

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

MATEUS DA SILVA MEZZALIRA

**ANÁLISE DA SOLDABILIDADE DOS AÇOS COM BAIXO TEOR DE CARBONO E
DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA APLICADOS À FABRICAÇÃO DE
POLTRONAS DE ÔNIBUS**

CAXIAS DO SUL

2016

MATEUS DA SILVA MEZZALIRA

**ANÁLISE DA SOLDABILIDADE DOS AÇOS COM BAIXO TEOR DE CARBONO E
DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA APLICADOS À FABRICAÇÃO DE
POLTRONAS DE ÔNIBUS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Área de concentração: processos de soldagem.

Orientador: prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta

CAXIAS DO SUL

2016

MATEUS DA SILVA MEZZALIRA

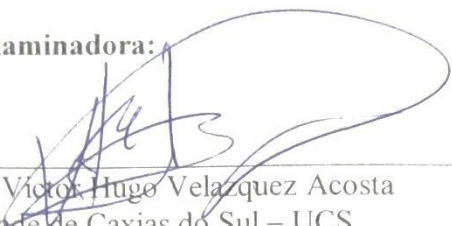
**ANÁLISE DA SOLDABILIDADE DOS AÇOS COM BAIXO TEOR DE CARBONO E
DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA APLICADOS À FABRICAÇÃO DE
POLTRONAS DE ÔNIBUS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Universidade de Caxias do Sul como
requisito parcial à obtenção do grau de
Engenheiro Mecânico.

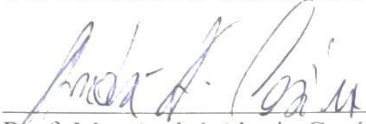
Área de concentração: processos de
soldagem.

APROVADO EM 12 / 12 / 2016


Banca Examinadora:



Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Me. André Alaniz Cesário
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Me. Deives Roberto Baretta
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Poltronas são componentes críticos que devem oferecer conforto e segurança aos passageiros e, diante disso, o projeto necessita de grande atenção a fim de serem evitadas falhas. O presente trabalho teve como objetivo analisar a soldabilidade dos aços com baixo teor de carbono com aços de alta resistência e baixa liga aplicados à fabricação de poltronas de ônibus. A partir de estruturas de poltronas soldadas com diferentes parâmetros de soldagem, foram realizados ensaios não-destrutivos como a inspeção visual e ensaio por líquidos penetrantes. Posteriormente os corpos de prova foram submetidos à análise de durabilidade através de dispositivo de simulação de cargas cíclicas. Mesmo que este ensaio não tenha oferecido uma correlação direta entre a durabilidade e os parâmetros de soldagem utilizados, os resultados sugerem a fragilidade da estrutura, devido à falha de fadiga ocorrida próxima à junta soldada do perfil, fabricado em aço de alta resistência e baixa liga, quando submetido a maior corrente de soldagem. Os ensaios metalográficos e os ensaios de microdureza permitiram a avaliação das características microestruturais das regiões afetadas pelo calor da junta soldada. A análise dos resultados dos ensaios relaciona as alterações ocorridas no âmbito microestrutural e indicam as possíveis reduções da durabilidade do conjunto com o aumento da corrente de soldagem aplicada no processo GMAW utilizado na fabricação das poltronas.

Palavras-chave: Soldabilidade. Ensaio Mecânicos. Análise Microestrutural.

ABSTRACT

Seats are critical components that should offer passengers comfort and safety, thus the project demands a great deal of attention in order to avoid failure. This study had as its main goal analyze weldability of low carbon steel on high strength low alloy steel applied in the assembly of seats of buses. From seat structures welded within different parameters of welding, non-destructive tests were performed with visual inspection with further tests of liquid-penetrant inspection. Afterwards proof bodies were submitted to durability analysis through simulation of cyclic loading device. Even though this teste was not be able to provide direct relation between durability and the welding parameters used, the results suggest a fragility of the structure due to fatigue failure occurred close to the profile welded joint, made of high strength low alloy steel, when subject to a higher welding current. The metallographic tests and the microhardness tests allowed the evaluation of the microstructural characteristics of the affected area by the heat of the welded joint. The analysis of the test results relates the modifications occurred in microstructural range and indicate the possible reductions of the durability of the set to the increase of welding current applied in the GMAW process used in the seat manufacturing.

Keywords: Weldability. Mechanical Testing. Microstructural Analysis.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Poltrona urbana | 12 |
| Figura 2 – Diagrama de equilíbrio Fe-C..... | 15 |
| Figura 3 – Regiões básicas da soldagem | 18 |
| Figura 4 – Seção transversal de uma solda..... | 18 |
| Figura 5 – Processo de soldagem GMAW | 19 |
| Figura 6 – Modos de transferência do metal de solda | 21 |
| Figura 7 – Polaridade reversa x polaridade direta | 22 |
| Figura 8 – Distorção | 24 |
| Figura 9 – Perfis de solda inadequados | 24 |
| Figura 10 – Falta de fusão | 25 |
| Figura 11 – Inclusões de escória..... | 25 |
| Figura 12 – Porosidades | 26 |
| Figura 13 – Mordedura..... | 26 |
| Figura 14 – Falta de penetração..... | 26 |
| Figura 15 – Localizações comuns para o aparecimento de trincas..... | 27 |
| Figura 16 – Evolução das microestruturas x velocidade de resfriamento | 28 |
| Figura 17 – Nucleação da trinca: elementos críticos..... | 29 |
| Figura 18 – Propagação da trinca | 30 |
| Figura 19 – Superfícies fraturadas em fadiga..... | 31 |
| Figura 20 – Fluxograma das tarefas executadas | 34 |
| Figura 21 – Conjunto estrutural da poltrona..... | 35 |
| Figura 22 – Detalhe de soldagem da poltrona | 36 |
| Figura 23 – Dispositivo de ensaio de durabilidade..... | 38 |
| Figura 24 – Regiões analisadas pela metalografia e microdureza..... | 39 |
| Figura 25 – Ensaio por líquidos penetrantes | 40 |
| Figura 26 – Falha do corpo de prova CP1 | 41 |
| Figura 27 – Trinca do corpo de prova CP1 | 41 |
| Figura 28 – Trincas dos corpos de prova CP2 e CP3 | 42 |
| Figura 29 – Microestruturas do perfil da longarina..... | 43 |
| Figura 30 – Variação do tamanho de grão (Região B) | 43 |
| Figura 31 – Microestruturas da flâmula de união do encosto..... | 44 |
| Figura 32 – Variação do tamanho de grão (Região D)..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 33 – Microestruturas do perfil da longarina..... | 46 |
| Figura 34 – Variação do tamanho de grão (Região F) | 46 |

LISTA DE QUADROS E TABELAS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Sistemas SAE e AISI de classificações dos aços | 14 |
| Quadro 2 – Níveis estruturais e técnicas de análise aplicadas..... | 32 |
| Quadro 3 – Especificação de soldagem utilizada | 37 |
| Tabela 1 – Faixas de correntes para diferentes bitolas e materiais..... | 22 |
| Tabela 2 – Composição química e propriedades mecânicas dos materiais | 35 |
| Tabela 3 – Corrente de soldagem utilizada | 37 |
| Tabela 4 – Microdurezas obtidas..... | 47 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|------|---|
| AISI | <i>American Iron and Steel Institute</i> |
| ARBL | Aços de alta resistência e baixa liga |
| CE | Carbono Equivalente |
| DIN | <i>Deutsches Institut Für Normung E.V.</i> |
| GMAW | <i>Gas Metal Arc Welding</i> |
| MET | Microscopia eletrônica de transmissão |
| MEV | Microscopia eletrônica de varredura |
| MO | Microscopia ótica |
| NTU | Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos |
| SAE | <i>Society of Automotive Engineers</i> |
| ZTA | Zona termicamente afetada |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | AMBIENTE DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO..... | 11 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA..... | 12 |
| 1.3 | OBJETIVO GERAL | 13 |
| 1.4 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 13 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 14 |
| 2.1 | AÇOS | 14 |
| 2.2 | MICROESTRUTURA DOS AÇOS | 15 |
| 2.3 | EFEITOS DOS ELEMENTOS DE LIGA E RESIDUAIS..... | 16 |
| 2.4 | AÇOS COM BAIXO TEOR DE CARBONO..... | 17 |
| 2.5 | AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA..... | 17 |
| 2.6 | SOLDAGEM | 17 |
| 2.7 | PROCESSO GMAW | 19 |
| 2.8 | TRANSFERÊNCIA DO METAL DE SOLDA..... | 20 |
| 2.9 | GÁS DE PROTEÇÃO | 21 |
| 2.10 | VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM..... | 21 |
| 2.11 | DESCONTINUIDADES DE SOLDAGEM..... | 23 |
| 2.12 | TRANSFORMAÇÕES MICROESTRUTURAIS..... | 28 |
| 2.13 | FALHA POR FADIGA E DESCONTINUIDADES DE SOLDAGEM..... | 28 |
| 2.14 | TEMPERABILIDADE..... | 31 |
| 2.15 | SOLDABILIDADE E CARBONO EQUIVALENTE..... | 31 |
| 2.16 | TÉCNICAS DE ANÁLISE DA METALURGIA NA SOLDAGEM..... | 32 |
| 2.17 | ZONA FUNDIDA..... | 33 |
| 2.18 | ZONA TERMICAMENTE AFETADA | 33 |
| 3 | METODOLOGIA | 34 |
| 3.1 | MATERIAIS | 34 |
| 3.2 | MAPEAMENTO DO PROCESSO DE SOLDAGEM..... | 36 |
| 3.3 | CORPOS DE PROVA | 36 |
| 3.4 | INSPEÇÃO VISUAL E ENSAIO POR LÍQUIDOS PENETRANTES..... | 37 |
| 3.5 | ENSAIO DE DURABILIDADE..... | 37 |
| 3.6 | ENSAIO METALOGRÁFICO..... | 38 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.7 | ENSAIO DE MICRODUREZA | 39 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 40 |
| 4.1 | MAPEAMENTO DO PROCESSO DE SOLDAGEM | 40 |
| 4.2 | INSPEÇÃO VISUAL E ENSAIO POR LÍQUIDOS PENETRANTES..... | 40 |
| 4.3 | ENSAIO DE DURABILIDADE..... | 41 |
| 4.4 | ENSAIO METALOGRÁFICO | 42 |
| 4.5 | ENSAIO DE MICRODUREZA | 47 |
| 5 | CONCLUSÕES | 48 |
| | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 49 |
| | REFERÊNCIAS | 50 |

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, em função do crescente aumento da população nos grandes centros urbanos, se observa uma maior atenção voltada às questões de mobilidade urbana, visando propor diferentes alternativas de transporte para as pessoas, contribuindo com a diminuição na concentração de veículos nas ruas. Apesar da grande importância dessa questão, é notória ainda a opção da população ao transporte individual ao invés do transporte público por razões do conforto, flexibilidade e rapidez.

Segundo a Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos [201-], entre os anos de 2011 e 2012, a frota de ônibus coletivos somava 107.000 veículos, transportando em média 40 milhões de pessoas por dia, resultando em uma participação de 86,8% deste tipo de serviço no transporte urbano brasileiro.

Diante deste cenário, as empresas responsáveis pela fabricação de carrocerias de ônibus estão frequentemente trabalhando nas melhorias de seus projetos e processos produtivos com o intuito de oferecer aos seus clientes um produto que atenda às suas demandas com qualidade. Como o serviço urbano possui a característica da alta utilização, a vida útil e, conseqüentemente, a durabilidade dos componentes de sua frota, são fatores muito visados no projeto.

As poltronas de um ônibus coletivo são um dos itens mais importantes, pois precisam oferecer ao usuário, conforto e segurança. Para o proprietário do ônibus, as mesmas necessitam, além disso, suportar os esforços submetidos pelo maior tempo possível. Isso é necessário para evitar as possíveis falhas, que não só ocasionam gastos com manutenção ou reposição de peças, mas também podem acarretar problemas à empresa caso algum passageiro venha a sofrer danos nessa ocorrência. Por fim, para a fabricante, precisa atender às necessidades citadas, de modo a atender também o processo produtivo, com alternativas que facilitem à montagem e com visão no mínimo custo de produção.

1.1 AMBIENTE DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

A Marcopolo S.A. é uma empresa criada em 1949 na cidade de Caxias do Sul/RS. Atua no ramo de encarroçamento de ônibus, sendo a líder nacional em fabricação deste produto e uma das principais no cenário mundial. Possui unidades fabris nos cinco continentes, com matriz situada na mesma cidade de fundação. As carrocerias de ônibus produzidas estão presentes em mais de 100 países.

Possui uma gama de produtos que atende às solicitações nos ramos rodoviários, intermunicipais, urbanos e micros. Na área em questão que é o transporte coletivo urbano, possui grande destaque o modelo *New Torino* que está disponível nas opções *Low Entry* (piso baixo), *Express* (articulado), Motor Dianteiro e Motor Traseiro (MARCOPOLO S.A., 2016).

O desenvolvimento do estudo se dará nos setores de Engenharia Experimental, Engenharia do Produto e Assistência Técnica, contribuindo com a análise do projeto utilizado na poltrona urbana, ilustrada na Figura 1, buscando acrescentar mais dados técnicos à ocorrência dos problemas encontrados, possibilitando em um melhor entendimento do caso.

Figura 1 – Poltrona urbana



Fonte: o autor (2016).

1.2 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho resultará em dados experimentais que avaliem o comportamento de algumas falhas ocorridas em poltronas de ônibus após a alteração da estrutura para permitir ajustes na fixação do pé sustentador. A mudança consistiu em alterar, na longarina da base do conjunto, o tubo retangular (aço SAE 1010) para um perfil aberto tipo U (aço HC 380 LA) de modo a manter as mesmas garantias referentes aos esforços sofridos pelo componente anterior.

A falha desse elemento do ônibus, sem dúvidas, é uma questão muito crítica, pois além dos custos envolvidos para manutenção ou reposição para o cliente, pode ocasionar em danos ao passageiro que usufrui de tal utilização. Todas estas questões influenciam no quesito qualidade, um dos pilares para a competitividade do mercado.

