

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

FELIPE MERCÊS BIGLIA

**ANÁLISE DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO DE SOLDAGEM
DE CALDEIRAS A VAPOR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2016

FELIPE MERCÊS BIGLIA

**ANÁLISE DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO DE SOLDAGEM
DE CALDEIRAS A VAPOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Mecânica, da Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Msc. Henrique Ajuz Holzmann

Coorientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Amaro de Faria Júnior

GUARAPUAVA

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Guarapuava

Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de Engenharia Mecânica
Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO DE SOLDAGEM DE CALDEIRAS A VAPOR

por

FELIPE MERCÊS BIGLIA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 22 de junho de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Msc. Henrique Ajuz Holzmann
Prof. Orientador

Dr.^a Carla Dantas da Silva
Membro Titular

Esp. João Sérgio Hul
Membro titular

Dr.^a Raquel da Cunha Ribeiro da Silva
Coordenadora do curso de Engenharia Mecânica

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho aos meus pais,
Francisco Elias Biglia e Rosana Aparecida
Rabelo Biglia.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo fim de mais essa etapa.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela oportunidade.

Ao meu orientador, Henrique Ajuz Holzmann, pelo empenho, incentivo, paciência e amizade, que tornaram possível à elaboração deste trabalho.

Ao meu coorientador, Antônio Carlos Amaro de Faria Júnior, pelo apoio.

Ao Técnico de Laboratório/Mecânica, Lucas Franco Wrege, pelo apoio.

Aos professores João Sérgio Hul e Carla Dantas da Silva, pelas sugestões e correções.

Aos meus amigos.

O meu muito obrigado.

Lembre-se que todas as grandes realizações nascem de um sonho e para torná-lo realidade é necessário muito trabalho, é necessário enfrentar as adversidades do dia a dia, lutar e caminhar com fé, sem se desesperar e deixar de sonhar. Siga em frente sempre.
(SILVA, Marcelo Ferreira, 2011, Apucarana, Paraná)

RESUMO

BIGLIA, Felipe Mercês. Análise do cordão de solda no processo de soldagem de caldeiras a vapor. 2016. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2016.

O uso de vapor no setor industrial é indispensável para o funcionamento dos mais diversos tipos de equipamentos, a produção de tal vapor se dá corriqueiramente através de máquinas denominadas caldeiras a vapor. Sua fabricação envolve etapas que devem ser precisas, dentre as quais uma das mais importante é a união, que se faz por meio de processos de soldagem, necessitando de ensaios para que sejam averiguadas suas propriedades e constatado o quão apta a caldeira se encontra para executar suas funções. Desta forma determinar as características físicas e químicas do cordão de solda é de extrema importância a fim de se assegurar a qualidade do conjunto. Este trabalho representa o estudo relacionado a tal determinação, tendo como objeto de estudo o cordão de solda de caldeiras flamotubulares, a serem verificados através de ensaios mecânicos destrutivos e não destrutivos.

Palavras-chave: Vapor. Caldeiras. Soldagem. Ensaios. Flamotubulares.

ABSTRACT

BIGLIA, Felipe Mercês. **Analysis of weld bead in welding process on steam boiler**. 2016. 55 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Mecânica - Federal Technology University - Paraná. Guarapuava, 2016.

The use of steam in the industrial sector is indispensable for the operation of various types of equipment, the production of steam as routinely occurs through steam boilers machines. Its manufacture involves steps that must be precise, among which one of the most important is the union, which is done by means of welding processes, requiring tests to be investigated their properties and observed how capable the boiler is to run its functions. Thus determine the physical and chemical characteristics of the weld bead is of extreme importance in order to ensure the quality of the set. This work is the study related to such determination, with the object of study the weld bead of firetube boilers, to be verified by destructive and non-destructive mechanical testing.

Keywords: Steam. Boilers. Welding. Essay. Firetube.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Campos adotados para cada categoria de caldeira	16
Figura 2 - Funcionamento, caldeira flamotubular	17
Figura 3 - Funcionamento, caldeira aquatubular	18
Figura 4 - Calandragem de uma chapa	20
Figura 5 - Tipos de processos de soldagem	21
Figura 6 - Processos de Soldagem	22
Figura 7 - Representação do arco elétrico	23
Figura 8 - Soldagem MIG/MAG	23
Figura 9 - Perfil geométrico de um cordão de solda	24
Figura 10 - Representação da ZTA	25
Figura 11 - Escalas comparativas entre os valores de vários métodos de durezas ..	26
Figura 12 - Sequência do ensaio com líquidos penetrantes	29
Figura 13 - Resultados de ensaios por líquidos penetrantes de juntas soldadas	30
Figura 14 - (a) chanfro feito nas chapas, (b) características do chanfro	31
Figura 15 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, exemplificação do ensaio de dureza	33
Figura 16 - Amostra do cordão de solda após embutimento	34
Figura 17 - Politriz Lixadeira Metalográfica	34
Figura 18 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, após a soldagem	36
Figura 19 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, após a aplicação do revelador	38
Figura 20 - Metal base, nas ampliações de (a) 5x, (b) 20x, (c) 100x	41
Figura 21 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, na ampliação de 5x	42
Figura 22 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, na ampliação de 20x	42
Figura 23 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, na ampliação de 100x	43
Figura 24 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, linha de soldagem na ampliação de 5x	43
Figura 25 - Tipos de ensaios de dureza	53
Figura 26 - Diagrama de Fases Fe-C	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Perfil de dureza da amostra 1.....	39
Gráfico 2 - Perfil de dureza da amostra 2.....	39
Gráfico 3 - Perfil de dureza da amostra 3.....	39
Gráfico 4 - Perfil da dureza média das amostras 1, 2 e 3	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de aplicações de caldeiras	19
Tabela 2 - Etapas para fabricação de caldeiras	20
Tabela 3 - Escalas de Dureza Rockwell	27
Tabela 4 - Parâmetros utilizados em cada amostra	32
Tabela 5 - Intervalo de valores utilizados nos parâmetros de soldagem	36
Tabela 6 - Morfologia dos cordões de solda	37

