidas foram semelhantes, apresentando uma diferença de apenas 6% entre o maior e o menor valor, o que foi considerado satisfatório.

A Tabela 7 apresenta as distorções obtidas antes e depois da realização do processo de soldagem do ensaio, assim como a distorção relativa resultante, para os corpos de prova.

Tabela 7: Valores de distorção obtidos, por vértice.

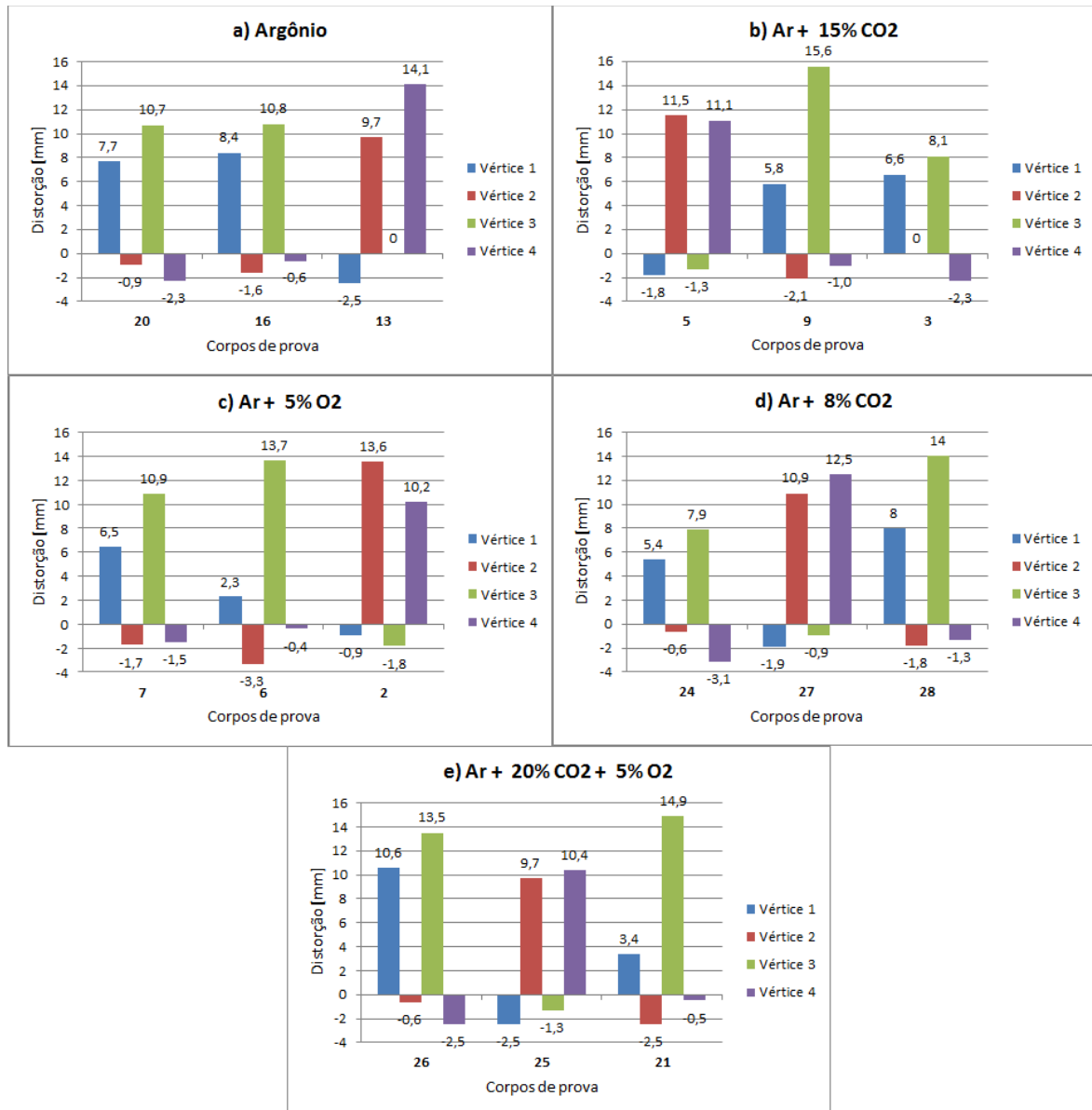
Corpo de Prova	Gás de proteção	Medidas de distorção realizadas antes do ensaio de soldagem (Da) [mm]				Medidas de distorção realizadas depois do ensaio de soldagem (Dd) [mm]				Valor de distorção relativa devido ao ensaio de soldagem(Dd-Da) [mm]			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
20	Argônio	7,4	8,3	10,2	10,0	15,1	7,4	20,9	7,7	7,7	-0,9	10,7	-2,3
16		6,5	9,0	9,2	8,6	14,9	7,4	20	8	8,4	-1,6	10,8	-0,6
13		6,5	7,7	5,0	4,4	4	17,4	5	18,5	-2,5	9,7	0	14,1
5	Ar + 15%CO2	7,7	8,3	7,6	6,8	5,9	19,8	6,3	17,9	-1,8	11,5	-1,3	11,1
9		9,5	10,0	10,7	10,7	15,3	7,9	26,3	9,7	5,8	-2,1	15,6	-1,0
3		6,3	6,8	9,7	8,8	12,9	6,8	17,8	6,5	6,6	0	8,1	-2,3
7	Ar + 5%O2	5,0	6,0	7,9	6,5	11,5	4,3	18,8	5	6,5	-1,7	10,9	-1,5
6		11	11,3	9,2	9,5	13,3	8	22,9	9,1	2,3	-3,3	13,7	-0,4
2		8,2	10,1	9,5	9,8	7,3	23,7	7,7	20	-0,9	13,6	-1,8	10,2
24	Ar + 8%CO2	8,4	9,3	10,0	11,2	13,8	8,7	17,9	8,1	5,4	-0,6	7,9	-3,1
27		9,5	12,1	9,6	9,2	7,6	23	8,7	21,7	-1,9	10,9	-0,9	12,5
28		7,7	9,5	9,4	8,7	15,7	7,7	23,4	7,4	8	-1,8	14	-1,3
26	Ar + 20%CO2 + 5%O2	7,5	8,4	10,0	10,6	18,1	7,8	23,5	8,1	10,6	-0,6	13,5	-2,5
25		7,5	9,7	7,8	7,6	5	19,4	6,5	18	-2,5	9,7	-1,3	10,4
21		8,5	10,6	9,0	8,1	11,9	8,1	23,9	7,6	3,4	-2,5	14,9	-0,5