1.3 OBJETIVO GERAL

Analisar o comportamento da soldagem dos aços com baixo teor de carbono e aços de alta resistência e baixa liga verificando a influência do processo na ocorrência das falhas em uma estrutura de poltrona de ônibus.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir do objetivo geral estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) mapeamento do processo de soldagem atual utilizado pela empresa na fabricação das poltronas;
- b) confecção dos corpos de prova;
- c) análise de descontinuidades e falhas no processo de soldagem;
- d) analisar a presença de trincas através de inspeção visual com líquidos penetrantes;
- e) estudar a microestrutura da região soldada através de ensaio metalográfico;
- f) realizar ensaio de durabilidade simulando os esforços aplicados às poltronas nas partidas e paradas do ônibus;
- g) estabelecer os parâmetros de soldagem corretos para os pontos críticos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo foram apresentados estudos e teorias relacionadas à área da soldagem. Primeiramente foram levantados embasamentos voltados à análise dos aços e posteriormente uma revisão em temas importantes no estudo do processo e comportamento da soldagem de materiais. A reunião destes temas foi utilizada para fundamentar este trabalho.

2.1 AÇOS

Denomina-se aço, a liga ferro-carbono que apresenta a composição de geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, contendo também uma estrutura com pequenas quantidades de elementos residuais oriundos dos processos de fabricação. Quando a quantidade desses elementos residuais ou elementos de ligas ultrapassam os níveis normais, classifica-se então como aço-liga (CHIAVERINI, 2005).

Segundo Chiaverini (2005), através da composição de carbono C, pode-se ainda subdividir os aços-carbono em:

- baixo teor de carbono: inferior a 0,2%;
- médio carbono: de 0,2% a 0,5%;
- alto teor de carbono: superior a 0,5%.

Através da composição dos ligantes presentes, subdividem-se os aços-ligas em:

- baixa liga: inferior a 8%;
- alta liga: superior a 8%.

Existem normas de padronização para classificação destes materiais. No Brasil, assim como no mundo, os sistemas adotados, estão de acordo com a *American Iron and Steel Institute* (AISI) ou com a *Society of Automotive Engineers* (SAE). Existem também alguns aços classificados pelo sistema alemão *Deutsches Institut für Normung e.V.* (DIN). No Quadro 1 estão descritos alguns materiais classificados pelo sistema SAE.

Quadro 1 – Sistemas SAE e AISI de classificações dos aços

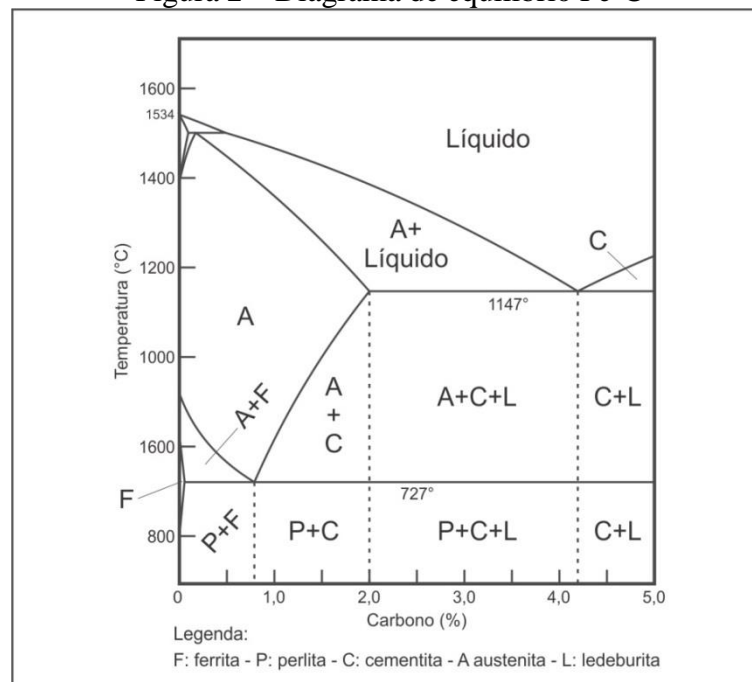
| Designação | Tipos de Aço |
|------------|--|
| 10XX | Aços-carbono comuns |
| 41XX | Aços-Cr-Mo com 0,4 a 1,1% de Cr e 0,08 a 0,35% de Mo |
| 51B60 | Aços-Cr com 0,8% de Cr e 0,0005 a 0,003% de boro |

Fonte: adaptado de Chiaverini (2005).

2.2 MICROESTRUTURA DOS AÇOS

Além da composição química, outro fator muito importante é a microestrutura do material. O diagrama de equilíbrio Fe-C, conforme Figura 2, esquematiza as fases da liga em função da temperatura e composição da mesma. Algumas microestruturas básicas encontradas nos aços são: a cementita, a ferrita, a perlita e a austenita (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Figura 2 – Diagrama de equilíbrio Fe-C



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

A cementita é um carboneto de ferro (Fe_3C) com 6,7% de carbono na composição. Esta microestrutura contribui para a alta dureza e resistência mecânica dos aços, porém a fragilidade desta fase reduz a ductilidade dos mesmos.

A ferrita é constituída por ferro à temperatura ambiente com uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado e sob a forma alotrópica alfa (α). Possui características magnéticas em temperaturas inferiores a 770 °C. Ao contrário da cementita, possui baixa dureza e resistência mecânica, porém alta ductilidade e resistência ao impacto (VAN VLACK, 2003).

A perlita é uma união composta por 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita, disposta na forma de lâminas de aproximadamente 1 micrômetro de espessura. Como se espera, apresenta propriedades intermediárias aos das duas microestruturas anteriormente citadas, com uma resistência à tração média de 740 MPa.

Por fim, o quarto constituinte básico do aço é a austenita. É formada por uma solução sólida entre carbono e ferro na forma alotrópica gama (γ), com uma estrutura cristalina cúbica de face centrada, contribuindo para a maior solubilidade do carbono. Apresenta boa resistência mecânica e tenacidade (CALLISTER, 2012; CHIAVERINI, 2005).

2.3 EFEITOS DOS ELEMENTOS DE LIGA E RESIDUAIS

O fósforo, o manganês, o enxofre, o silício e o alumínio são elementos residuais resultantes do processo de fabricação que, em reação com outros elementos não-metálicos, formam as inclusões não-metálicas. Estes elementos básicos por si só, já interferem nas propriedades mecânicas dos aços-carbono em comum (SILVA; MEI, 2010; SOUZA, 1989).

O fósforo é uma impureza nociva ao aço quando em grandes concentrações. Devido a isso, limita-se a composição nos aços em uma faixa entre 0,005% e 0,1%. Confere ao aço fragilidade a frio ao dissolver-se na ferrita, endurecendo-a, contribuindo também para a baixa resistência ao impacto e tenacidade. Em contrapartida, o endurecimento causado pelo fósforo, acarreta no aumento da resistência ao desgaste, mecânica e corrosão, sendo melhor observado em aços de baixo teor de carbono, onde o efeito desta impureza será minimizada.

O manganês é utilizado como desoxidante no processo de fabricação do aço. Colabora com o aumento da dureza e resistência mecânica. Aços-carbono comuns possuem geralmente um valor máximo de 0,8% de manganês. Teores acima dessa faixa serão encontrados em ligas especiais.

O enxofre, limitado à composição de 0,1% e para aços de baixo teor de carbono, não interfere significativamente as propriedades mecânicas dos mesmos.

O silício é um agente desoxidante no processo de fabricação do aço quando o mesmo está fundido. Quando dissolvida na ferrita, se percebe um pequeno aumento na dureza e resistência mecânica, com interferência menor ainda na ductilidade.

O alumínio possui e cumpre a mesma função principal no silício, porém com eficiência maior no efeito desoxidante. Além disso, contribui para o controle do crescimento dos grãos dos aços (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005; SILVA; MEI, 2010).

O titânio diminui a endurecibilidade em aços ao Cr de média composição do elemento de liga, impedindo a formação da austenita em casos com alto teor de Cr.

Por fim, o nióbio melhora a resistência nos aços recozidos e aumenta a tenacidade em baixas temperaturas nos aços ferríticos-perlíticos. Seu emprego em aços de alta resistência e baixa liga é recente, porém está em crescimento, com composições entre 0,001% e 0,1%.

2.4 AÇOS COM BAIXO TEOR DE CARBONO

Conforme já fora dito anteriormente, os aços com baixo teor de carbono possuem em sua composição menos do 0,2% de C. O seu baixo custo de produção e, conseqüentemente, comercialização faz com que se configurem entre os mais utilizados na indústria, com aplicações em perfis estruturais, tubos, construção civil, entre outros. Apresentam em geral baixa dureza e resistência mecânica, porém elevados níveis de ductilidade e resistência ao impacto, além de boa soldabilidade (CALLISTER, 2012; CHIAVERINI, 2005).

2.5 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) possuem níveis inferiores de elementos de liga, porém possuem altos limites de resistência. As propriedades destes materiais são obtidas por um processo de endurecimento através da precipitação e refino de grão, obtido pela inclusão controlada de alguns elementos de liga, principalmente o nióbio. Apresentam também um excelente soldabilidade, elevadas propriedades de conformação à frio e de resistência à fratura frágil em temperaturas menores. (SILVA; MEI, 2010).

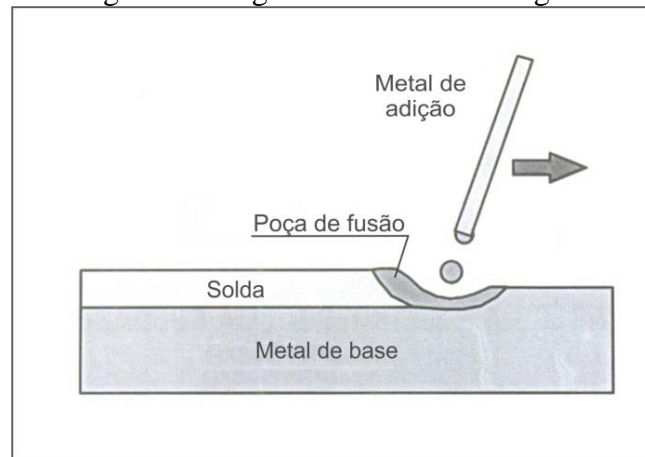
2.6 SOLDAGEM

Entre os métodos de união de materiais, a soldagem é a opção de processo mais utilizada na indústria, com aplicações desde fabricações de estruturas de portões até aplicações em plantas nucleares, automotivas, navais e etc. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

O processo consiste da união de dois materiais, ou através da fusão de ambos, com ou sem a adição de um material adicional, ou pelo contato direto dos dois em fase sólida ou semi-sólida (MACHADO, 1996).

As juntas são regiões onde ambas as peças serão unidas através do processo de soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). Os materiais primários dos componentes que estão sendo soldados levam o nome de metal base. Nos métodos de soldagem por fusão, geralmente ocorre a utilização de um material adicional a ser fundido, o chamado metal de adição. No decorrer do processo, estes elementos serão fundidos, formando a poça de fusão. Ao resultado de toda esta operação se denomina solda. Na Figura 3 estão ilustradas estas regiões básicas que formam as juntas soldadas.

Figura 3 – Regiões básicas da soldagem

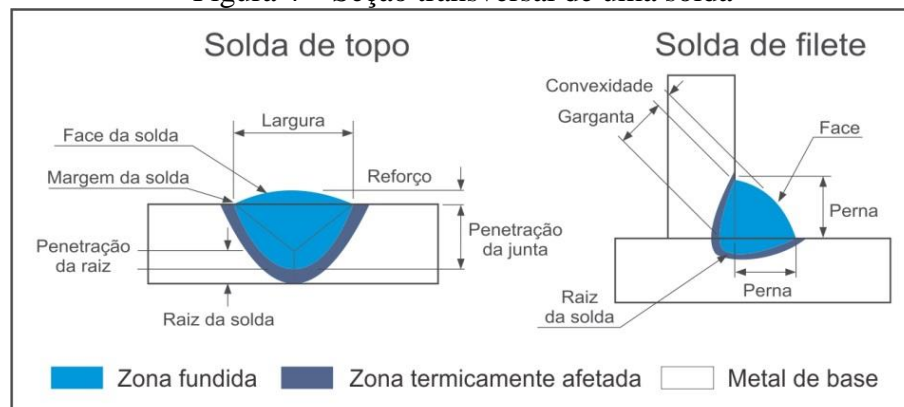


Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

Entretanto, com grande frequência faz-se necessária a alteração da geometria de algum dos extremos das juntas a serem soldadas. Esta adaptação é realizada através da usinagem de ranhuras, os chamados chanfros. O projeto do mesmo leva em consideração a espessura dos componentes, o volume a ser depositado, as condições de execução da soldagem e também o próprio tipo de material que está sendo utilizado (MACHADO, 1996). Na Figura 4 estão ilustradas algumas regiões geométricas denominadas anteriormente.

A zona fundida é a região onde se encontram misturados o metal base fundido com o metal de adição. O calor gerado no processo provoca alterações na estrutura e propriedades em certa região do metal base, mesmo sem a ocorrência de fusão do mesmo. Esta área é denominada zona termicamente afetada (ZTA). Em alguns casos de solda de topo é utilizado o cobre-junta que se trata de uma peça disposta abaixo da região que receberá o cordão de solda com o intuito de conter o metal fundido. As zonas mencionadas também estão ilustradas na Figura 4.

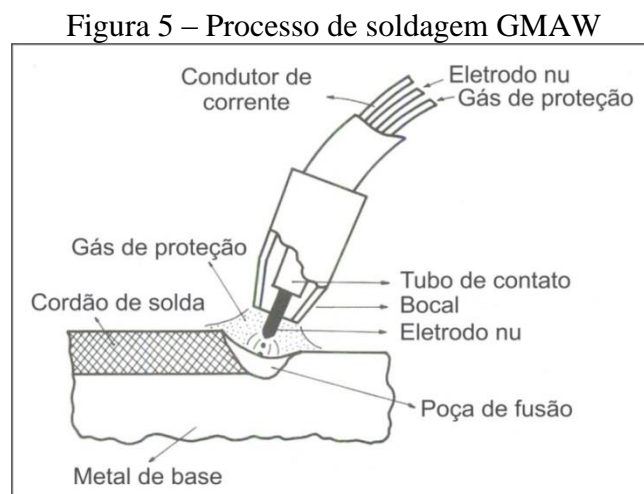
Figura 4 – Seção transversal de uma solda



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

2.7 PROCESSO GMAW

No processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), a fonte de aquecimento que irá unir ambas as peças é gerada através de um arco elétrico criado entre um eletrodo metálico (maciço, consumível e sem revestimento), alimentado de forma contínua, e a peça final. A poça de fusão fica envolta de um gás, inerte ou ativo, que a protege contra as contaminações da atmosfera. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). A Figura 5 mostra esquematicamente o processo.