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

A	Ampere
°C	Graus Celsius
C	Carbono
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CO ₂	Dióxido de carbono
Fe	Ferro
He	Hélio
NBR-12177	Norma 12177 da Associação Brasileira de Normas Técnicas
NR-13	Norma Regulamentadora 13
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
Mn	Manganês
P	Fósforo
pol.	Polegada
S	Enxofre
Si	Silício
TIG	Tungsten Inert Gas
V	Voltes
ZTA	Zona termicamente afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.3 JUSTIFICATIVA.....	15
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO	16
2.1 CALDEIRAS.....	16
2.1.1 Classificação.....	16
2.1.2 Tipos	17
2.1.3 Aplicações	18
2.1.4 Fabricação	19
2.1.5 Materiais Utilizados.....	21
2.2 SOLDAGEM DE CALDEIRAS	21
2.3 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO	22
2.3.1 Soldagem MIG/MAG.....	23
2.4 O CORDÃO DE SOLDA	24
2.5 AVALIAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA.....	25
2.5.1 Ensaios de Dureza.....	26
2.5.2 Ensaio Metalográfico	28
2.5.3 Ensaios por Líquidos Penetrantes	29
3 METODOLOGIA.....	31
3.1 DELIMITAÇÃO E OBTENÇÃO DOS MATERIAIS A SEREM UTILIZADOS	31
3.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM	31
3.3 PROCESSOS DE INSPEÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA.....	32
3.3.1 Ensaio por Líquidos Penetrantes	32
3.3.2 Ensaio de Dureza	33
3.3.3 Ensaio Metalográfico	33
3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1 ENSAIOS MECÂNICOS	37
4.1.1 Ensaio por Líquidos Penetrantes	37
4.1.2 Ensaio de Dureza	38
4.1.3 Ensaio Metalográfico	40
5 CONCLUSÕES	45
6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS.....	47
ANEXO A - Tipos de ensaios de dureza.....	52
ANEXO B - Diagrama de Fases Fe-C.....	54

1 INTRODUÇÃO

No setor industrial o uso de vapor é indispensável para o funcionamento dos mais diversos tipos de equipamentos. Dentre os segmentos que utilizam desta forma de energia, podemos citar: alimentício, têxtil, químico e petrolífero. A produção de vapor se dá corriqueiramente através de máquinas denominadas caldeiras a vapor.

As caldeiras são definidas de acordo com normas específicas, tal qual a NR-13 (Norma Brasileira – NR 13, do Ministério do Trabalho e Emprego), que define caldeiras como “equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refervedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo”.

Devido à complexidade do sistema, sua fabricação deve ser precisa, sendo as etapas de fabricação de uma caldeira: seleção do material a ser utilizado (geralmente aço ou ligas de aço), corte da chapa, calandragem, união através de solda, ensaios não destrutivos, pintura e expedição.

Dentre as etapas citadas uma das mais importante é a união, que se faz por meio de processos de soldagem. O processo de soldagem mais empregado na etapa de união é a soldagem MIG/MAG. A etapa de união necessita de ensaios para que sejam averiguadas suas propriedades e constatado o quão apta a caldeira se encontra para executar suas funções.

Desta forma determinar as características físicas e químicas do cordão de solda é de extrema importância a fim de se assegurar a qualidade do conjunto.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as características do cordão de solda gerado pelo processo de soldagem MAG na união de chapas para fabricação de caldeira flamotubular.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensaios de soldagem MAG, em corpos de prova, com parâmetros semelhantes aos utilizados na fabricação de caldeiras flamotubulares.

- Realizar ensaios não destrutivos (inspeção visual e líquidos penetrantes) e ensaios destrutivos (macro dureza e metalografia) nas amostras soldadas.
- Medir as dimensões e a diluição do cordão de solda nas amostras.

1.3 JUSTIFICATIVA

Atualmente, existe uma busca incessante pela redução de custos nos mais diversos processos produtivos, contudo, essa busca não deve abrir mão da segurança e da qualidade.

Em relação a caldeiras, notícias relacionadas a explosões não são algo atípico no cenário nacional, como ocorrido em doze de setembro de 2012, na cidade de Urussanga, localizado no Sul catarinense, que deixou quatro funcionários que estavam no local, feridos (G1 - O portal de notícias da Globo, 2012).

Um dos casos mais recentes de explosões envolvendo caldeiras ocorreu na cidade de Concórdia, localizada no oeste catarinense, na data de vinte e sete de julho de 2015, que por sua vez, deixou três funcionários gravemente feridos (G1 - O portal de notícias da Globo, 2015).

Acidentes como os citados anteriormente, ocorrem devido à falta de investimentos e imprudências relacionados a execução de ensaios destrutivos, não destrutivos e manutenção dos sistemas de caldeiras.

Portanto, é de suma importância conhecer as características existentes nos processos de fabricação e manutenção de caldeiras, através de ensaios mecânicos ou do cumprimento de normas como NR-13 ou NBR-12177, que visam constatar a segurança e a viabilidade na operação de caldeiras.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 CALDEIRAS

Segundo a norma NR-13 (2006), caldeiras são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia. São aparelhos térmicos que geram vapor a partir do aquecimento de um fluido.

2.1.1 Classificação

Segundo Kumar (2013), a classificação das caldeiras se dá, em geral, de acordo com a pressão, fonte de energia e a circulação de água no sistema.