Fonte do autor

Conforme se pode observar, excetuando-se os corpos de prova 3 e 13, onde não houve distorções, em todos os casos aconteceram distorções positivas e negativas. Com intuito de possibilitar uma melhor visualização destes resultados, foram então construídos gráficos com estes dados. Os mesmos são apresentados na Figura 21.



Figura 21: Valores de distorção obtidos nos ensaios com diferentes composições de gases de proteção a) Argônio b) Ar+15%CO<sub>2</sub> c) Ar+5%O<sub>2</sub> d) Ar+8%CO<sub>2</sub> e) Ar+20%CO<sub>2</sub>+5%O<sub>2</sub>

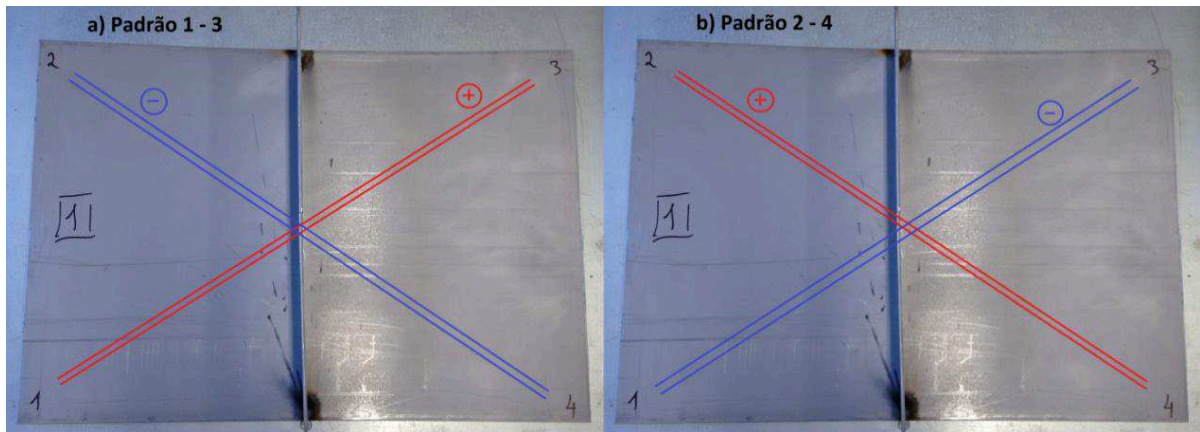


Fonte do autor

Analisando os gráficos da Figura 21 é possível identificar dois padrões de distorção bem definidos. Em todos os casos as chapas apresentaram um valor significativo de distorção positiva em