Fonte: adaptado de Wainer, Brandi e Mello (1992).

Tal operação possui grande facilidade de ser robotizada, visto a capacidade de soldagem, com boa estabilidade do arco, em todas as posições. Fator importante também é a não utilização de fluxo, contribuindo para a baixa produção de escória (MACHADO, 1996).

Existe uma gama de diâmetros de eletrodos disponíveis para o processo, sendo que os mais usualmente empregados estão na faixa que vai de 0,8 mm até 1,6 mm. Isso permite que materiais de pequenas espessuras como chapas de 0,5 mm, por exemplo, possam ser soldados pelo processo. Mesmo que não exista determinação para um limite máximo de espessura possível de ser soldada, comumente chapas acima de 15 mm são unidas através de algum outro processo de soldagem (MACHADO, 1996).

Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992), algumas vantagens do processo são:

- alta taxa de deposição;
- possibilidade de operação em qualquer posição;
- alta velocidade de soldagem;
- inexistência do fluxo de soldagem e, conseqüentemente, inexistência de escória;

- menor grau de exigência da habilidade do soldador.

Como limitações do processo podem ser citadas:

- resfriamento mais rápido;
- grande sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos do processo;
- equipamento com custo maior quando comparado à soldagem com eletrodos revestidos;
- alta emissão de raios ultravioleta.

2.8 TRANSFERÊNCIA DO METAL DE SOLDA

No processo GMAW, a forma na qual o material do eletrodo consumível é transferido para a poça de fusão terá grande influência nas características resultantes da operação como a estabilidade do arco, geração de respingos e absorção de gases pelo material da poça de fusão. A polaridade e tipo da corrente, a tensão, as características do eletrodo entre outros fatores determinam esta transferência do metal, podendo ser classificados basicamente em 4 modos básicos: transferência por curto-circuito, globular, por aerossol e por corrente pulsada (MACHADO, 1996; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). A Figura 6 esquematiza alguns modos de transferência do metal de solda.

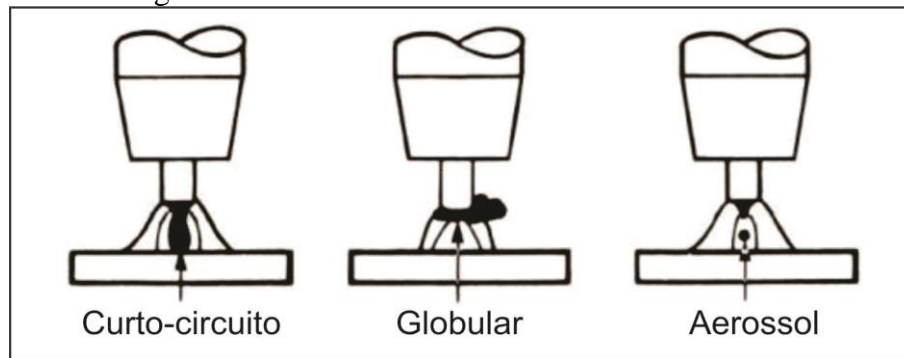
A transferência por curto-circuito tem como princípio básico a atração pela tensão superficial da poça de solda. Utiliza baixos níveis de tensão e corrente, gerando uma poça de pequenas dimensões e de rápida solidificação, de modo a ser aplicada na soldagem de peças de pequenas espessuras.

A transferência globular apresenta parâmetros de tensão e corrente maiores que o modo anterior, gerando também uma gota na ponta do eletrodo. A transferência neste caso se dá principalmente pela ação da gravidade.

Na transferência por aerossol, as forças principais que agem sobre o processo são de origem eletromagnética. Utiliza níveis de corrente acima da chamada corrente de transição fazendo com que surjam gotas menores na ponta do eletrodo, porém em maior quantidade, de modo a se dispor sob uma forma semelhante a uma névoa.

O modo de transferência por corrente pulsada é semelhante ao aerossol, porém neste existe a ação de duas correntes distintas, sendo uma baixa, para manter o arco elétrico e outra em picos, responsável pela transferência de apenas uma gota. A corrente média é bem menor, permitindo a soldagem de espessuras menores (ROMERO NIETO; FLÓREZ, 2012).

Figura 6 – Modos de transferência do metal de solda



Fonte: adaptado de ESAB (2005).

2.9 GÁS DE PROTEÇÃO

O gás de proteção tem a função de proteger a poça de fusão da atmosfera que a circunda. A sua escolha interfere diretamente no processo de soldagem. O modo de transferência do metal, o formato do cordão de solda, a penetração e algumas discontinuidades encontradas ao fim da operação são alguns dos itens que sofrem estas influências.

Em soldagem de aços-carbono e aços de baixa liga comumente se utiliza da mistura de um gás ativo, geralmente o dióxido de carbono (CO_2), com um gás inerte, representado pelo argônio. O primeiro tem como principais características o baixo custo, alta penetração, porém alta geração de respingos, sendo esta última controlada pela adição do argônio que, além disso, melhora a qualidade do cordão de solda (MACHADO, 1996; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Além da escolha do tipo de gás ser utilizado, é preciso ficar atento para que a vazão seja o suficiente para garantir uma proteção eficiente contra contaminantes da atmosfera. Maiores dimensões da poça de fusão exigirão um aumento na vazão do gás. A porosidade, perda propriedades e elementos de liga no metal de solda são alguns problemas decorrentes da baixa vazão do gás. Em contrapartida, altas vazões possuem um custo também elevado e podem acarretar em depressões na poça de fusão, tornando a forma do cordão de solda irregular.

2.10 VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM

As variáveis do processo de soldagem podem ser classificadas como fixas, ajustáveis primárias e ajustáveis secundárias. As variáveis fixas são aquelas determinadas antes de a

operação iniciar. Já as ajustáveis primárias, são os chamados parâmetros de soldagem, que englobam o ajuste da tensão, corrente e velocidade de trabalho. Por fim, as variáveis ajustáveis secundárias envolvem os ajustes feitos durante a operação de soldagem, como a extensão e ângulo de deslocamento da tocha (MACHADO, 1996).

A bitola do eletrodo é determinada levando-se em conta fatores como espessura do metal de base, posição de soldagem e outros fatores que envolvam a poça de solda e a energia de soldagem requerida. Para que se obtenham condições adequadas de operação, existe uma faixa de corrente para cada bitola de arame. A Tabela 1 apresenta algumas relações entre o diâmetro do eletrodo e sua faixa de operação para alguns materiais.

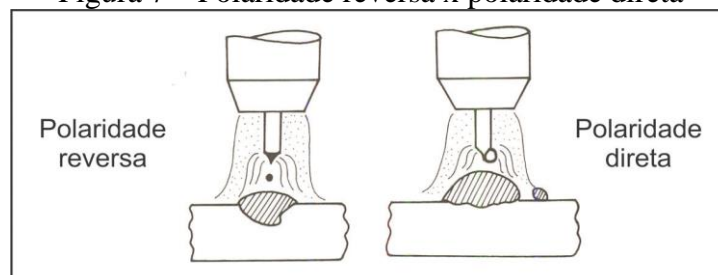
Tabela 1 – Faixas de correntes para diferentes bitolas e materiais

| Material | Bitola (mm) | Corrente (A) |
|-----------------------|-------------|--------------|
| Aço-carbono | 0,8 | 40 – 200 |
| | 1,0 | 60 – 260 |
| | 1,2 | 120 – 360 |
| | 1,6 | 270 – 450 |
| Alumínio e suas ligas | 0,8 | 50 – 175 |
| | 1,2 | 90 – 250 |
| | 1,6 | 160 – 350 |
| | 2,4 | 220 – 400 |
| | 3,2 | 350 – 470 |

Fonte: adaptado de Machado (1996).

A soldagem GMAW geralmente é operada com corrente contínua e polaridade reversa, eletrodo positivo, contribuindo com um arco mais estável e que atinge maiores penetrações. A polaridade direta possui uma transferência de material instável e pode ser utilizada em alguns casos onde se visa uma grande taxa de deposição sem interesse na penetração. A Figura 7 exhibe a comparação entre os comportamentos da polaridade na soldagem (MACHADO, 1996; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Figura 7 – Polaridade reversa x polaridade direta



Fonte: adaptado de Wainer, Brandi e Mello (1992).

A corrente é determinada levando-se em conta a espessura das peças, a bitola do eletrodo e a geometria do cordão de solda, possuindo influência direta sobre a taxa de deposição, modo de transferência de metal, penetração e reforço. Para casos onde a tensão constante é aplicada, a velocidade de alimentação faz o controle da corrente, configurando uma relação diretamente proporcional entre ambas.

A tensão interfere principalmente no formato do cordão, mas também no modo de transferência do metal e comprimento do arco. Um aumento na tensão de soldagem contribuirá para um aumento na largura do cordão de solda, porém um aumento também do arco, resultando no aparecimento de respingos, porosidade e mordedura. Tensões mais baixas facilitam a absorção de gases, resultando em porosidade e demais problemas associados. Contribui também para uma discordância entre peça e cordão, sendo que este último pode aparecer de forma estreita e convexa (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

A velocidade de soldagem afeta a taxa de deposição e também a geometria da poça de fusão. Velocidades mais lentas elevam o custo da operação e podem gerar problemas referentes à alta energia envolvida. Velocidades maiores acarretam em uma ZTA menor, menores dimensões do cordão de solda, menor penetração e fusão insuficiente do metal de solda. Defeitos como a mordedura podem ocorrer em virtude das altas tensões de operação.

2.11 DESCONTINUIDADES DE SOLDAGEM

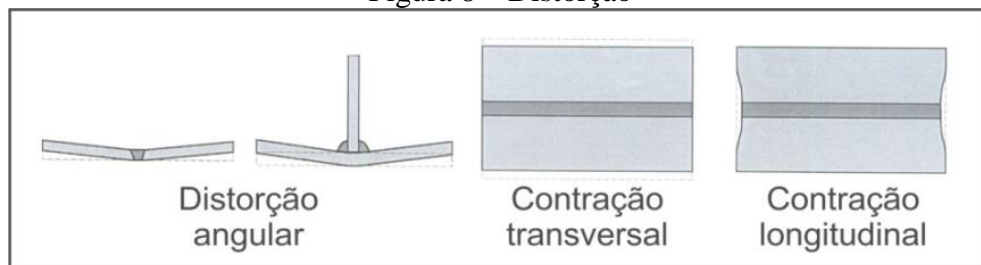
Segundo Augusto Filho [19--], descontinuidade é quando ocorre uma interferência na homogeneidade das propriedades físicas, mecânicas ou metalúrgicas de uma peça. Em contrapartida, isto só deve ser considerado um defeito quando ultrapassar os requisitos mínimos estipulados pela norma aplicada ao processo.

As descontinuidades dimensionais são aquelas que ocorrem nas dimensões ou na geometria do cordão de solda. A distorção, dimensão e perfil incorreto da solda, são alguns exemplos deste tipo de descontinuidade.

A distorção, esquematizada na Figura 8, é consequência das deformações plásticas resultantes do aquecimento não uniforme no processo de soldagem. Caracteriza-se por alterações que ocorrem na geometria dos componentes soldados, decorrentes de operações com utilização de chanfros inadequados, juntas sem fixação, onde há o fácil movimento entre peças, e etc. A redução de calor e metal depositado, a fixação das juntas a serem soldadas e a utilização de um chanfro adequado, são algumas das ações tomadas para evitar este tipo de descontinuidade (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Além do desperdício de material, as dimensões que não atendam a determinação de projeto podem ser consideradas defeitos, pois através da elaboração do mesmo são analisadas variáveis que envolvem propriedades mecânicas como a resistência à tração, por exemplo. Já o problema envolvendo perfis incorretos da solda está relacionado com o fato dos mesmos serem concentradores de tensões, contribuindo com o surgimento e propagação de trincas. A manipulação incorreta do eletrodo e a utilização de parâmetros de soldagem inadequados são os principais fatores geradores destas imperfeições. Na Figura 9 estão ilustrados alguns perfis de soldas inadequados (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

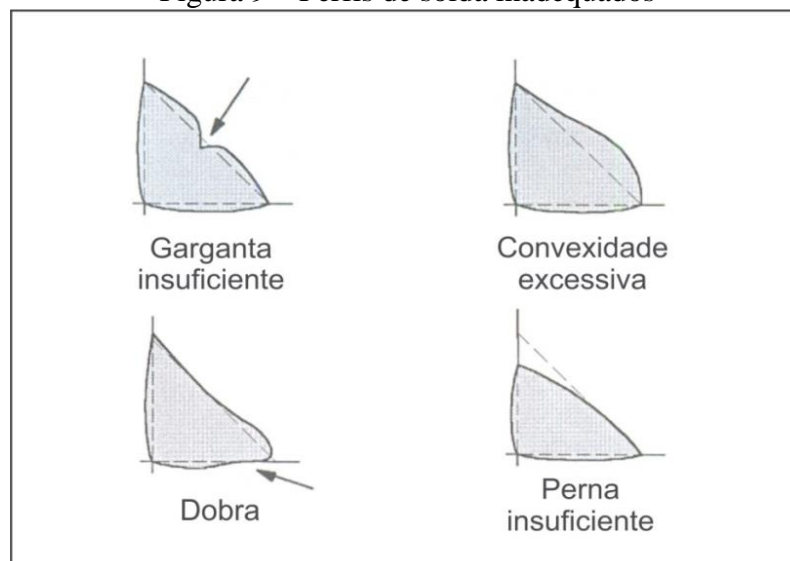
Figura 8 – Distorção



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

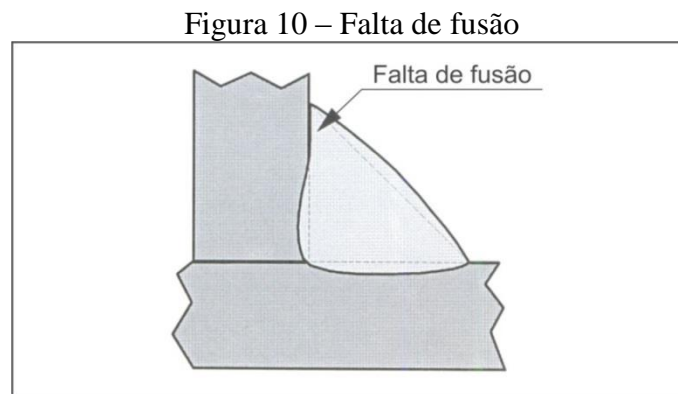
Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005), as discontinuidades estruturais são aquelas que ocorrem na micro ou macroestrutura da solda devido à presença de inclusões ou à quantidade insuficiente de material depositado. A falta de fusão, inclusões de escória, porosidades, mordeduras, penetração insuficiente e trincas, são alguns exemplos deste tipo de discontinuidade.