De acordo a norma NR-13 (2006), em relação a pressão, elas são classificadas em três categorias: A, B e C. Na categoria A, a pressão de operação é superior a 1960 kPa, na C ela é igual ou inferior a 588 kPa com volume interno igual ou inferior a 100 litros. A categoria B abrange as caldeiras que não se enquadram nas categorias A e C. Esta relação pode ser vista na Figura 1.

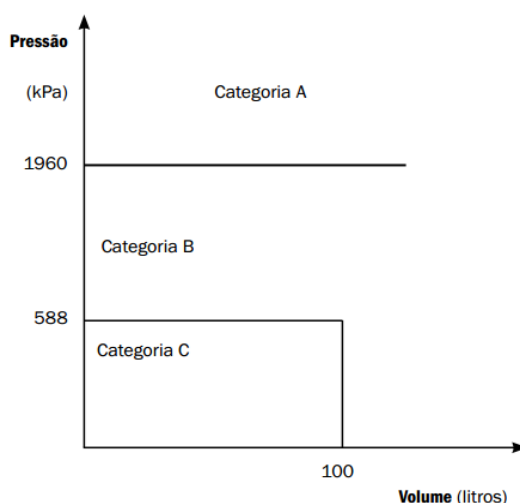


Figura 1 - Campos adotados para cada categoria de caldeira
Fonte: NR-13: Manual Técnico de Caldeiras e Vasos de Pressão (2006).

Quanto a fonte de energia, a norma NR-13 (2006) informa que elas podem ser a base de combustível sólido (carvão, turfa e lenha), a base de combustível

líquido (óleo diesel, querosene e gasolina), a base de combustível gasoso (gases liquefeitos de petróleo - GLP) ou a base de eletricidade.

2.1.2 Tipos

Segundo Martinelli (1990), conforme o tipo, as caldeiras podem ser classificadas como:

- Flamotubulares
- Aquatubulares

Em uma caldeira flamotubular, os gases quentes de combustão fluem por dentro de tubos, os tubos aquecem a água, formando vapor, como mostrado na Figura 2.

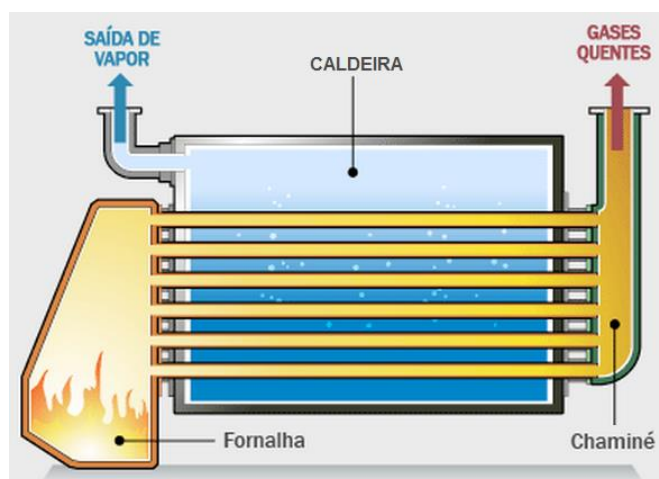


Figura 2 - Funcionamento, caldeira flamotubular
Fonte: How stuff Works - Science.

Este tipo de caldeira ocupa pouco espaço físico e costuma ser utilizada onde a pressão, temperatura e a necessidade de produção de vapor são baixas, isto é, com pressão de até 12 bar, na temperatura de vapor saturado e produção de até 10.000 kg de vapor por hora (NR-13, 2006).

Já nas caldeiras aquatubulares, a água flui no interior dos tubos e os gases quentes de combustão em torno do exterior dos tubos, a vaporização da água se dá dentro dos tubos. Tal arranjo é mostrado na Figura 3.

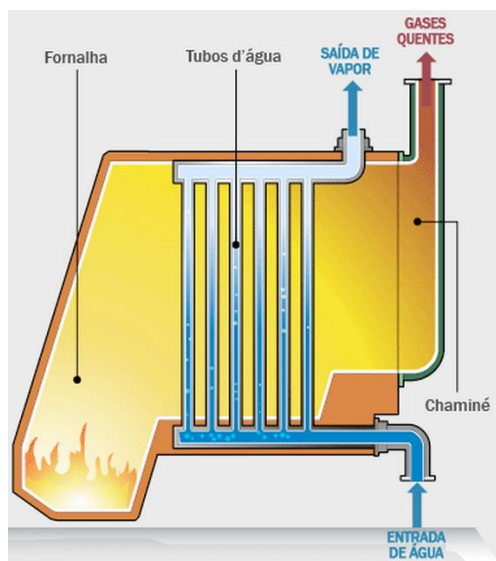


Figura 3 - Funcionamento, caldeira aquatubular
Fonte: How stuff Works - Science.

Esta configuração de caldeiras a vapor possui maior produção de vapor e pressão de trabalho, resultando em maior rendimento na geração de energia (NR-13, 2006).

Além dos dois tipos citados anteriormente, deve-se destacar a existência de caldeiras que apresentam em sua estrutura, partes referentes as caldeiras flamatubulares e as aquatubulares, sendo definidas como caldeiras mistas.

Em síntese elas são caldeiras flamatubulares, tendo com fonte de energia, geralmente, combustível sólido possuindo uma antecâmara de combustão com paredes revestidas de tubos de água, assim como nas caldeiras aquatubulares.

2.1.3 Aplicações

As caldeiras são empregadas nos mais diversos setores industriais, sempre que se tem a necessidade de vapor, são inumeráveis os exemplos de sua aplicabilidade, os quais podem ser vistos na Tabela 1 (NR-13, 2006; Babcock Wanson 2015).