uma de suas diagonais e uma distorção negativa, ou nula, na outra diagonal. Isto é, ou a chapa apresentou grandes distorções positivas nos vértices 1 e 3, ou nos vértices 2 e 4. Assim, com o intuito de facilitar as análises posteriores, estes dois padrões de distorção foram nomeados como “Padrão 1–3” e “Padrão 2–4”, sendo os números citados referentes aos vértices de maior distorção positiva. A Figura 22 mostra esses padrões, com suas

diagonais de maior distorção identificadas. As diagonais de grandes distorções positivas foram indicadas por linhas e um sinal positivo em vermelho e as diagonais negativas por linhas e um sinal negativo em azul.

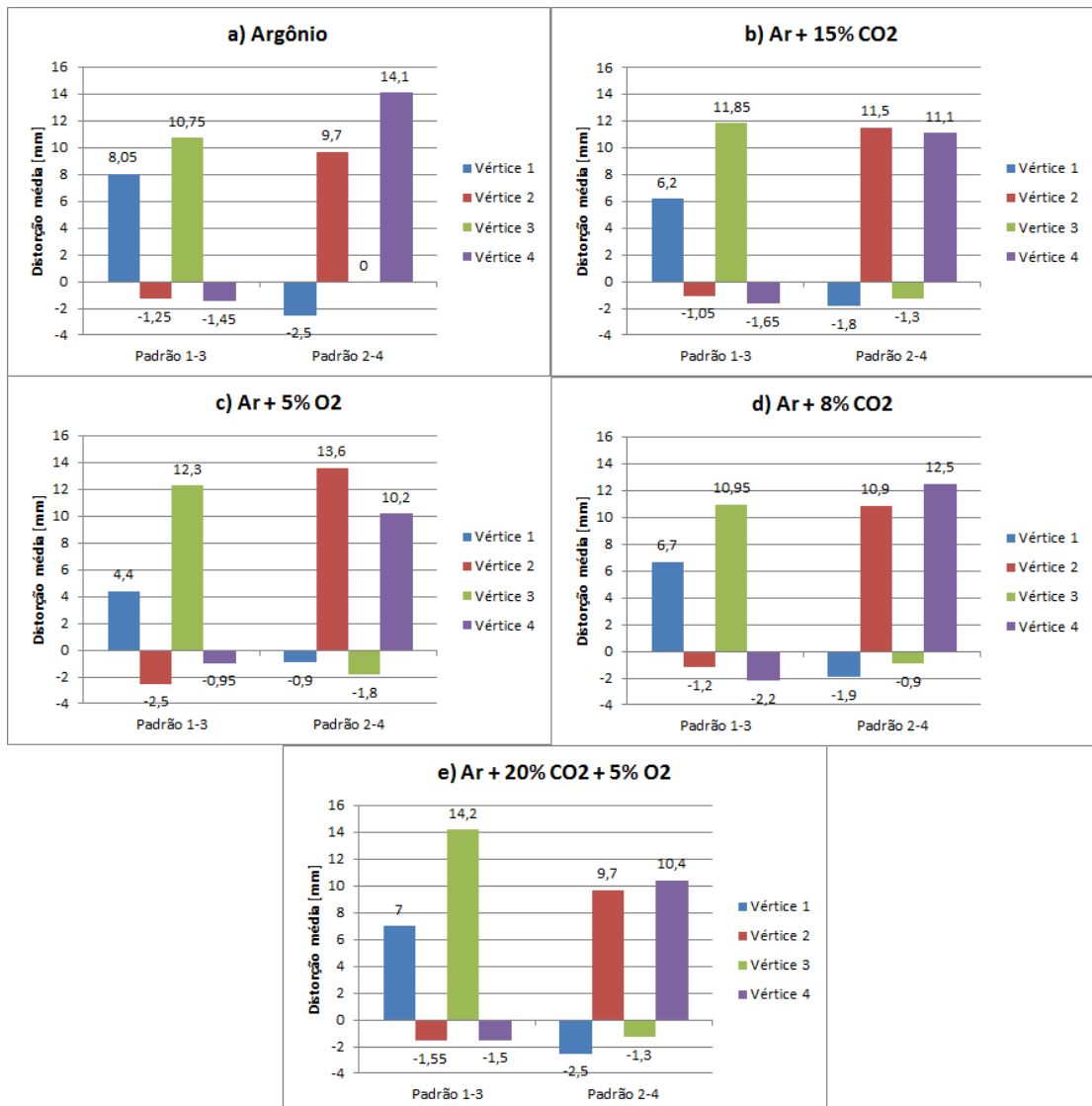
Figura 22: Padrões criados, identificando as diagonais de maior e menor distorção. a) Padrão 1-3 b) Padrão 2-4