Figura 9 – Perfis de solda inadequados



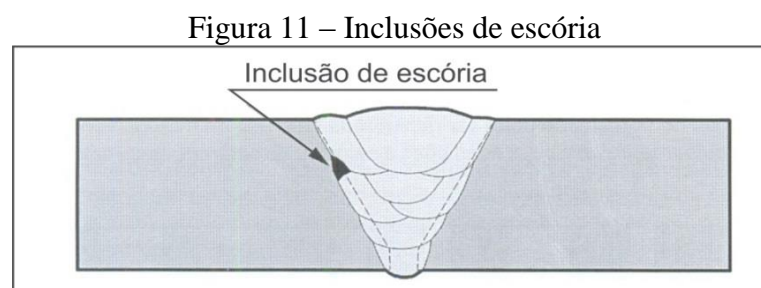
Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

A falta de fusão se caracteriza pela união incompleta entre a zona fundida e o metal de base, ou entre passes adjacentes. Uma das causas é o fato da energia de soldagem não ser o suficiente para aquecer o metal da junta, resultante de uma baixa corrente ou elevada velocidade de soldagem sendo utilizada. As consequências são semelhantes ao defeito nos perfis de solda, facilitando o surgimento de trincas. Em peças de um grau de importância um pouco mais elevado, esta descontinuidade é inaceitável, sendo necessária uma ressoldagem da junta. A anotação na Figura 10 demonstra a região com falta de fusão, esquematicamente.



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

As inclusões de escória são materiais não metálicos que ficam presos na região soldada, conforme ilustrado na Figura 11. No processo GMAW, apesar da inexistência da escória, ocorrem inclusões de óxidos, que são originadas do uso de misturas de gases com elevado teor de oxigênio. A presença destas descontinuidades aprisionadas ao metal de solda age como concentradora de tensão, facilitando a propagação de trincas (TATAGIBA; GONÇALVES; PARANHOS, 2012).

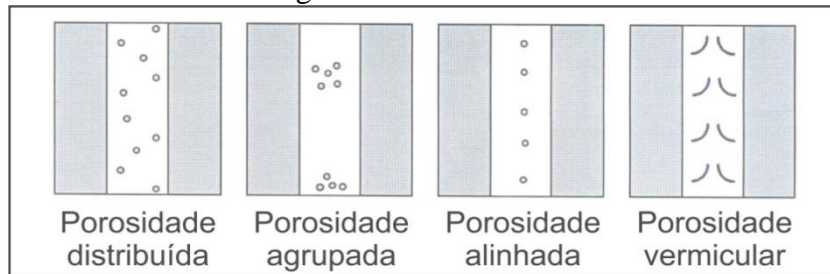


Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

As porosidades são concentrações de gases que ficam presos na superfície ou no interior do metal de solda. Os poros podem estar dispostos de diversas maneiras, conforme ilustrado na Figura 12. Entre as causas mais comuns estão os contaminantes da atmosfera, má

limpeza das superfícies, alta oxidação e umidade na região da junta e parâmetros de soldagem inadequados (ESAB, 2005).

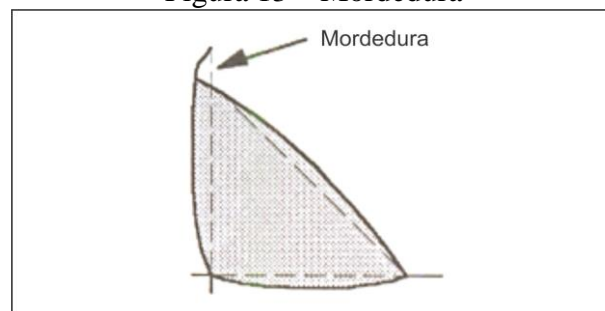
Figura 12 – Porosidades



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

A mordedura, representada na Figura 13, é uma entrância nas bordas do cordão de solda geralmente causada pelo uso inadequado de parâmetros de soldagem, principalmente velocidade de soldagem e tensão. Também se configura como um concentrador de tensões, afetando principalmente a resistência à fadiga do metal soldado (ESAB, 2005).

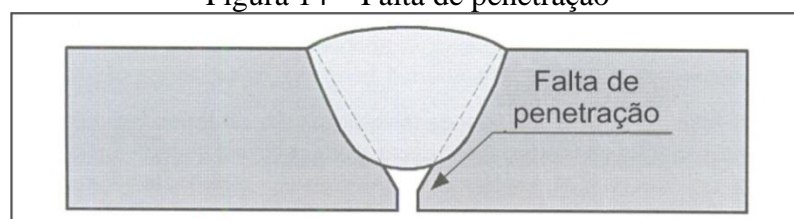
Figura 13 – Mordedura



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

A falta de penetração ocorre quando o metal de solda não se funde e preenche por completo a raiz da solda, conforme é visto na Figura 14. Geralmente a utilização de uma corrente muito baixa é o principal causador deste defeito. Velocidades elevadas de soldagem e bitola de eletrodo muito grande são outros fatores que podem originar a falta de penetração.

Figura 14 – Falta de penetração



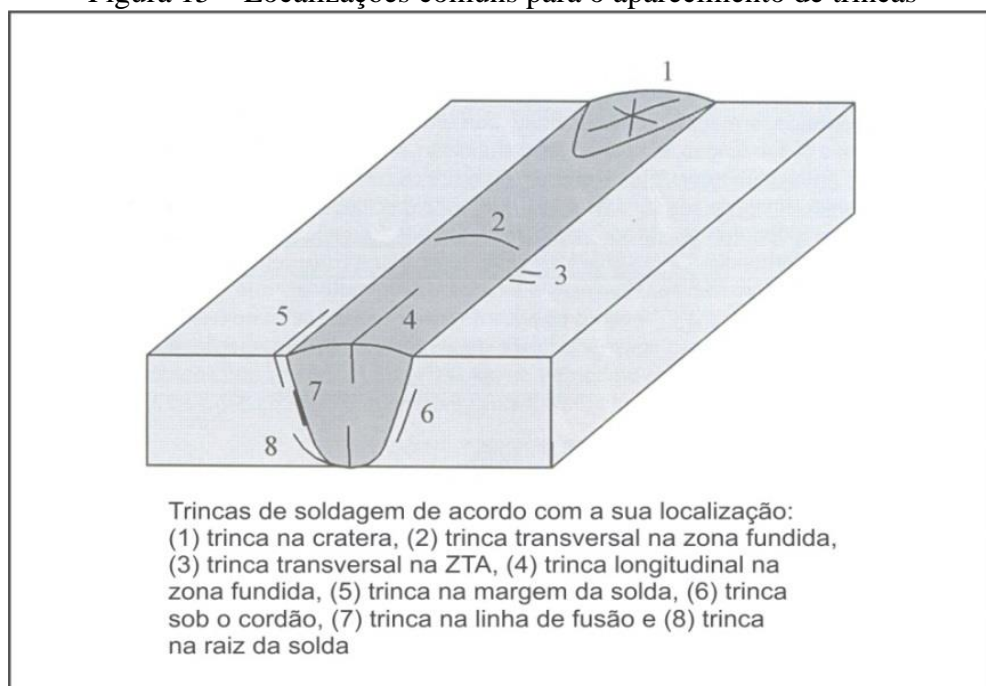
Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

Por fim, as trincas são grandes concentradoras de tensões e as mais graves entre as discontinuidades encontradas nos processos de soldagem. As mesmas podem surgir da solidificação do cordão de solda, no resfriamento da junta, em posteriores tratamentos térmicos para alívio de tensões ou até em uso muito tempo após o processo de união. Esse aparecimento ocorre através de dois mecanismos: fissuração a quente e fissuração a frio, sendo este último o mais comum em aços-carbono e de baixa liga, principalmente naqueles onde ocorre a formação da estrutura martensítica (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

A fissuração na solidificação ou fissuração a quente é bastante evidenciada na soldagem, sendo observado também na fundição. Surge quando o material está submetido a elevadas temperaturas e tem como característica a formação de uma fina camada de material líquido entre os contornos de grão na fase final de solidificação do material.

Também chamada de fissuração pelo hidrogênio, a fissuração a frio surge e vai se propagando lentamente (podendo demorar dois dias) no crescimento de grão após o processo de soldagem. A presença de hidrogênio na poça de fusão, uma microestrutura sensível (estimada pelo cálculo do carbono equivalente do aço), a temperatura e uma alta exigência mecânica da junta são os fatores principais para a formação de trincas no processo (MARQUES, MODENESI; BRACARENSE, 2005). A Figura 15 ilustra localizações típicas para o aparecimento de trincas.

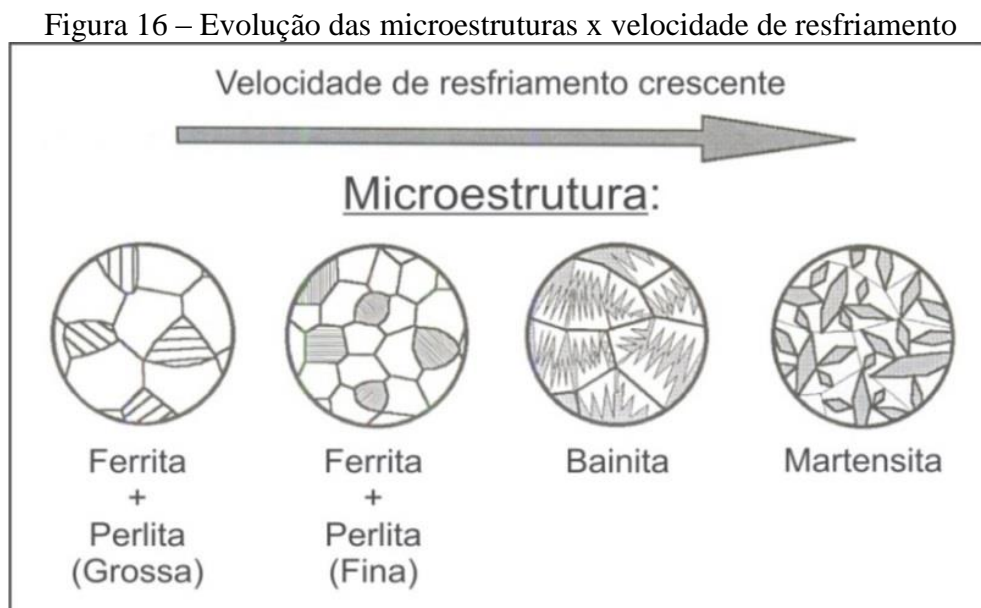
Figura 15 – Localizações comuns para o aparecimento de trincas



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

2.12 TRANSFORMAÇÕES MICROESTRUTURAIS

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005), a temperatura de transformação da austenita e a taxa de resfriamento são inversamente proporcionais. Quando o resfriamento ocorre de forma mais rápida, a austenita tende a ter dificuldades na segregação (alteração de composição entre pontos diferentes do material em consequência da solidificação). A presença de elementos de liga também contribui para esta condição. Com isso, o resultado será a formação de uma perlita de baixíssima espessura. Porém, para temperaturas de transformação ainda mais baixas, pode-se ter a ocorrência da chamada bainita, que confere excelente resistência mecânica ao aço. Níveis ainda maiores da velocidade de resfriamento contribuem para o aparecimento de uma microestrutura de elevada dureza e de extrema fragilidade, denominada martensita. A Figura 16 ilustra a evolução da microestrutura em função da velocidade de resfriamento.



Fonte: adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

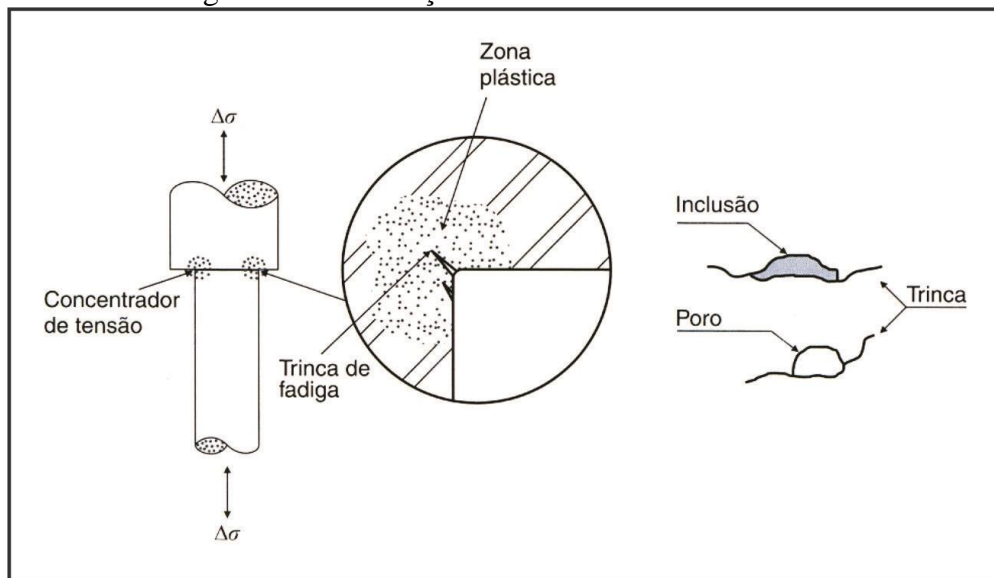
2.13 FALHA POR FADIGA E DESCONTINUIDADES DE SOLDAGEM

As falhas por fadiga são consequências de tensões que agem sobre o corpo em repetidas vezes ou ciclos, sendo estas bem menores do que as cargas máximas suportadas, ou seja, da resistência mecânica do material. Tais ocorrências são geralmente imprevisíveis e representam mais 90% das causas de danos em serviço de materiais metálicos (BUDYNAS; NISBETT, 2011; GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

A fratura de fadiga se subdivide em três etapas distintas ocorrentes. A primeira etapa, podendo ser de curta duração, é caracterizada pela nucleação da trinca. Em um segundo momento de maior extensão, ocorre a propagação da trinca. Por fim, de maneira instantânea, é evidenciada a falha catastrófica do material.