Tabela 1 - Exemplos de aplicações de caldeiras

Setor	Aplicações
Farmacêutico	Fabricação de medicamentos, vacinas, vapor estéril
Frigoríficos	Nas estufas para cozimento, nos digestores, nas prensas para extração de óleo
Hospitalar	Lavanderias e cozinhas
Indústria alimentar	Padarias industriais, matadouros, processos de desmanche
Indústria automotiva	Acabamentos metálicos e eletrodeposição
Indústria da madeira	Processos de contraplacado e melanina
Indústria de papel e celulose	Rolos de secagem, secagem de impressão
Indústria do petróleo	Nos revedores, nos trocadores de calor, nos fornos, nos vasos de pressão, nos reatores e turbinas
Indústria metalúrgica	Nos banhos químicos, na secagem e pintura
Indústria química	Nas autoclaves, nos tanques de armazenamento, nos reatores, nos vasos de pressão
Indústria têxtil	No aquecimento de água, secagem em estufas
Indústrias de laticínios	Na pasteurização, na esterilização de recipientes, na fabricação de queijo

Fonte: NR-13 (2006) e Babcock Wanson (2015), adaptado.

2.1.4 Fabricação

O processo de fabricação de caldeiras flamotubulares, segundo Telles (1996), consiste em cinco etapas.

- Na primeira etapa, realiza-se a escolha do material, nela ocorre o levantamento das matérias primas necessárias para a fabricação da caldeira, levando em conta o custo e as propriedades mecânicas requeridas.

- Em seguida, vem a etapa de corte, onde, ocorre o corte das chapas com o objetivo de dimensioná-las no tamanho final.

- Após o corte, é feita a calandragem, esta etapa tem como meta calandrar as chapas já dimensionadas, dando a elas o formato cilíndrico, como mostrado na Figura 4.

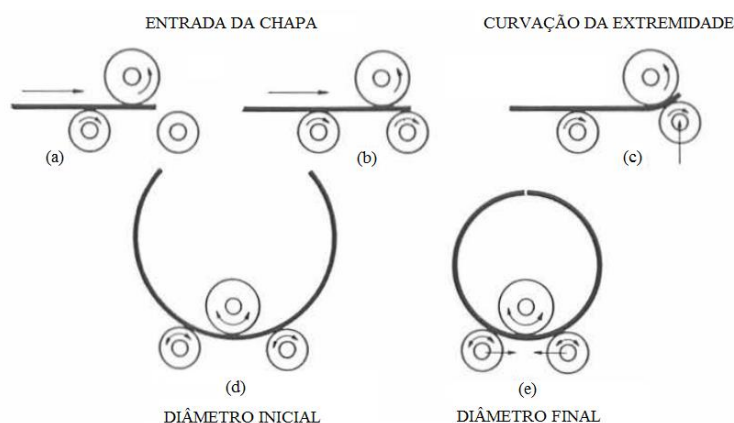


Figura 4 - Calandragem de uma chapa
Fonte: Telles (1996).

- Uma vez que as chapas foram calandradas, é realizada a sua união através da soldagem, permitindo a obtenção do cilindro que se tornará o vaso de pressão (caldeira).

- Por fim, na etapa final ocorre o controle de qualidade, que tem como objetivo detectar falhas, através de ensaios não destrutivos, como inspeção visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas ou por ultrassom, e com ensaios destrutivos como a metalografia, dureza e tração.

Como descrito por Telles (1996), os objetivos das etapas existentes durante a fabricação de uma caldeira, podem ser vistos através da Tabela 2.

Tabela 2 - Etapas para fabricação de caldeiras

Etapa	Objetivo
Escolha do material a ser utilizado	Levantamento da matéria prima necessária
Corte	Dimensionar as chapas
Calandragem	Dar o formato cilíndrico a chapa
União	Realização da Soldagem
Controle de Qualidade	Detecção de falhas

Fonte: Telles (1996), adaptado.

2.1.5 Materiais Utilizados

Segundo Lippold e Kotecki (2005), os materiais comumente utilizados na construção de caldeiras e vasos de pressão são aços alta e baixa liga, tanto no corpo cilíndrico quanto nos acessórios. O aço se torna a solução mais apropriada para aplicações de elevada vida útil, que demandam de precisão construtiva e resistência a corrosão, sendo usado na maioria dos tipos de peças de pressão, como cilindros, cabeçalhos, tubulações e chaminés.

2.2 SOLDAGEM DE CALDEIRAS

Na etapa de união ocorre a realização do processo de soldagem das extremidades da chapa, permitindo a junção das geometrias pré-delimitadas pelo processo de calandragem.

Para Wainer, Brandi e Mello (1992) soldagem é o processo de união entre duas partes metálicas usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão.

Segundo Telles (1996), a soldagem pode ser aplicada de três formas, que podem ser: manuais, semiautomáticas ou automáticas. Dos quais, os mais usuais são mostrados na Figura 5.

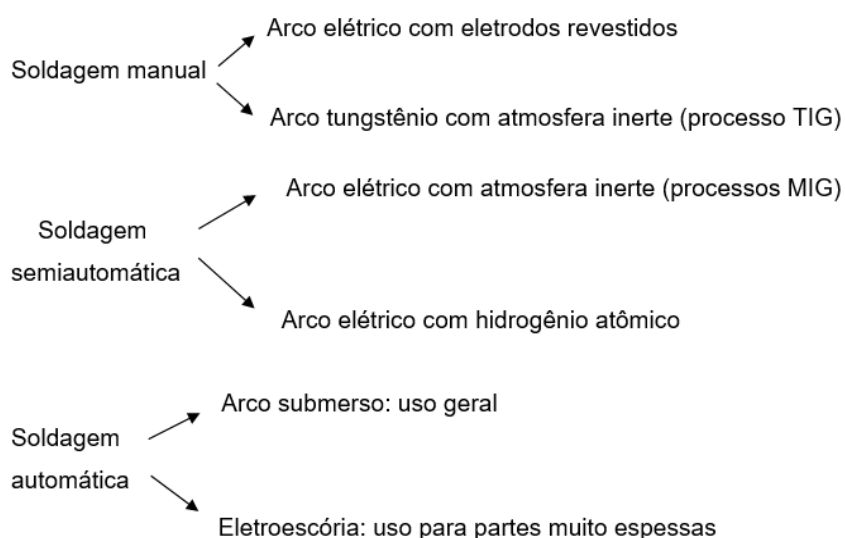


Figura 5 - Tipos de processos de soldagem

Fonte: Telles (1996), adaptado.