Fonte do autor

Uma vez identificados os dois padrões de distorções, estes foram consideradas nas análises posteriores. Tendo estes como referência, passou-se a representar as distorções dos corpos de prova como uma média para o padrão de distorção de cada corpo de prova. Desta forma, criaram-se os gráficos da Figura 23, apresentando as médias das distorções dos padrões 1-3 e 2-4.

Figura 23: Valores de distorções médias dos padrões 1–3 e 2–4 obtidos nos ensaios com diferentes composições de gases de proteção. a) Argônio b) Ar+15%CO<sub>2</sub> c) Ar+5%O<sub>2</sub> d) Ar+8%CO<sub>2</sub> e) Ar+20%CO<sub>2</sub>+5%O<sub>2</sub>



Fonte do autor

Com o intuito de analisar o valor de distorção obtido para cada uma das composições de gases de proteção avaliadas neste trabalho, independente de seu padrão, foi realizada uma média tomando-se como referência as similaridades dos padrões de distorção. Assim, uniram-se os padrões de forma a somar os vértices de maior distorção do padrão 1–3 com os de maior distorção do padrão 2–4, o vértice de menor distorção do padrão 1–3 com o de menor distorção do padrão 2–4, e assim por diante, conforme pode ser observado nas Figuras 24 e 25. Percebe-se que foi criada uma nova nomenclatura para os vértices. Isto se fez necessário visto que a posição dos vértices não coincide mais com aquela dos vértices dos corpos de

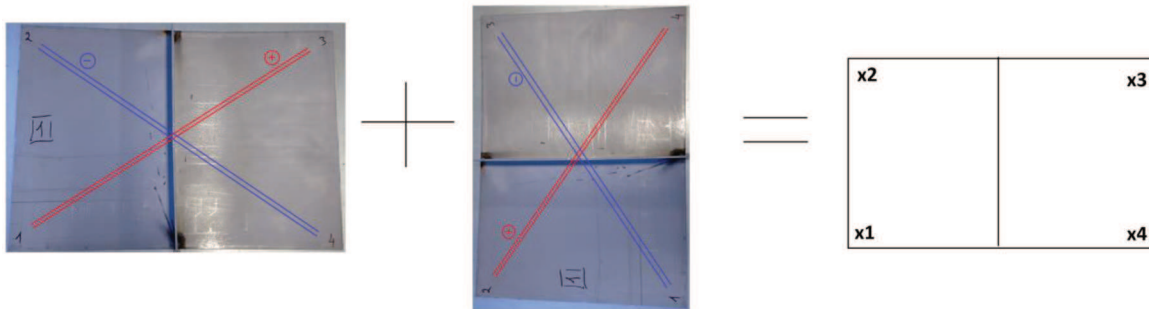
prova ensaiados, mas, com os padrões de distorções obtidos. Este processo resultou no gráfico da Figura 26.