A nucleação ou início da trinca ocorrerá em regiões concentradoras de tensões, caracterizadas por apresentarem distorções nas linhas de tensões, interferindo na homogeneidade dessa distribuição. Os pontos de alta concentração de tensões, que contribuem para o surgimento da fissura, são evidenciados em contornos geométricos, microtrincas resultantes do processo de fabricação e em juntas, próximas ao cordão de solda e nos defeitos gerados. Na Figura 17 estão ilustrados elementos críticos favoráveis à nucleação da trinca.

Figura 17 – Nucleação da trinca: elementos críticos



Fonte: adaptado de Garcia, Spim e Santos (2012).

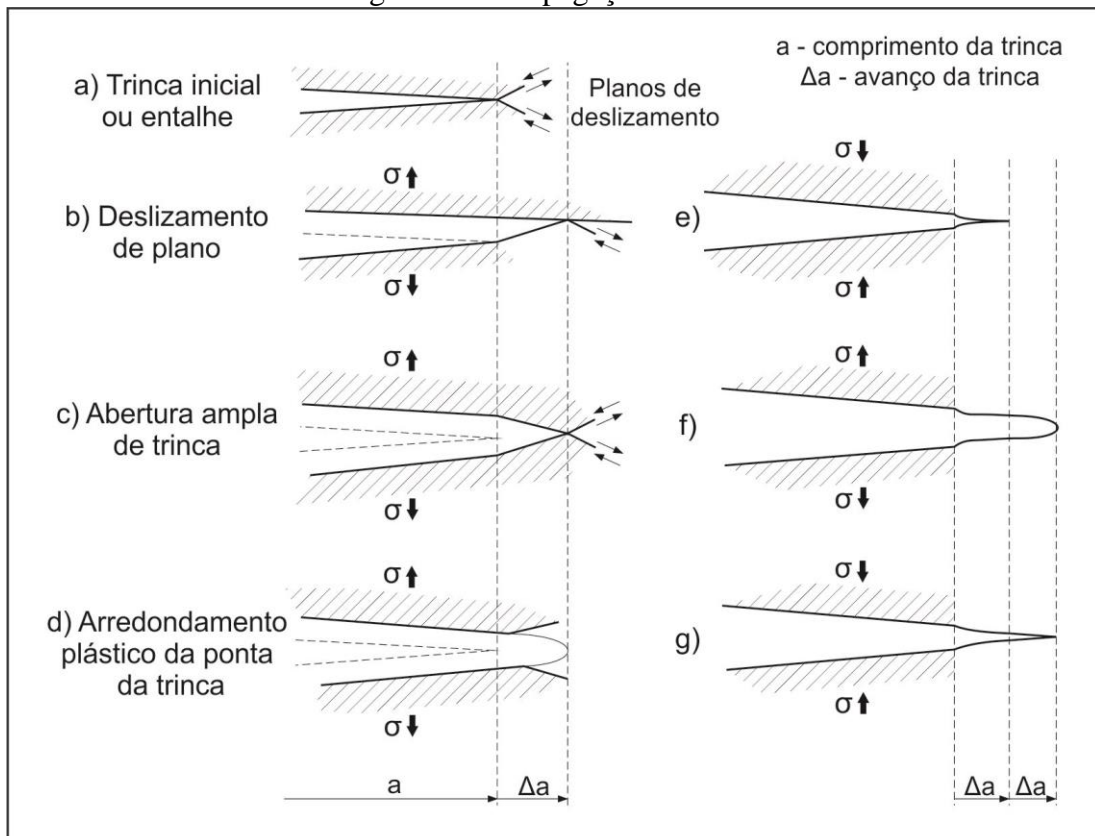
A propagação da trinca ocorre através da deformação na zona plástica na ponta da trinca, consequentes da ação da tensão cíclica menor que o limite de escoamento. Durante este ciclo, a tensão de tração é responsável pelo crescimento da trinca, enquanto a tensão de compressão restabelece o concentrador de tensão deformando o limite interior da trinca para o formato pontiagudo com o fechamento da trinca. Ao fim de série, o comprimento da fenda cresce na ordem de $2,54 \times 10^{-7}$ até $2,54 \times 10^{-3}$ mm (10^{-8} até 10^{-4} in). A Figura 18 esquematiza o processo de propagação da trinca (NORTON, 2004; GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

O último estágio, com duração imediata, corresponde à fratura brusca final. É possível observar na macroestrutura da superfície da falha, as chamadas marcas de praia, consequente da ação das mudanças no ciclo de tensões seja em módulo ou frequência de

aplicação. Bandas mais escuras destas marcas estão relacionadas à níveis altos de tensões, enquanto os níveis mais baixos estão vinculados às bandas mais claras. A Figura 19 apresenta esquematicamente algumas superfícies após a fratura em fadiga.

Conforme já mencionado, as descontinuidades originadas nos processos de soldagem são consideradas concentradoras de tensões, contribuindo para a formação das microtrincas. Logo, tais elementos devem ser minimizados ao máximo. Os efeitos das descontinuidades sobre as falhas por fadiga têm sido observados através de ensaios realizados. Uma concentração em torno de 1% de porosidades encontradas em algumas dessas análises, podem ser responsáveis pela redução de 30% da resistência à fadiga, ao diminuir a área da seção transversal preenchida com material (BRANCO; FERNANDES; CASTRO, 1999).

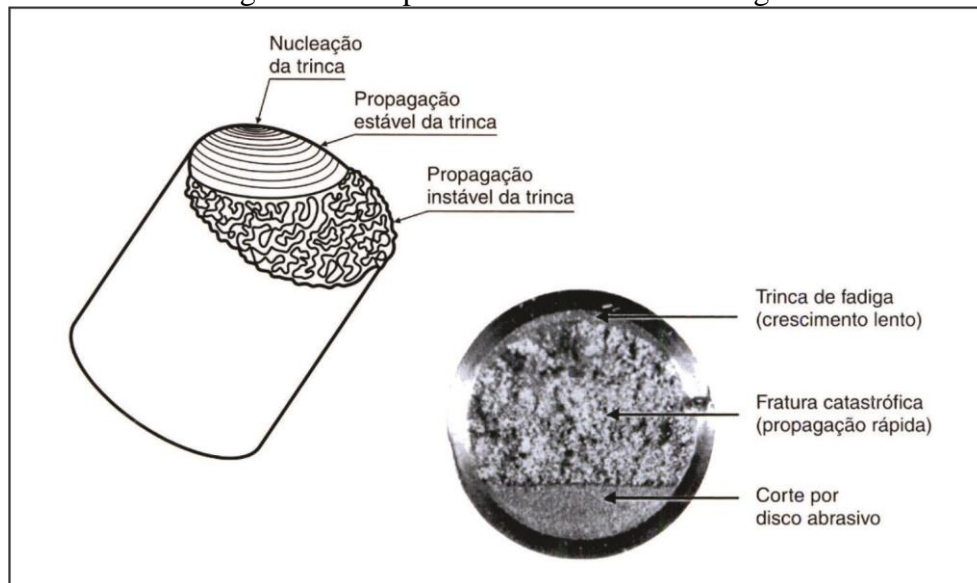
Figura 18 – Propagação da trinca



Fonte: adaptado de Garcia, Spim e Santos (2012).

Os defeitos de forma como o excesso de material e mordeduras também agem sobre o material como concentradores de tensão. No caso desta última descontinuidade, os contornos dos raios característicos desse defeito se comportam como um entalhe, que é a definição de uma geometria que interfere no fluxo de cargas na estrutura do material. Esta situação facilita o surgimento das trincas (BRANCO; FERNANDES; CASTRO, 1999).

Figura 19 – Superfícies fraturadas em fadiga



Fonte: adaptado de Garcia, Spim e Santos (2012).

2.14 TEMPERABILIDADE

A temperabilidade está relacionada com a facilidade que o aço tem de endurecer ou a profundidade de endurecimento atingida diante a um tratamento térmico, com a simultânea obtenção de máxima tenacidade. O processo de soldagem pode ser considerado um tratamento termomecânico severo devido a certos aspectos envolvidos como, por exemplo, a alta energia térmica envolvida. O tamanho de grão austenítico e a presença de elementos de liga são os principais fatores que contribuem para tal propriedade metalúrgica (COLPAERT, 2008; SOUZA, 1989).

As microestruturas desejáveis ao fim do processo são a bainita e martensita revenida, possuindo esta última fragilidade menor do que a martensita, obtida através do revenimento.

A austenita com granulação mais fina juntamente com inclusões não-metálicas e carbonetos diminuem a temperabilidade dos aços pois aceleram a nucleação das microestruturas. Em contrapartida, a austenita de estrutura homogênea, com maior tamanho de grão e, principalmente, a presença de elementos de liga, em sua maioria, contribui para o aumento da temperabilidade ao retardarem a nucleação (CHIAVERINI, 2005).

2.15 SOLDABILIDADE E CARBONO EQUIVALENTE

A soldabilidade está relacionada com a capacidade na união de materiais mediante processos de soldagem, assegurando a qualidade técnica da junta, sem a necessidade de

executar procedimentos prévios, durante ou posteriores à operação (NIEBLES; UNFRIED; TORRES, 2014).

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005), tal característica é afetada pelos efeitos da combinação entre os elementos de liga e o carbono, podendo ser expressa através do cálculo do carbono equivalente (CE), mostrada na Equação 1 a seguir:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3} \quad (\text{eq. 1})$$

Níveis maiores de carbono equivalente em um aço facilitam o surgimento de trincas a frio, reduzindo a qualidade da junta soldada. É importante ressaltar que somente o estudo pela fórmula acima não é suficiente para análise final, pois fatores como espessura e energia de soldagem envolvida também devem ser analisados (GUIMARÃES; SILVA; SILVA, 2011).

2.16 TÉCNICAS DE ANÁLISE DA METALURGIA NA SOLDAGEM

A soldagem provoca alterações na estrutura da junta oriundas das mudanças da temperatura e deformações plásticas ocorridas no processo. Grande parte destas pode prejudicar o desempenho do material e por isso deve se ter muita atenção quanto à sensibilidade do material escolhido (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Existem diversos métodos que visam analisar estes comportamentos das propriedades em vários níveis da estrutura do material. Algumas técnicas e focos de análise estão descritas no Quadro 2.

Quadro 2 – Níveis estruturais e técnicas de análise aplicadas

| Nível estrutural | Dimensões Aprox. | Exemplos de técnicas de estudo | Detalhes comuns |
|------------------|------------------|---|--|
| Macroestrutura | > 100 µm | Macrografia, Radiografia | Segregação, trincas, camadas cementadas. |
| Microestrutura | 100 µm a 0,1 µm | Microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) | Tamanho de grão, microconstituintes, microtrincas. |
| | 0,1 µm a 0,1 nm | Microscopia eletrônica de transmissão (MET) | Precipitados submicroscópicos, células de deslocações. |

Fonte: adaptado de Machado (1996).

2.17 ZONA FUNDIDA

A região da zona fundida mais próxima do arco elétrico possui a maior temperatura da poça de fusão, ocorrendo a mistura entre os materiais do metal de base e eletrodo. A interação com os gases de proteção também é evidenciada nesta área.

Posterior a esta área, na fronteira entre a poça de fusão e o metal de base não fundido, a temperatura irá diminuir até a temperatura de solidificação do material, resultando numa estrutura com menor tenacidade. É nesta etapa do processo em que descontinuidades como a porosidade e a formação de inclusões podem aparecer.

Durante o resfriamento da poça de fusão e após a solidificação do material, algumas modificações como o aumento no tamanho de grão, formação de carbonetos e transformações de fase do metal de solda podem ocorrer (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

2.18 ZONA TERMICAMENTE AFETADA

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005), as características da ZTA estão interligadas com o material de base e processo de soldagem.

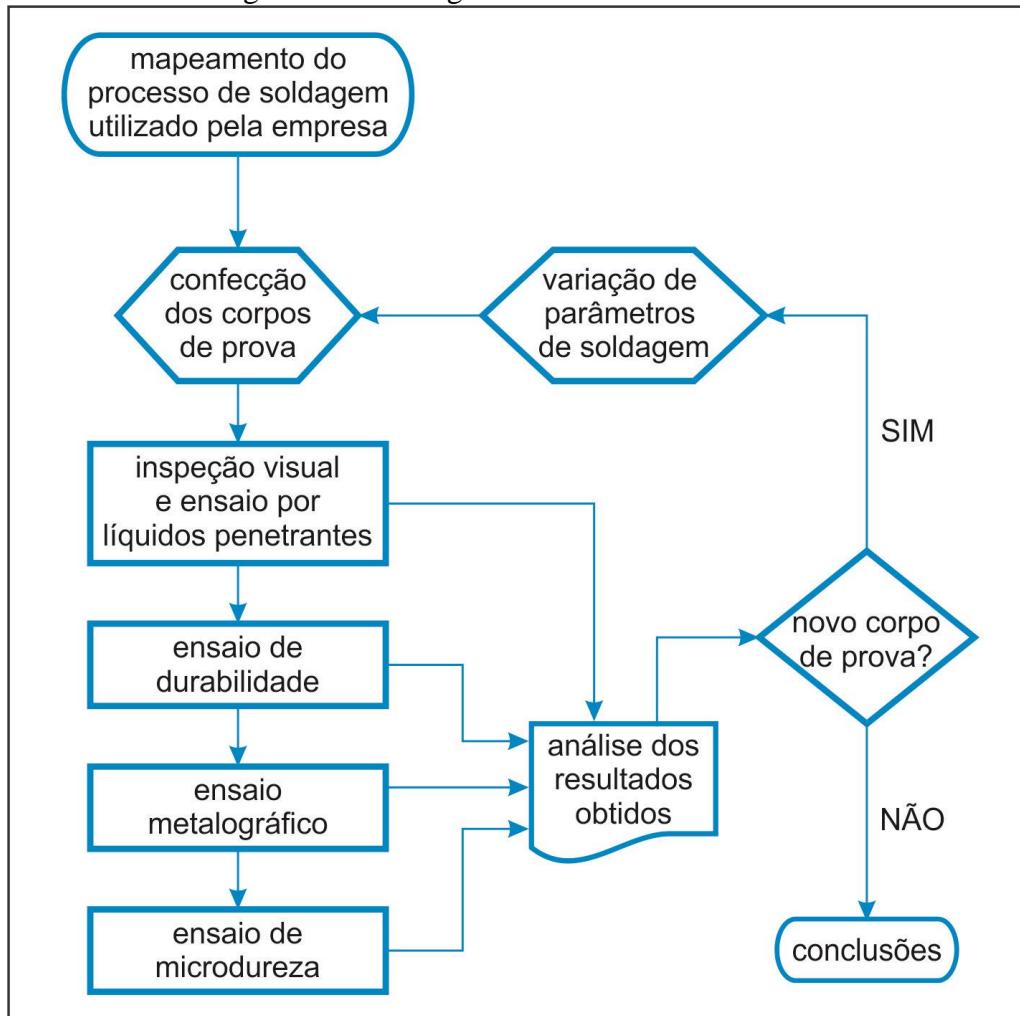
Um grande aumento no tamanho da austenita é observado na região mais próxima da zona fundida. Comportamento este, influenciado pelo tipo de material e energia envolvida na operação. Os níveis de carbono e de elementos de liga, do tamanho final do grão austenítico e a taxa de resfriamento são os fatores determinantes para a estrutura definitiva. Esta área geralmente é a mais crítica, com alto surgimento de trincas.