São inúmeros os processos utilizados na etapa de união, que podem ser divididos em relação a existência de diversos fatores, como a presença de pressão, fusão, calor e outros mostrados na Figura 6.

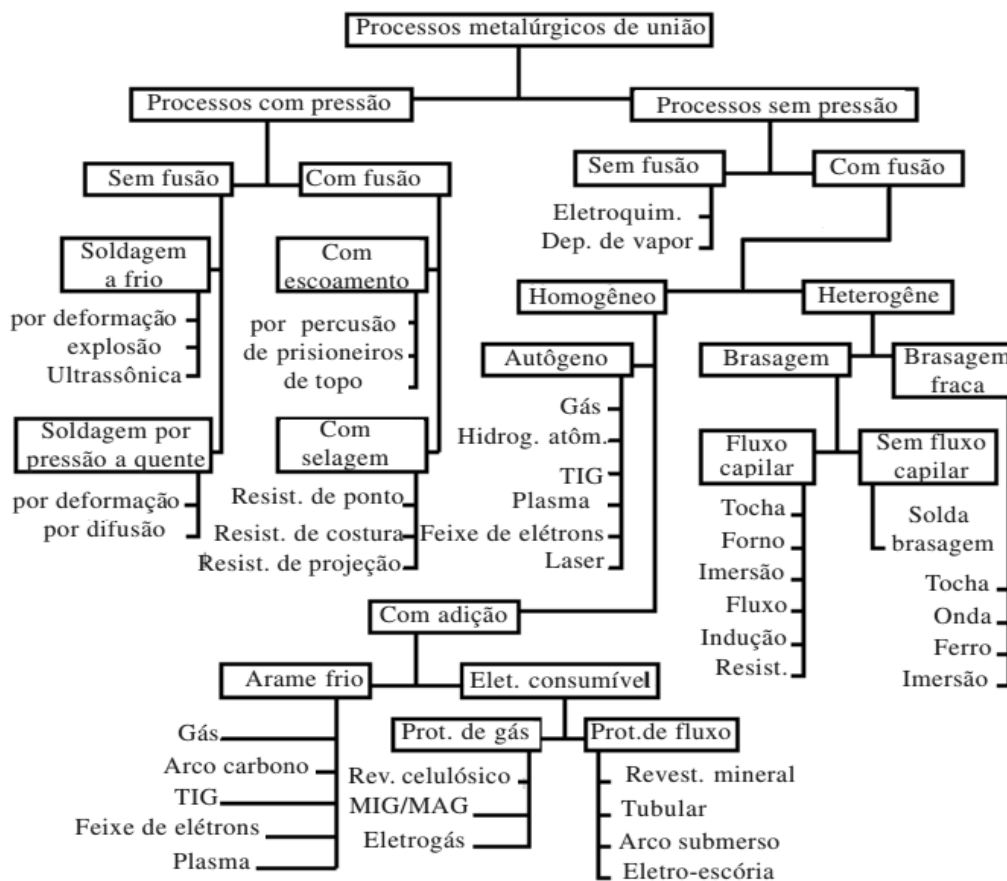


Figura 6 - Processos de Soldagem
Fonte: Portal Brasileiro da Soldagem.

2.3 SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO

O arco elétrico mostrado na Figura 7, é a fonte de calor mais aplicada na soldagem por fusão de materiais metálicos, ele pode ser definido, de acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992) e Forte (2005), como a descarga elétrica mantida através de um gás, resultante de uma ruptura dielétrica, a qual permite a passagem de elétrons através do gás, devido à alta tensão aplicada, produzindo uma descarga de plasma.

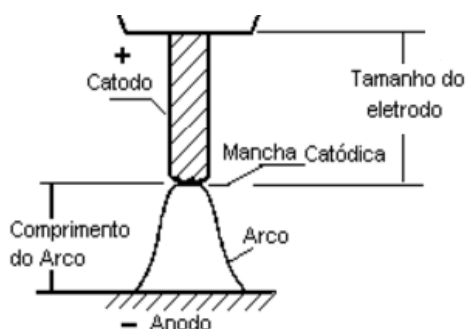


Figura 7 - Representação do arco elétrico
Fonte: Instituto de Soldagem e Mecatrônica.

Seu calor intenso e concentrado, é suficiente para fundir os dois metais, que após o resfriamento, ficam unidos.

2.3.1 Soldagem MIG/MAG

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), MIG/MAG é um processo de soldagem por arco elétrico mantido entre a peça a soldar e a extremidade de um arame nu consumível, fornecido por um alimentador contínuo, mostrado na Figura 8.

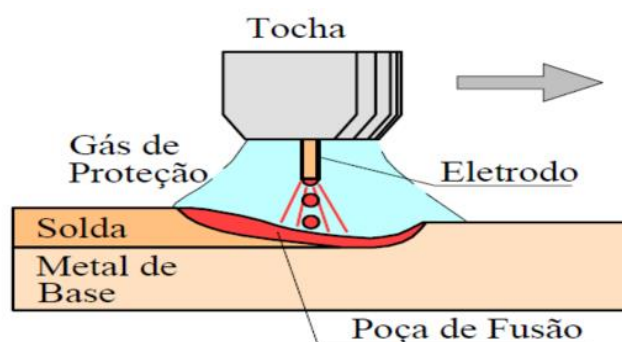


Figura 8 - Soldagem MIG/MAG
Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2009).