Figura 24: Operações realizadas para soma das médias dos padrões de distorção

Conversão de eixos similares				
Padrão 1-3		Padrão 2-4	Soma de padrões	
Vértice 3	+	Vértice 4	>	Vértice x3
Vértice 1		Vértice 2		Vértice x1
Vértice 2		Vértice 1		Vértice x2
Vértice 4		Vértice 3		Vértice x4

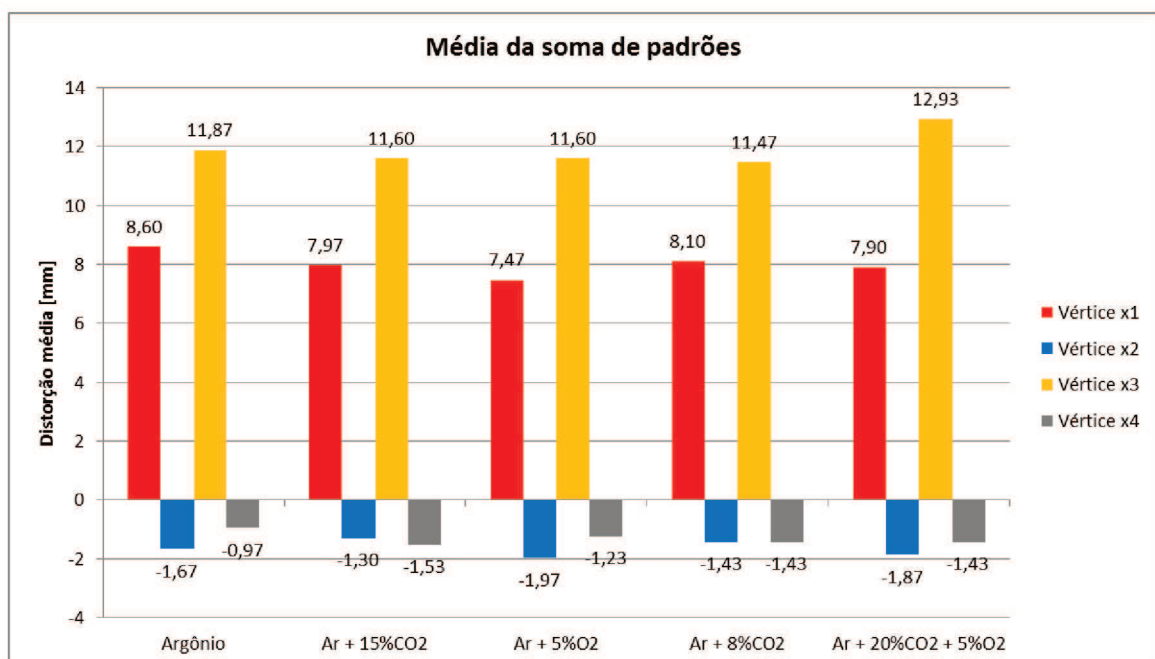
Fonte do autor

Figura 25: Soma de padrões de distorção, resultando no novo padrão de análise.