Nos demais locais desta zona ocorrem alterações que não causam grandes problemas ao material. Evidencia-se nesta o refino de grão, com temperaturas próximas das aplicadas em processos de normalização dos aços (900 a 1200 °C) e algumas transformações da microestrutura pouco perceptíveis (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

3 METODOLOGIA

No presente capítulo serão descritos as metodologias, bem como os materiais e equipamentos utilizados para a confecção dos corpos de prova e posterior análise experimental através de ensaios. A Figura 20 ilustra o fluxograma das tarefas executadas.

Figura 20 – Fluxograma das tarefas executadas



Fonte: o autor (2016).

3.1 MATERIAIS

A poltrona foi constituída basicamente por uma estrutura metálica geral onde foram montados tanto o pé de fixação no assoalho, como também o revestimento de fibra onde há o contato com o passageiro. Ilustrado na Figura 21, o conjunto estrutural foi composto por: perfis da longarina, flâmulas de união do encosto, reforços do encosto e da longarina e tubos de sustentação.

Figura 21 – Conjunto estrutural da poltrona



Fonte: o autor (2016).

Os perfis da longarina foram fabricados em aço HC 380 LA e as flâmulas de união do encosto em aço LNE 38, sendo ambos classificados como ARBL. Os reforços da longarina e do encosto foram fabricados em aço de baixo teor de carbono SAE 1010, enquanto os tubos de sustentação foram confeccionados em aço SAE 1020. As composições químicas e as propriedades mecânicas dos materiais estão informadas na Tabela 2. É importante salientar que as propriedades mecânicas dos aços SAE 1010 e SAE 1020 não são especificados pela norma e seus valores de referência estão conforme documentos internos da Marcopolo S.A..

Tabela 2 – Composição química e propriedades mecânicas dos materiais

| Material | C (%) | Mn (%) | Al (%) | P (%) | S (%) | Si (%) | Ti (%) | Nb e V (%) | Limite de Escoam. | Limite de resistência |
|-----------|--------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|-------------------|-----------------------|
| HC 380 LA | máx 0,10 | máx 1,60 | mín 0,02 | máx 0,03 | máx 0,03 | máx 0,5 | máx 0,02 | Nb máx 0,09 | 380 - 480 MPa | 440 - 560 MPa |
| LNE 38 | máx 0,12 | máx 1,2 | mín 0,02 | máx 0,03 | máx 0,02 | máx 0,35 | máx 0,2 | máx 0,12 | 380 - 530 MPa | 460 - 600 MPa |
| SAE 1010 | 0,08 0,13 | 0,3 0,6 | - | máx 0,03 | máx 0,05 | - | - | - | 180 - 300 MPa | 320 - 370 MPa |
| SAE 1020 | 0,18 0,23 | 0,3 0,6 | - | máx 0,03 | máx 0,05 | - | - | - | 210 - 350 MPa | 380 - 420 MPa |

Fonte: Marcopolo S.A. (2016).

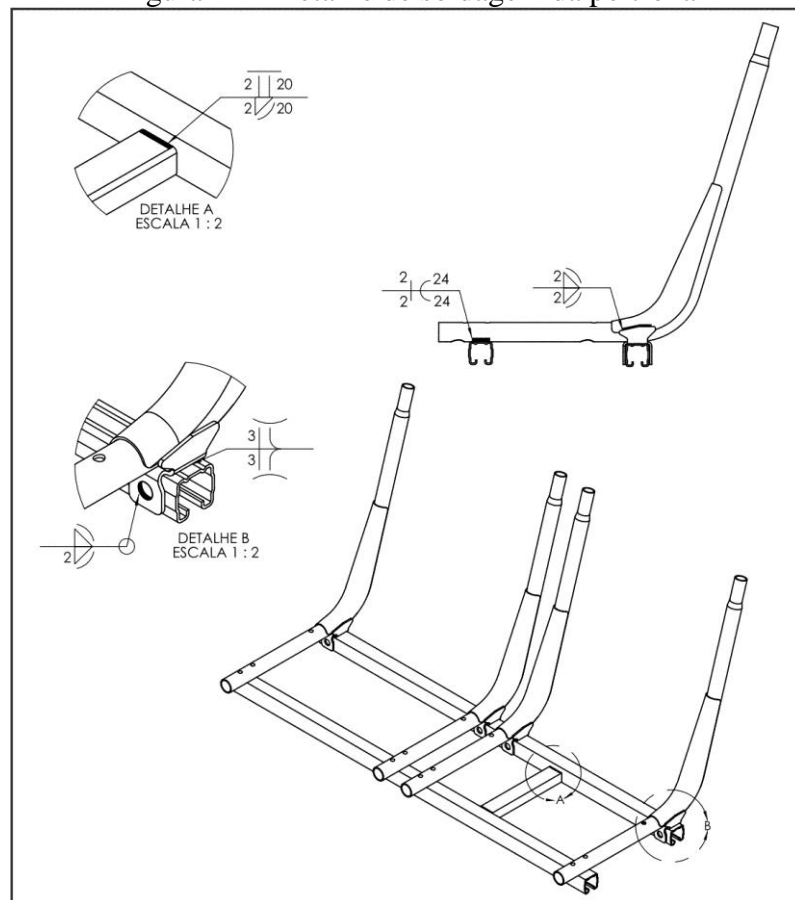
3.2 MAPEAMENTO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

O mapeamento do processo de soldagem visou reproduzir a mesma configuração utilizada pelo setor produtivo da empresa para a soldagem do primeiro corpo de prova. Os parâmetros foram coletados manual e visualmente nas instalações e nos equipamentos do setor de soldagem das poltronas. São eles: especificação do eletrodo, tipo e vazão do gás de proteção, corrente, polaridade e tensão de soldagem.

3.3 CORPOS DE PROVA

Para os corpos de prova foram confeccionados três conjuntos estruturais de poltrona com base no projeto da empresa, com detalhe de soldagem esquematizado na Figura 22.

Figura 22 – Detalhe de soldagem da poltrona



Fonte: o autor (2016).

O Quadro 3 apresenta a especificação do procedimento de soldagem do conjunto estrutural da poltrona.

Quadro 3 – Especificação de soldagem utilizada

| | |
|-------------------------------|------------------------------|
| especificação do eletrodo | AWS A5.18-05 ER70S-6 |
| bitola do eletrodo | 1 mm |
| composição do gás de proteção | 82% Ar + 18% CO ₂ |
| vazão do gás de proteção | 12 – 15 L/min |
| tensão | 19 – 20 V |

Fonte: o autor (2016).

O primeiro conjunto de poltrona foi utilizado como piloto dos testes, de modo a ser verificado nos ensaios, o comportamento da poltrona conforme projeto padrão da empresa. Para a confecção dos demais conjuntos, a corrente de soldagem foi variada. Na Tabela 3 estão informadas as faixas de correntes de soldagem utilizadas no processo de confecção dos corpos de prova.

Tabela 3 – Corrente de soldagem utilizada

| Corpo de prova | Corrente de soldagem |
|----------------|----------------------|
| CP1 | 140 – 160 A |
| CP2 | 100 – 120 A |
| CP3 | 80 – 100 A |

Fonte: o autor (2016).

3.4 INSPEÇÃO VISUAL E ENSAIO POR LÍQUIDOS PENETRANTES

A inspeção visual foi realizada em todos os corpos de prova confeccionados com intuito de identificar descontinuidades e defeitos originados no processo de soldagem. Os critérios de avaliação atenderam a descrição da norma AWS D1.1 (Código de Soldagem Estrutural – Aço). Após, os corpos de prova também foram submetidos ao ensaio por líquidos penetrantes com a finalidade de verificar defeitos superficiais não percebidos pela análise visual. Foram adotados os mesmos critérios avaliativos da inspeção visual.

3.5 ENSAIO DE DURABILIDADE

Os três conjuntos das poltronas foram submetidos ao ensaio de durabilidade, executado no setor da Engenharia Experimental da Marcopolo. O procedimento seguiu documento interno com instruções para a realização.

O dispositivo de ensaio foi formado basicamente por dois atuadores pneumáticos, que simularam os movimentos de partida e parada do ônibus, um contador eletrônico para registro da quantidade de ciclos e dois pesos padrão com massa de 70 ± 1 kg, com formato de “L” simulando uma pessoa sentada sobre a poltrona. Os corpos de prova foram submetidos a movimentos cíclicos a uma frequência de 95 ± 5 ciclos por minuto até que ocorresse a fratura de algum componente.

O conjunto da poltrona foi fixado ao dispositivo, conforme ilustrado na Figura 23, de acordo com o descritivo operacional adotado pela empresa na montagem das mesmas. Os pesos padrão foram fixados de modo que o centro de massa do conjunto poltrona/pesos ficasse centralizado com o eixo de giro do dispositivo, para que esta variável não interferisse nos resultados.

Figura 23 – Dispositivo de ensaio de durabilidade



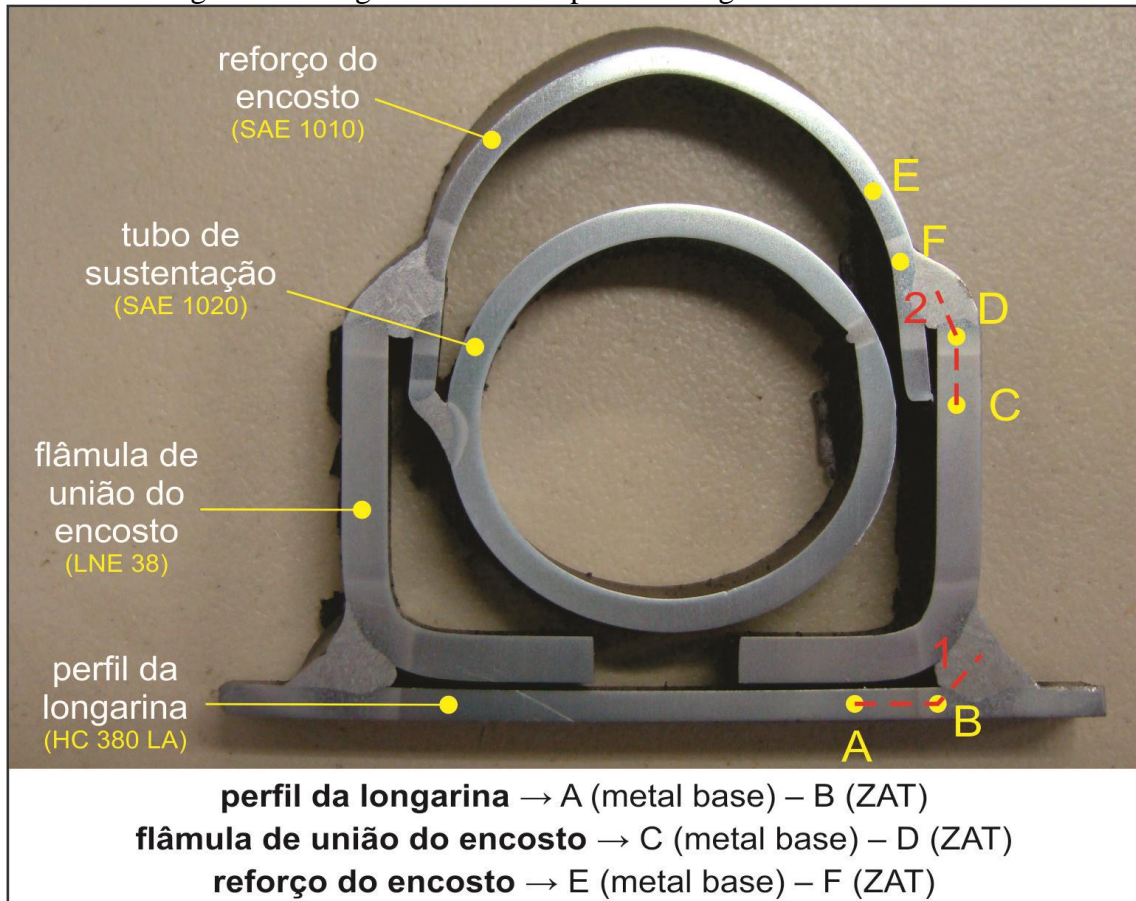
Fonte: o autor (2016).

3.6 ENSAIO METALOGRAFICO

Os ensaios metalográficos foram realizados para análise da microestrutura das juntas soldadas entre o perfil da longarina, flâmula de união e reforço do encosto e tubo de sustentação. A localização da região ensaiada está em destaque no detalhe B da Figura 22 previamente ilustrada. As preparações das amostras metalográficas foram realizadas na seguinte sequência: corte, lixamento, polimento, ataque químico e registro das microestruturas. Todo o procedimento fora realizado nas dependências do Laboratório de Metalografia, localizado no bloco D da Universidade de Caxias do Sul. A Figura 24 esquematiza as regiões que foram analisadas via ensaios metalográficos. É importante

ressaltar que, o tubo de sustentação e o reforço do encosto são unidos por cordões de solda intercalados e não contínuos. Isso explica a inexistência da junta soldada entre ambos componentes no lado esquerdo dos corpos de prova ensaiados.

Figura 24 – Regiões analisadas pela metalografia e microdureza



Fonte: o autor (2016).