A região da solda é protegida por uma atmosfera protetora de gás inerte ou ativo ou a mistura deles.

O processo de soldagem que utiliza gás de proteção inerte (comercialmente, Ar e He), o qual não tem nenhuma atividade física com a poça de fusão, é denominado MIG (FORTE, 2005).

Sendo denominado MAG o processo de soldagem em que a proteção gasosa é feita com um gás ativo (usualmente CO_2), o qual, por sua vez, interage com a poça de fusão (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

2.4 O CORDÃO DE SOLDA

O cordão de solda é o resultado do processo de soldagem, é o elemento que permite a união propriamente dita, entre dois ou mais elementos.

As principais características a serem observadas no cordão de solda em relação a geometria, segundo Pessoa et al (2010), são mostradas na Figura 9.

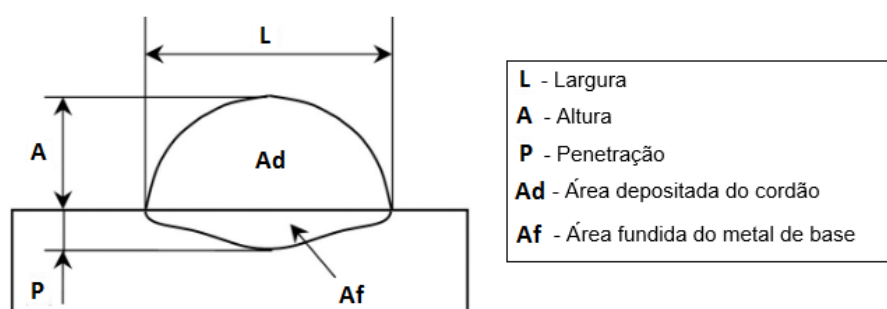


Figura 9 - Perfil geométrico de um cordão de solda
Fonte: Pessoa et al (2010), adaptado.

Tais características possuem relevância, pois, permitem que a junta de solda seja adequadamente preenchida com o mínimo de defeitos (PESSOA et al, 2010).

A largura e a altura, basicamente são as características que definem o tamanho do cordão de solda, ambos aumentam ou diminuem conjuntamente. No caso de cordões de solda muito grandes, tornasse muito difícil depositar os passes de solda subsequentes com boa fusão. Para cordões de solda com pequenas dimensões tornasse maior a probabilidade de ocorrer falta de fusão. Os parâmetros que mais influenciam na largura e na altura são a corrente e a velocidade de soldagem (FORTE, 2005).

A penetração é a distância da superfície do material soldado até onde a linha de fusão se estende. O parâmetro que mais exerce influência na penetração é a corrente de soldagem, que é diretamente proporcional a penetração (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

Outra característica a ser observada no cordão de solda é a diluição, que segundo Pessoa *et. al.* (2010), pode ser interpretada como a solubilização do material de adição no material de base, expressa em termos de porcentagem, obtida através da Equação 1.

$$D = \frac{Af}{Ad + Af} \quad (1)$$

Segundo Kou (1987), durante o processo de soldagem, que dá origem ao cordão de solda, surge um gradiente térmico no metal de base, criando uma região denominada zona termicamente afetada (ZTA), ilustrada na Figura 10. Ela representa a região da solda que não se fundiu durante a soldagem, porém devido as altas temperaturas atingidas no processo, sofre modificações em suas propriedades mecânicas e metalúrgicas.

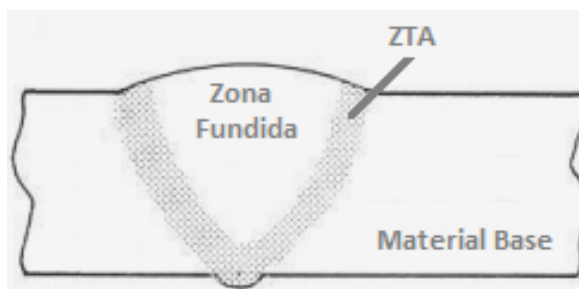


Figura 10 - Representação da ZTA
Fonte: American Welding Society (1987), adaptado.

Essas modificações resultam em diferenças no valor da dureza, tamanho do grão e resistência mecânica, presentes nesta região (BARBOSA, 2007).

2.5 AVALIAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Consiste em constatar se a soldagem executada resistirá as funções mecânicas requeridas é de suma importância. Os principais testes encarregados para essa constatação são os ensaios destrutivos e não destrutivos.

Os ensaios destrutivos segundo Souza (2000), são aqueles que provocam inutilização parcial ou total da peça, analisando suas características até que ocorra a ruptura.

Os ensaios não destrutivos, por sua vez, têm como objetivo encontrar defeitos que poderão colocar em risco a região soldada, envolvendo medições indiretas, qualitativas e poucas vezes quantitativas (CUPPARI e NOSE, 2008).

Em geral os ensaios mais utilizados na avaliação de soldas são:

- Ensaio de Dureza
- Ensaio por Líquidos Penetrantes
- Ensaio Metalográfico

2.5.1 Ensaio de Dureza

Dureza, segundo Callister (2007), é a propriedade de um material (no estado sólido) que permite a ele resistir à deformação plástica. Ela expressa a resistência a deformações permanentes, e é diretamente relacionada com a força de ligação dos átomos, que no caso dos metais, é alta.

No caso dos cordões de solda este ensaio tem como objetivo avaliar a presença de regiões endurecidas na junta soldada.

Segundo Garcia, Spim e Santos (2012), os principais métodos para determinação da dureza, em geral são por risco ou por penetração, sendo este o mais usual.