Fonte do autor

Figura 26: Valores de distorções global obtidos nos ensaios com diferentes composições de gases de proteção



Fonte do autor

Analisando-se o gráfico da Figura 26 é possível observar que os valores de distorção obtidos em todos os vértices apresentaram-se bastante próximos, sendo a maior diferença encontrada de 1,46mm, entre os vértices x3 dos gases de proteção Ar+8%CO<sub>2</sub> e Ar+20%CO<sub>2</sub>+5%O<sub>2</sub>. Apesar disso, na comparação entre os vértices x1, x2 e x4 destes dois gases, apenas o vértice x2 também apresenta-se maior no gás de proteção Ar+20%CO<sub>2</sub>+5%O<sub>2</sub>, não permitindo afirmar que este distorce mais que o Ar+8%CO<sub>2</sub>. Comparando-se os gases de proteção restantes, também não foi possível fazer esse tipo de afirmação. Devido a essas circunstâncias, decidiu-se avaliar o valor da média geral das distorções dos gases. Isto foi realizado através da média dos módulos de cada vértice, resultando na Tabela 8.

Tabela 8: Módulos dos vértices e média geral das distorções de cada composição de gás de proteção ensaiada

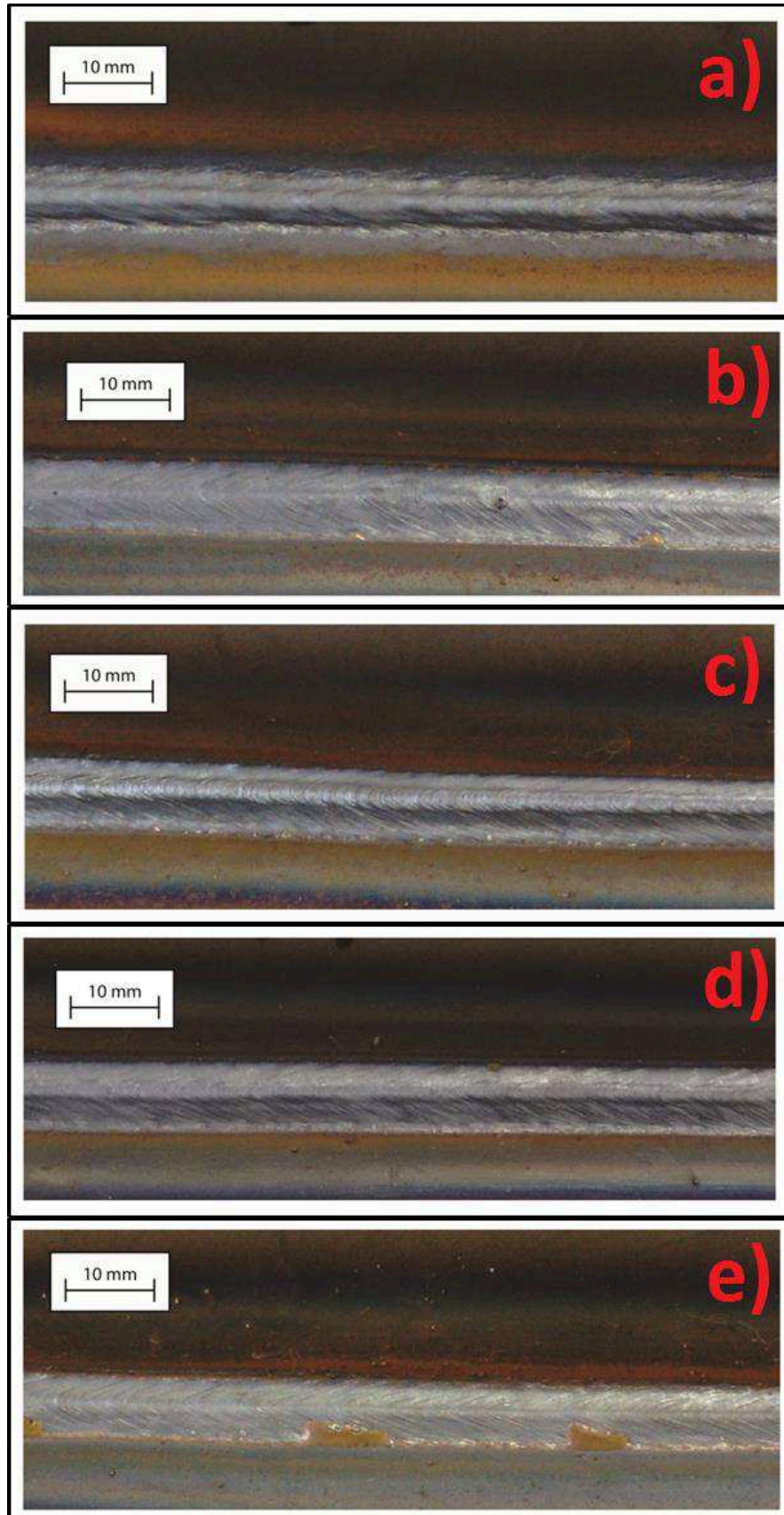
Gás de proteção	X1	X2	X3	X4	Média geral de distorções
<b>Argônio</b>	8,60	1,67	11,87	0,97	5,78
<b>Ar + 15%CO<sub>2</sub></b>	7,97	1,30	11,60	1,53	5,60
<b>Ar + 5%O<sub>2</sub></b>	7,47	1,97	11,60	1,23	5,57
<b>Ar + 8%CO<sub>2</sub></b>	8,10	1,43	11,47	1,43	5,61
<b>Ar + 20%CO<sub>2</sub> + 5%O<sub>2</sub></b>	7,90	1,87	12,93	1,43	6,03