3.7 ENSAIO DE MICRODUREZA

O ensaio de microdureza Vickers foi aplicado aos três corpos de prova que passaram pelas análises metalográficas, buscando detectar as transformações metalúrgicas resultantes do processo de soldagem. As medições foram realizadas com a carga de 1kgf, aplicando a carga em dois pontos distintos de cada região de soldagem partindo do metal base, passando pela ZAT e também pelo metal de solda, finalizando a coleta de durezas pontuais. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade de Caxias do Sul. As linhas tracejadas na Figura 24 ilustram as regiões onde os pontos foram coletados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos à partir dos ensaios realizados. Além disso, estão relacionadas as transformações micro e macroestruturais dos materiais envolvidos devido às variações dos parâmetros de soldagem utilizados no processo de confecção dos corpos de provas, correlacionando com a durabilidade do conjunto estrutural da poltrona.

4.1 MAPEAMENTO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

O mapeamento do processo de soldagem resultou nos dados e parâmetros utilizados para a confecção dos corpos de prova conforme descrito na seção 3.3. O procedimento de soldagem foi executado conforme descritivo interno.

4.2 INSPEÇÃO VISUAL E ENSAIO POR LÍQUIDOS PENETRANTES

Com a inspeção visual e o ensaio por líquidos penetrantes, ilustrado na Figura 25, foram evidenciadas algumas descontinuidades do tipo trinca de cratera, porém aceitáveis ao processo, pois não prejudicaram o desempenho do conjunto da poltrona.

Figura 25 – Ensaio por líquidos penetrantes

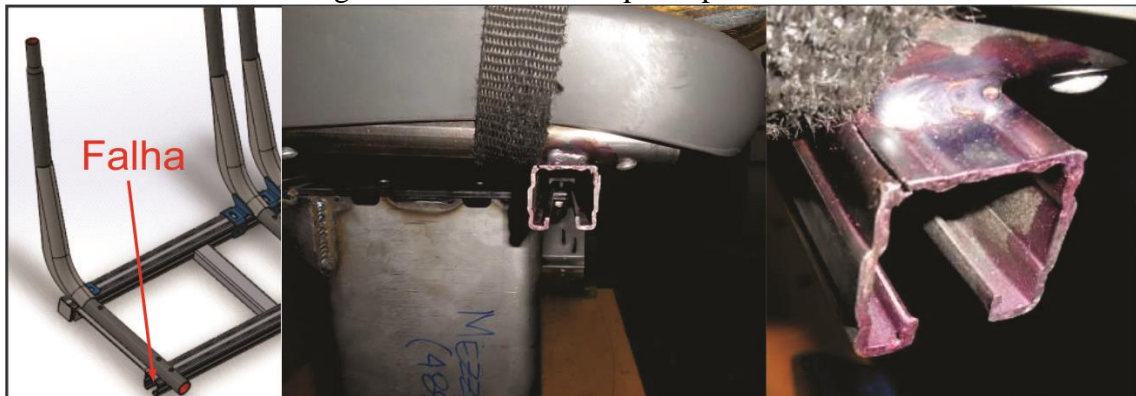


Fonte: o autor (2016).

4.3 ENSAIO DE DURABILIDADE

O corpo de prova CP1 apresentou durabilidade de 593.000 ciclos quando foi identificada a falha no perfil da longarina, identificada por uma trinca próxima a região da junta soldada entre o perfil e a flâmula de união do encosto conforme ilustra a Figura 26. Nesse momento o ensaio foi encerrado.

Figura 26 – Falha do corpo de prova CP1



Fonte: o autor (2016).

Com a análise posterior da trinca com uma lente de aumento de 10X, conforme ilustra a Figura 27, foi identificado que a nucleação da trinca de fadiga ocorreu na zona termicamente afetada do perfil da longarina entre as juntas soldadas que realizaram a união deste com a flâmula de união. Conforme será discutido em seções posteriores, a região em questão possui características microestruturais que evidenciam a fragilidade causada ao material após o processo de soldagem.

Figura 27 – Trinca do corpo de prova CP1



Fonte: o autor (2016).

Os corpos de prova CP2 e CP3 apresentaram falhas de fadiga através do surgimento de trinca no tubo do encosto localizada junto ao furo do parafuso de fixação do casco da poltrona, conforme mostra a Figura 28, não possuindo influências do processo de soldagem. As estruturas suportaram respectivamente, 349.500 e 431.900 ciclos. Tanto a flexão exercida pela carga aplicada no encosto, como também o furo para a fixação, um concentrador de tensões, foram determinantes para a falha.

Figura 28 – Trincas dos corpos de prova CP2 e CP3



Fonte: o autor (2016).

4.4 ENSAIO METALOGRÁFICO

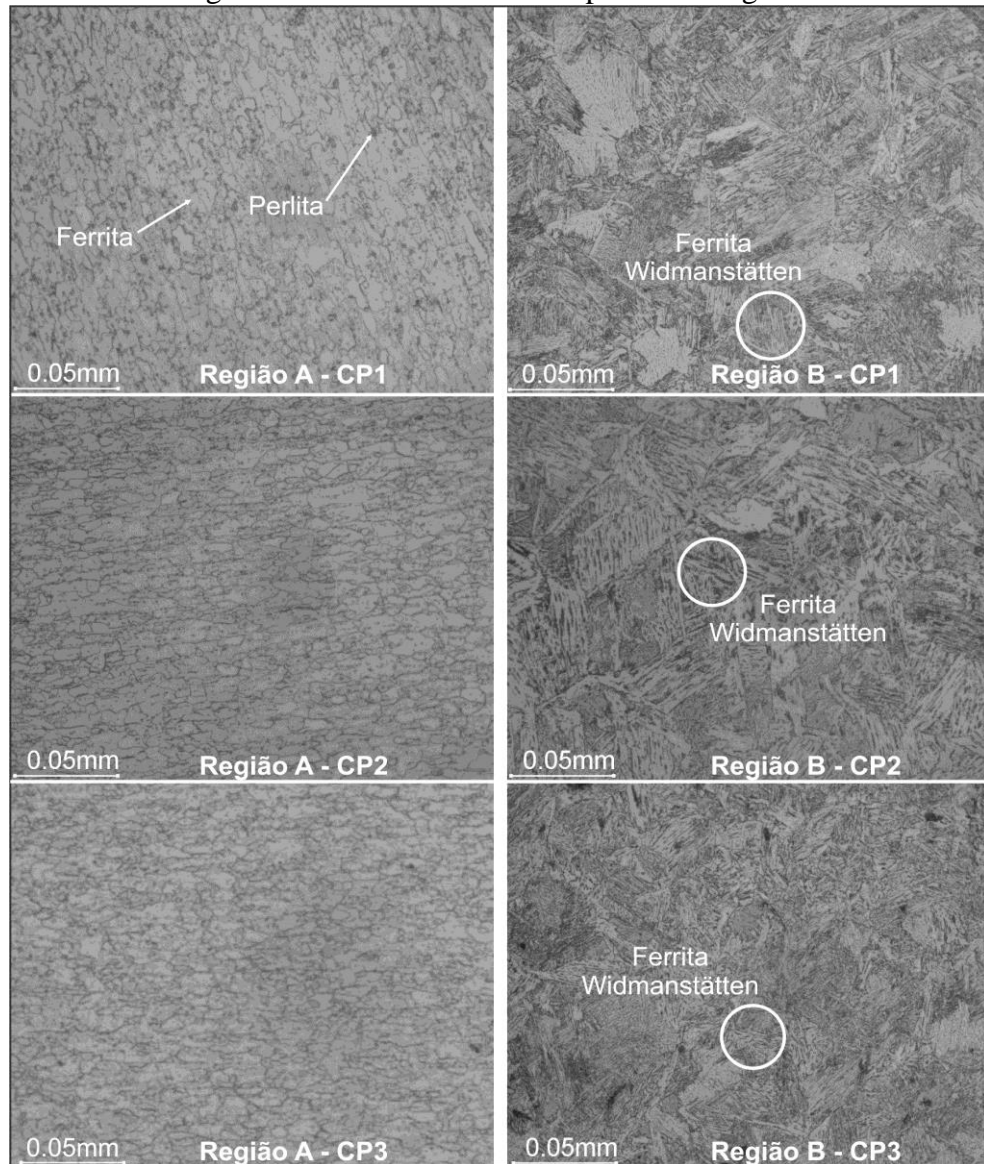
Com a metalografia foi possível realizar o estudo das microestruturas dos materiais, relacionando as fases presentes com as propriedades mecânicas. A Figura 29 apresenta às microestruturas encontradas no perfil da longarina (HC 380 LA) com ampliação de 500X.

O metal base do perfil da longarina (Região A) apresentou microestrutura com predominância de grãos deformados de ferrita (regiões claras), com presença de perlita (regiões escuras) nos contornos de grão, característica comum em aços ARBL. Já nas ZTAs do perfil da longarina (Região B) observou-se também estrutura de caráter ferrítico, porém com aumento na quantidade de grãos de perlita no material. Também foi identificada a presença de ferrita *Widmanstätten*, que tende a fragilizar a estrutura devido à forma paralela em que as placas dessa estrutura crescem.

A principal característica influenciada pela variação da corrente de soldagem dos corpos de prova é a variação do tamanho de grão identificada através da análise com aumento de 100X, conforme mostra a Figura 30. Com a redução da corrente de soldagem e, consequentemente, com o aumento da velocidade de resfriamento, o resultado é a geração de

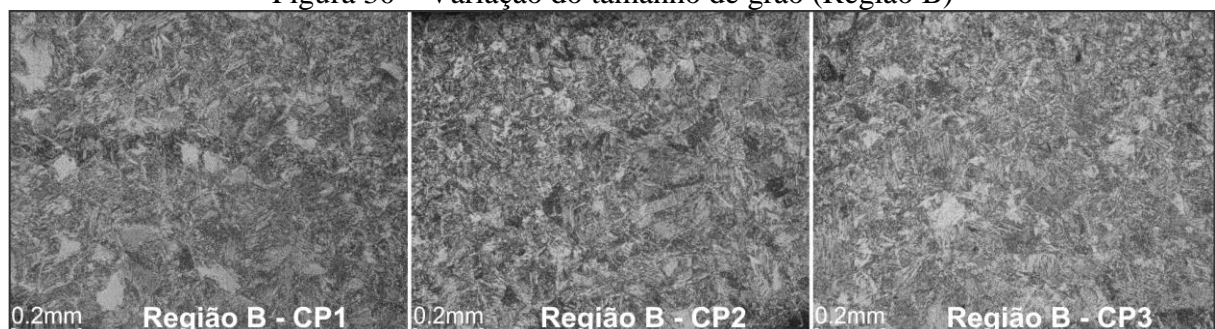
uma estrutura mais fina e, portanto, menor fragilidade se tratando de um aço com baixo teor de carbono, dificultando a formação de martensita.

Figura 29 – Microestruturas do perfil da longarina



Fonte: o autor (2016).

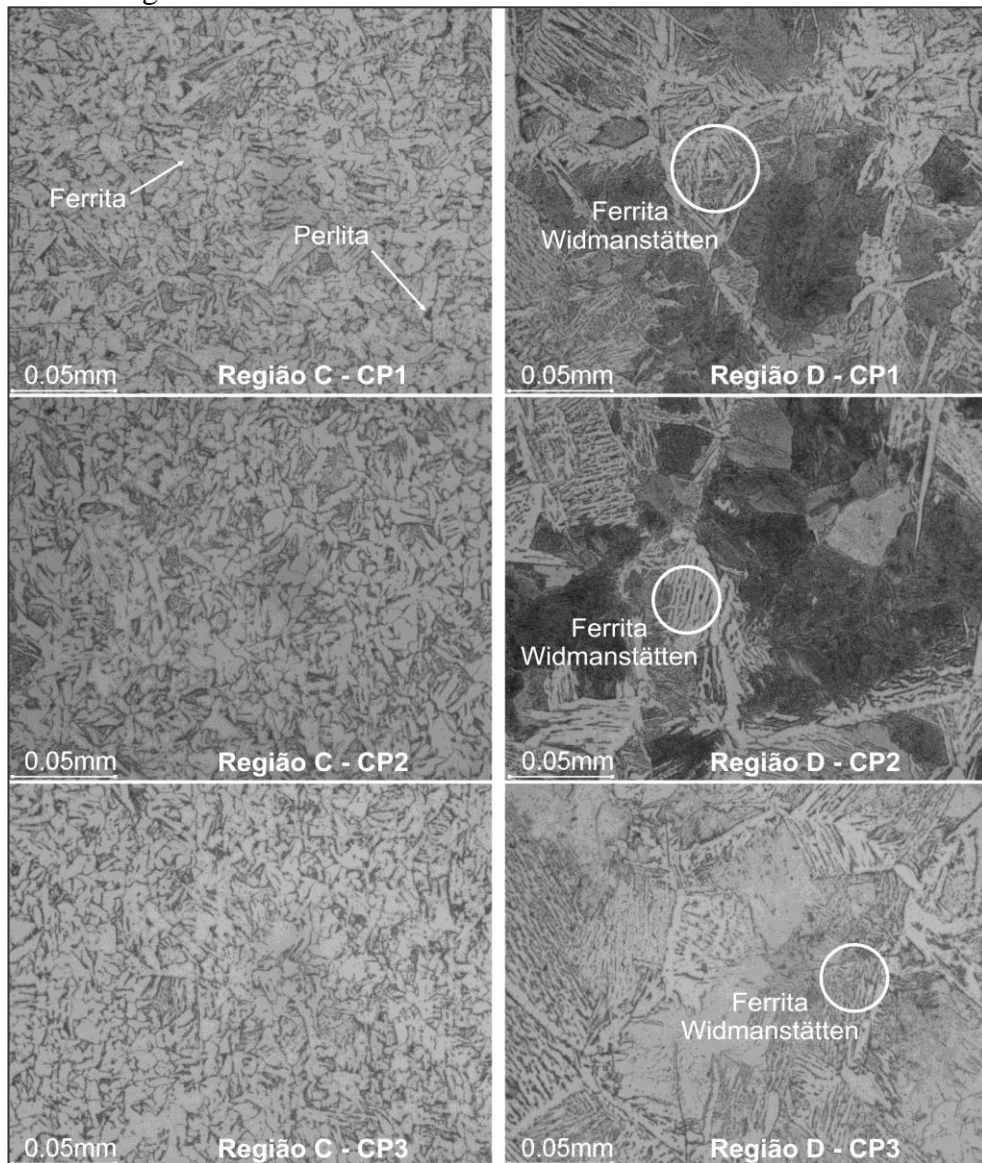
Figura 30 – Variação do tamanho de grão (Região B)



Fonte: o autor (2016).