A dureza por risco consiste na comparação da capacidade de um material riscar outro. Entre os ensaios por risco, a dureza Mohs é a mais conhecida, resumindo-se a uma escala de 10 minerais padrões organizados de tal forma que o mais duro (diamante - dureza ao risco 10) risca todos os outros, contida na Figura 11 (GARCIA, SPIN e SANTOS, 2012).

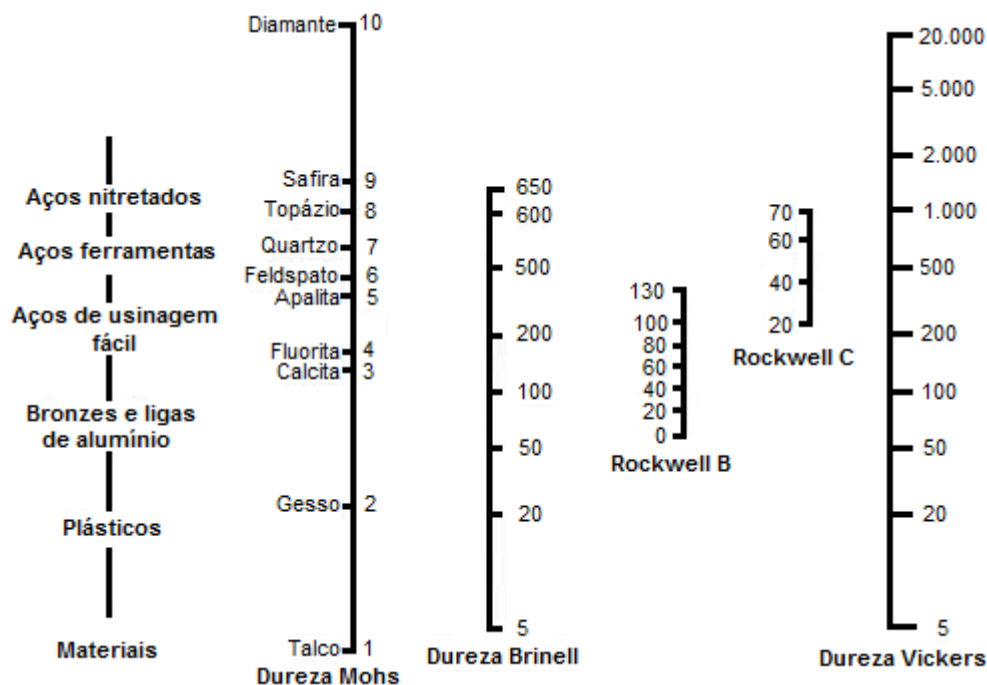


Figura 11 - Escalas comparativas entre os valores de vários métodos de durezas
Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012), adaptado.

A dureza por penetração, é expressa segundo Callister (2007), através de ensaios de dureza, sendo os principais Brinell, Rockwell e Vickers. O teste típico

para obtenção da dureza Brinell, consiste em um penetrador esférico de dimensões conhecidas e de elevada dureza, geralmente aço endurecido (ou carbeto de tungstênio), forçado contra a superfície da peça a ser testada. O índice de dureza Brinell, HB, é uma função tanto da magnitude da carga, como do diâmetro da impressão resultante (Anexo A), sua escala pode ser observada na Figura 11.

No caso da dureza Rockwell os penetradores incluem esferas de aço de elevada dureza, com diâmetros de 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 polegadas e cones de diamante, utilizados em materiais que possuem elevada dureza.

Existem várias escalas que podem ser utilizadas através de várias combinações, contendo diferentes penetradores e cargas, visto na Tabela 3.

Tabela 3 - Escalas de Dureza Rockwell

Símbolo da Escala	Penetrador	Carga Principal (kg)
A	Diamante	60
B	Esfera com 1/6 pol.	100
C	Diamante	150
D	Diamante	100
E	Esfera com 1/8 pol.	100
F	Esfera com 1/16 pol.	60
G	Esfera com 1/16 pol.	150
H	Esfera com 1/8 pol.	60
K	Esfera com 1/8 pol.	150

Fonte: Callister (2007).

O índice de dureza Rockwell, HR, é obtido através da diferença entre a profundidade de penetração resultante da aplicação de uma pré carga, seguida por outra de maior intensidade (Anexo A). As escalas B e C são mostradas na Figura 11.

Na técnica de ensaio de dureza Vickers, um pequeno penetrador de diamante, com geometria piramidal, é forçado contra a superfície do material a ser testado. Segundo Garcia, Spim e Santos (2012), as cargas aplicadas são extremamente inferiores as utilizadas nos ensaios Brinell e Rockwell, variando entre 1 e 1000 g. O resultado (impressão) é observado através de um microscópio e medido, sendo então convertida para um índice de dureza (Anexo A), cuja escala é apresentada na Figura 11.

O método Vickers é conhecido como método de ensaio de microdureza com base na carga e no tamanho do penetrador, sendo adequado para medição da dureza de regiões pequenas e selecionadas do corpo de prova.

2.5.2 Ensaio Metalográfico

Metalografia, segundo Colpaert (2008), é o estudo da morfologia e estrutura dos metais. O exame metalográfico, procura relacionar a estrutura íntima do material às propriedades físicas, com o processo de fabricação, com o desempenho de suas funções e outros.

Em relação ao tipo de observação o ensaio pode ser:

- Macroscopia (Macrografia)
- Microscopia (Micrografia)

Na observação macroscópica, a análise é efetuada a olho nu, através de lupas ou com o auxílio de microscópios estéreos.

A observação por microscopia é realizada através de microscópios específicos, conhecidos como microscópios metalográficos, que possibilitam um aumento de até 2500 vezes (COLPAERT, 2008).