Fonte do autor

Analisando-se os valores das médias gerais de distorção para cada composição de gás verifica-se que a maior diferença apresentada foi de 0,46mm entre a mistura Ar+20%CO<sub>2</sub>+5%O<sub>2</sub> e o gás Ar+5%O<sub>2</sub>. Isto significa que dentre as cinco composições de gases de proteção analisadas neste trabalho, a maior diferença encontrada em suas distorções foi de apenas 7,63%. Com base nestes resultados, não se pode afirmar que a composição do gás de proteção exerce efeito significativo sobre a magnitude das distorções oriundas do processo de soldagem. Por outro lado, o fato de as distorções não apresentarem grandes variações entre os resultados de cada gás de proteção, aliado ao fato da energia de soldagem ter sido igual em todos os ensaios, é um grande indicativo de que a energia de soldagem realmente representa um papel determinante sobre estas distorções. A inexistência de uma relação direta e significativa entre a composição dos gases de proteção e seus efeitos sobre a distorção de chapas, permite inúmeras possibilidades. Uma

delas diz respeito à possibilidade de escolha, por parte dos estaleiros, dos gases de proteção em função de fatores econômicos e de qualidade dos cordões. Na ausência de influência sobre as distorções, a composição do gás de proteção pode ser definida com base nos aspectos dimensionais e de acabamento dos cordões, por exemplo. A Figura 27 apresenta os cordões de solda produzidos com os gases de proteção constantes na Tabela 6. Percebe-se que nos cordões produzidos nos ensaios dos gases  $\text{Ar}+15\%\text{CO}_2$  e  $\text{Ar}+20\%\text{CO}_2+5\%\text{O}_2$  foi obtida boa molhabilidade. Isso pode ser justificado pelo maior potencial de oxidação destes dois gases de proteção em relação aos restantes. Já os gases de proteção argônio puro,  $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$  e  $\text{Ar}+5\%\text{O}_2$ , também conforme esperado devido à seus menores potenciais de oxidação, apresentaram-se com um formato convexo. Cordões com maiores convexidades devem ser evitados, pois podem concentrar tensões, aumentando a probabilidade da aparição de falhas.

Figura 27: Cordões de solda realizados com a) Argônio b) Ar+15%CO<sub>2</sub> c) Ar+5%O<sub>2</sub> d) Ar+8%CO<sub>2</sub> e) Ar+20%CO<sub>2</sub>+5%O<sub>2</sub>



Fonte do autor

## 5. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- Os gases de proteção utilizados neste trabalho, para condições estabelecidas em seus ensaios, não influenciaram a magnitude das distorções obtidas nos corpos de prova;
- As distorções foram quantificadas através de metodologia desenvolvida neste trabalho, analisando-as de forma relativa;
- Comparações entre as distorções obtidas nos ensaios demonstraram variações demasiadamente pequenas, o que sugere que a energia de soldagem seja um fator predominante sobre estas.
- As distorções encontradas levaram à constatação de que as chapas apresentaram distorções positivas em uma de suas diagonais e distorções negativas, na outra. Dessa forma definiu-se dois padrões, o padrão 1-3 e o padrão 2-4.



## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar formas de amenizar as distorções criadas pelo processo de soldagem MIG/MAG;
- Quantificar a influência das distorções dos painéis enrijecidos sobre a eficiência da produção de um estaleiro;
- Realizar uma análise de custo-benefício quanto ao uso dos gases empregados neste trabalho;

## REFERÊNCIAS

AMANTE, Diogo do Amaral Macedo. **Imperfeições de fabricação na construção naval e Offshore**. 2006. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal do Rio de Janeiro (ufrj), Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <[http://anp.gov.br/CapitalHumano/Arquivos/PRH03/Diogo-Amaral-Macedo\\_Amante\\_PRH03\\_UFRJ-COPPE\\_G.pdf](http://anp.gov.br/CapitalHumano/Arquivos/PRH03/Diogo-Amaral-Macedo_Amante_PRH03_UFRJ-COPPE_G.pdf)>. Acesso em: 15 nov. 2014.

ANDERSEN, Lars Fuglsang. **Residual stresses and deformations in steel structures**. 2000. 228 f. Tese (Doutorado) - Curso de Naval Architecture, Department Of Naval Architecture And Offshore Engineering, Technical University Of Denmark, Lyngby, 2000.

AWS. **Welding Handbook: Welding Science & Technology**. AMERICAN WELDING SOCIETY, v.1. 9 Ed. Miami, FL. 2001. 918 p.

AWS. **Welding Handbook: Welding Processes**. AMERICAN WELDING SOCIETY, v.2. 8 Ed. Miami, FL. 1991. 955 p.

DYDO. R. J., Castner R. H., Koppenhoefer K., **Guidelines for Control of Distortions in Thin Ship Structures**. Navy Joining Center, Ohio, 1999.

LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**. Oxford: Pergamon Press. London. 1986. 2 Ed. 340 p.

LIAO, M.T.; CHEN, W.J. The Effect of Shielding Gas Compositions on the Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel Weldments. *Materials chemistry and Physics*. n. 55, p. 145 – 151. Mar. 1998.

LINNERT, G. E. **Welding Metallurgy: Carbon and Alloy Steels**. v.1 - Fundamentals, 4 Ed. Miami, Florida, USA. AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS), 1994. 940 p.

MARQUES, P. V. *Tecnologia da Soldagem*. Belo Horizonte. ESAB, 1991. 352 p.

MASUBUCHI, K. **Research activities examine residual stresses and distortion in welded structures**, Dec. 1991.

MASUBUCHI, K. (1984) **Analysis of Welded Structures**, Pergamon Press, Oxford, 300pp.

MODENESI, P. J. **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico**. Universidade Federal de Minas Gerais. 2001.

MODENESI, P. J. **Introdução aos processos de soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais. 2006.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C **Engenharia de soldagem e Aplicações**, 1 ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 1982.

SCOTTI, A. **Mapping transfer modes for stainless steel gas metal arc welding**. Vol 5, 2000.

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

SUBAN, M.; TUSEK, J. Dependence of Melting Rate in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used. **Materials Processing Technology**. n. 119, p. 185 – 192. 2001.

S. E. G. Melo, R. Y. Qassim. CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE, 21, [S.l., s.d.]. **Simulação da Soldagem de Painéis Planos**, Rio de Janeiro: [s.n.], 2006.

VAIDYA, V. V. **Shielding Gas Mixtures for Semiautomatic Welds**. Welding Journal. v. 81, n. 09, p. 43 – 48. Set. 2002.

WAINER, EMILIO, **Soldagem: Processos e Metalurgias**. 2ª edição, São Paulo, 1992.