A Figura 31 exibe as microestruturas da flâmula de união do encosto (LNE 38) com ampliação de 500X. Assim como o outo, o metal base deste aço microligado de baixo carbono (Região C) apresentou microestrutura com predominância ferrítica (regiões claras), porém com os grãos mais homogêneos e definidos, resultado do tratamento térmico que o material recebe para normalização. A perlita (regiões escuras) nos contornos de grãos foi identificada em maior quantidade e tamanho que o material anterior.

Figura 31 – Microestruturas da flâmula de união do encosto

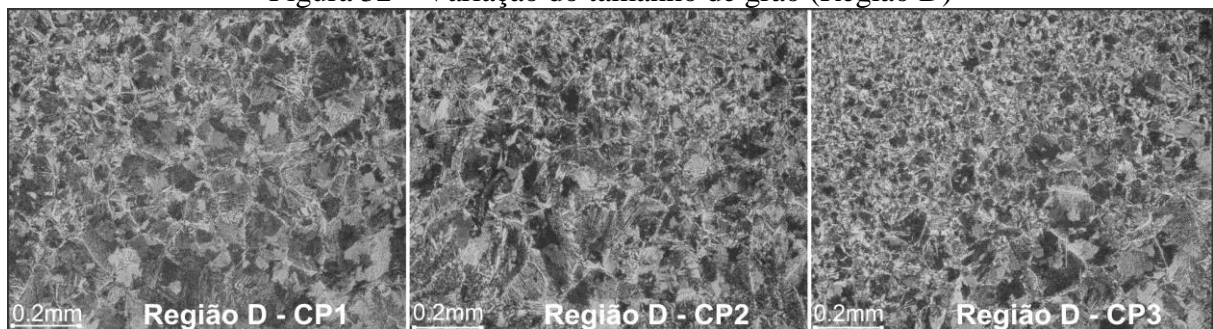


Fonte: o autor (2016).

As ZTAs (Região D), ilustrada também na Figura 31 apresentaram grãos mais grosseiros em relação ao material anterior. Foi identificada grande incidência de agregados de ferrita-carbonetos. A ferrita *Widmanstätten* também foi identificada nos contornos de grãos.

A Figura 32 exibe a variação do tamanho de grão a partir da ampliação de 100X. Fica evidenciada a diminuição do tamanho de grão nos corpos de prova soldados com menor corrente. A analogia realizada no caso anterior também pode ser aplicada a este, onde a redução da energia de soldagem contribuiu para a geração de um grão mais refinado.

Figura 32 – Variação do tamanho de grão (Região D)



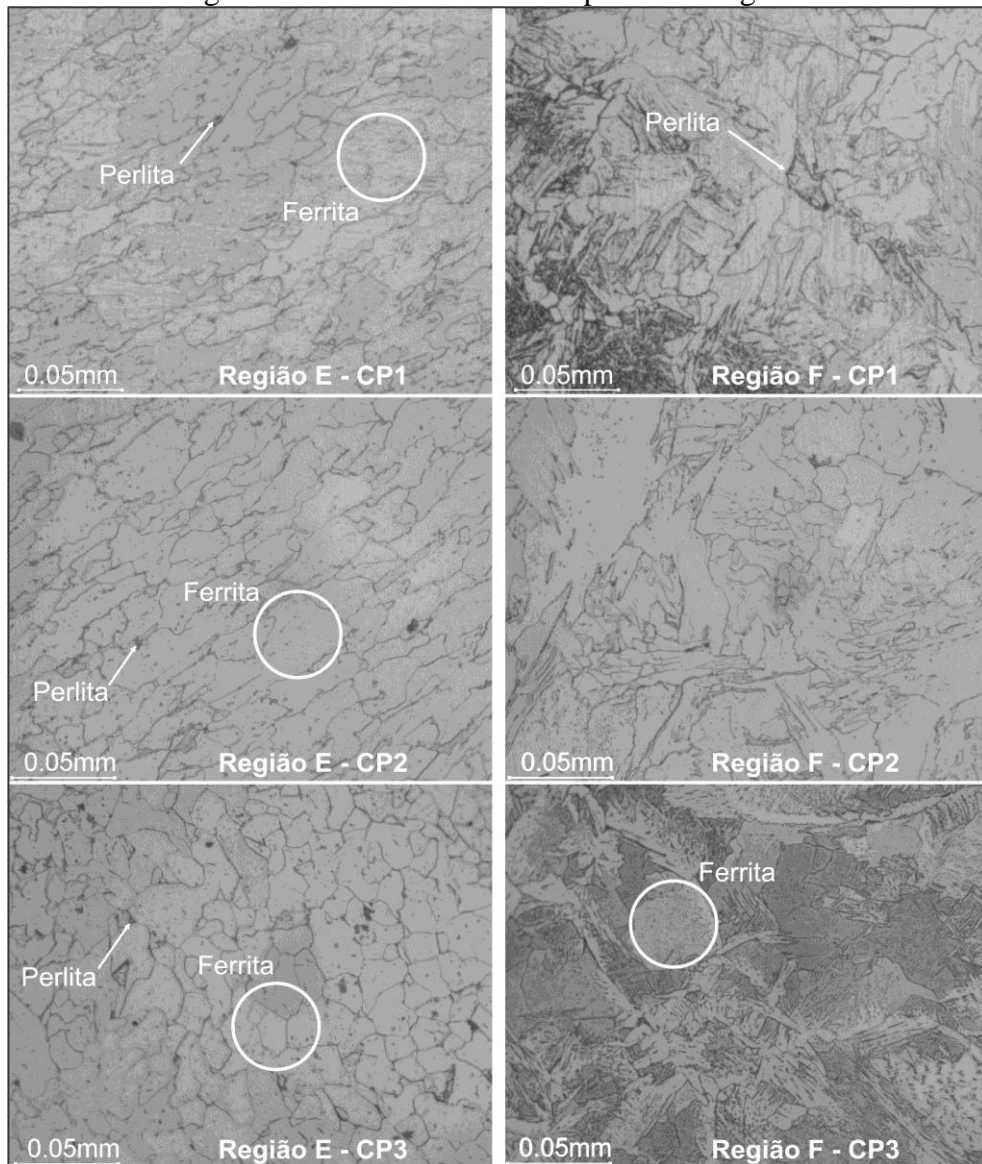
Fonte: o autor (2016).

Na Figura 33 foram apresentadas as micrografias resultantes da análise do reforço do encosto (SAE 1010) com o aumento de 500X. A microestrutura do metal base (Região E) predominantemente ferrítica com pequenas quantidades de perlita fina nos contornos de grãos comprova teoricamente o previsto para o aço de baixo teor de carbono. Tanto as fases presentes, como os tamanhos dos grãos observados, sendo maiores em comparação aos materiais anteriormente analisados, indicam condições favoráveis à ductilidade.

Nas ZTAs foi evidenciado o aumento dos grãos de ferrita próximas à região do metal de solda e também a presença de perlita nos contornos de grão. Além disso, percebeu-se uma região termicamente afetada de menor proporção e de limites menos definidos em relação aos aços ARBL, conforme ilustra a Figura 34.

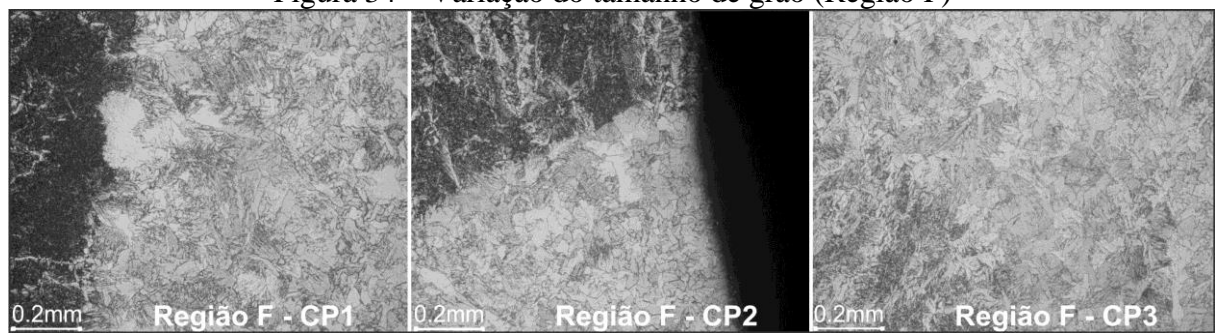
Para os três materiais, as composições com baixas concentrações de carbono destes contribuem para a boa soldabilidade dos mesmos, dificultando o surgimento da martensita em grandes quantidades, o que fragilizaria ainda mais a estrutura.

Figura 33 – Microestruturas do perfil da longarina



Fonte: o autor (2016).

Figura 34 – Variação do tamanho de grão (Região F)



Fonte: o autor (2016).

4.5 ENSAIO DE MICRODUREZA

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos através do ensaio de microdureza Vickers (HV1), aplicados às juntas do foco do estudo com a carga de 1kgf. Nas medições das ZTAs, identificadas pelos pontos B, E e F, foi identificado não só o aumento esperado da dureza em relação ao metal base, assim como o comportamento desta em virtude da variação das características microestruturais oriundas da diminuição das correntes de soldagem aplicadas. Fica comprovado o aumento da dureza do material em microestruturas de grãos mais refinados.

O aço SAE 1010 é de fato mais dúctil e de menor dureza que os materiais microligados, que conforme já falado, possuem propriedades mecânicas favorecidas pelo refino de grão.

Tabela 4 – Microdurezas obtidas

| Componente | Região | CP1 | CP2 | CP3 |
|---|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| perfil da longarina (HC 380 LA) | Ponto A (metal base) | 173 – 179 | 162 – 177 | 171 – 175 |
| | Ponto B (ZTA) | 191 – 202 | 200 – 202 | 205 – 208 |
| – | Metal de solda (AB) | 229 – 230 | 207 – 209 | 220 – 224 |
| flâmula de união do encosto (LNE 38) | Ponto C (metal base) | 153 – 155 | 150 – 153 | 148 – 155 |
| | Ponto D (ZTA) | 173 – 175 | 175 – 183 | 200 – 201 |
| – | Metal de solda (CD) | 203 – 206 | 204 – 207 | 218 – 225 |
| reforço do encosto (SAE 1010) | Ponto E (metal base) | 128 – 134 | 128 – 132 | 132 – 138 |
| | Ponto F (ZTA) | 145 – 149 | 150 – 155 | 166 – 172 |

Fonte: o autor (2016).

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos através das análises realizadas, pode-se concluir que:

- a utilização de parâmetros de soldagem corretos é importante para não prejudicar as propriedades mecânicas dos componentes do conjunto;
- mesmo com a variação da corrente de soldagem, a trinca de cratera foi evidenciada em todos os corpos de prova;
- apesar da pequena quantidade de corpos de prova (um para cada parâmetro de soldagem), os ensaios de durabilidade evidenciam a fragilidade do perfil analisado ao ser soldado a maior corrente, em virtude da falha ocorrida no corpo de prova CP1;
- a variação da corrente de soldagem afeta diretamente a microestrutura do material, alterando o tamanho de grão das ZTAs;
- a microestrutura e a dureza, principalmente obtida nas ZTAs do perfis, oferecem indícios do aumento da durabilidade do conjunto com a redução da corrente de soldagem;
- a redução do tamanho de grão influencia diretamente no aumento da dureza dos materiais da estrutura.
- os parâmetros de soldagem utilizados na confecção do corpo de prova CP3 são os recomendados para utilização neste conjunto, apresentando as melhores condições microestruturais e de microdureza para redução da precocidade da falha da estrutura.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos e conhecimentos adquiridos com o estudo realizado, sugere-se o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- aumentar a quantidade de corpos de prova para cada variação da corrente de soldagem proposta;
- direcionar a falha para região de influência da junta soldada reforçando o local de fixação do parafuso, evitando as fraturas ocorridas nos corpos de prova CP2 e CP3
- analisar o comportamento das juntas soldadas isoladamente da estrutura geral do conjunto de poltronas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS. [201-] Disponível em: <<http://www.ntu.org.br/novo/AreasInternas.aspx?idArea=7>>. 201-. Acesso em 20 de março de 2016.
- AUGUSTO FILHO, Alberto. **Controle dimensional e visual de soldagem**. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, [19--].
- BRANCO, Carlos Moura; FERNANDES, António Augusto; CASTRO, Paulo M. S. Tavares de. **Fadiga de estruturas soldadas**. 2. ed. Portugal: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- BUDYNAS, Richard Gordon; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. ampl. e rev. São Paulo: ABM, 2005.
- COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Blucher, 2008.
- ESAB, 2005. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev1_ApostilaSoldagemMIGMAG_nova.pdf>. Acesso em 08 de Maio de 2016.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- GUIMARAES, Gabriel Corrêa; SILVA, Ramsés Ferreira da; SILVA, Luiz Carlos da. Soldabilidade de aços resistentes à abrasão da classe de 450 HB de dureza. **Soldagem e Inspeção**, v.16, n.4, p. 360-368, dez. 2011.
- MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: Ed. do Autor, 1996.
- MARCOPOLO S.A. **Setor comercial: documentos internos**, 2016.
- MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005.
- MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.
- NATAL, Yelson Duboc. **Análise da soldabilidade de aços de alta resistência baixa liga**. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, [19--].

NIEBLES, Enrique E; UNFRIED, Jimmy; TORRES, Jaime E. Metodologias para el estudio de soldabilidad en uniones soldadas. **Información tecnológica**, v.25, n.1, p. 03-14, 2014.

ROMERO NIETO, Sandra Patricia; FLÓREZ, Jhon Jairo Olaya. Influencia de la transferencia en la resistencia y dureza de las uniones soldadas obtenidas por el proceso de soldadura GMAW. **Revista de Ingeniería**, n.37, p. 38-45, dez. 2012.

NORTON, Robert Lawrence. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 3. ed., rev. São Paulo: Blucher, 2010.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição química dos aços**. São Paulo: E. Blücher, 1989.

TATAGIBA, Luiz Claudio Soares; GONÇALVES, Renata Barbosa; PARANHOS, Ronaldo. Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG/MAG. **Soldagem e Inspeção**, v.17, n.3, p. 218-228, set. 2012.

VAN VLACK, Lawrence Hall. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2003.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: E. Blücher, 1992.