Como esse método possui um pequeno campo focal, de acordo com Colpaert (2008), ele permite apenas a observação de superfícies perfeitamente planas e polidas, assim é necessária uma preparação da amostra, que visa deixá-la em condições, tal preparação consiste basicamente em cinco etapas, sendo elas:

- Corte: nesta etapa a amostra a ser analisada deve ser cortada de tal forma que não sofra alterações devido ao método de corte.
- Embutimento metalográfico: esta etapa visa a obtenção da amostra embutida, que será submetida as outras etapas de preparação.
- Lixamento: tem como objetivo eliminar as irregularidades obtidas durante o processo de embutimento e corte, promovendo uma superfície com a menor rugosidade possível.
- Polimento: essa etapa visa eliminar quaisquer vestígios de marcas deixadas pela etapa de lixamento.

- Ataque químico: em geral, é realizado através da imersão da amostra, em um meio pré-determinado, dependendo do material, durante um intervalo de tempo, tendo como objetivo revelar a microestrutura.

2.5.3 Ensaio por Líquidos Penetrantes

Para Andreucci (2014), o ensaio por líquidos penetrantes é um método que tem como foco a detecção de descontinuidades superficiais presentes na peça. Esta inspeção, consiste na aplicação de um líquido sobre a superfície da peça a ser realizado o ensaio, ele penetra as descontinuidades existentes, em seguida remove-se o excesso presente e utiliza-se um revelador, que obriga a saída do líquido retido nas descontinuidades, que desta forma ficam então desenhadas sobre a superfície da peça.

O método consistindo basicamente nas seguintes etapas: Limpeza da área a ser analisada; Aplicação do líquido penetrante; Remoção do excesso de penetrante; Aplicação do Revelador; Observação de trincas; Limpeza e secagem final. A Figura 12, ilustra a sequência das etapas presentes no ensaio.

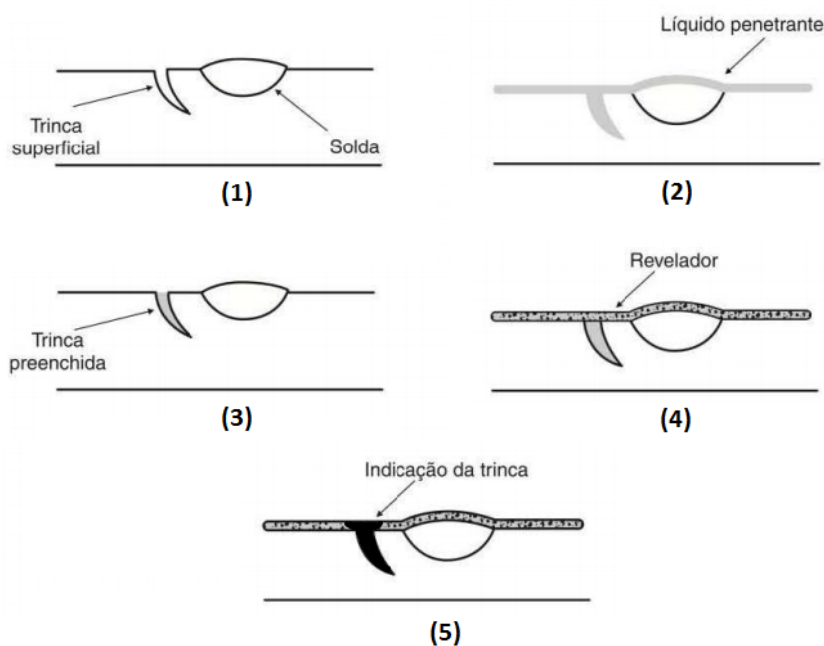


Figura 12 - Sequência do ensaio com líquidos penetrantes
Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012), adaptado.

De acordo com Forte (2005), no caso de soldas, essa inspeção tem como objetivo detectar poros, cavidade ou fissuras que chegam até a superfície, como mostrado na Figura 13.

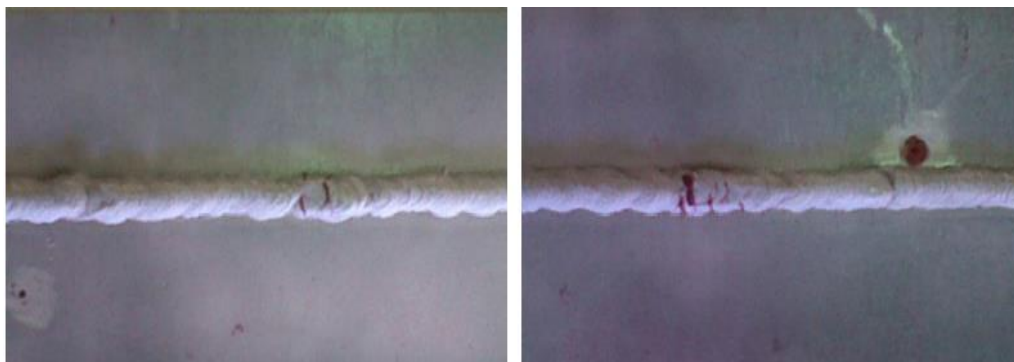


Figura 13 - Resultados de ensaios por líquidos penetrantes de juntas soldadas
Fonte: Andreucci (2014).

3 METODOLOGIA

3.1 DELIMITAÇÃO E OBTENÇÃO DOS MATERIAIS A SEREM UTILIZADOS

Realizou-se um levantamento dos materiais corriqueiramente utilizados na fabricação de caldeiras a vapor e qual o método de soldagem mais indicado para a união das chapas. Definidos os materiais necessários, buscou-se a aquisição através da doação de empresas que trabalham com a fabricação e manutenção de caldeiras.

Foram doadas chapas do material utilizado na fabricação\manutenção de caldeiras flamotubulares sendo elas de Aço SAE 1020. As chapas foram cortadas em amostras menores para realização dos ensaios, nelas foram criados chanfros, mostrados na Figura 14, conforme as informações contidas no manual ESAB.

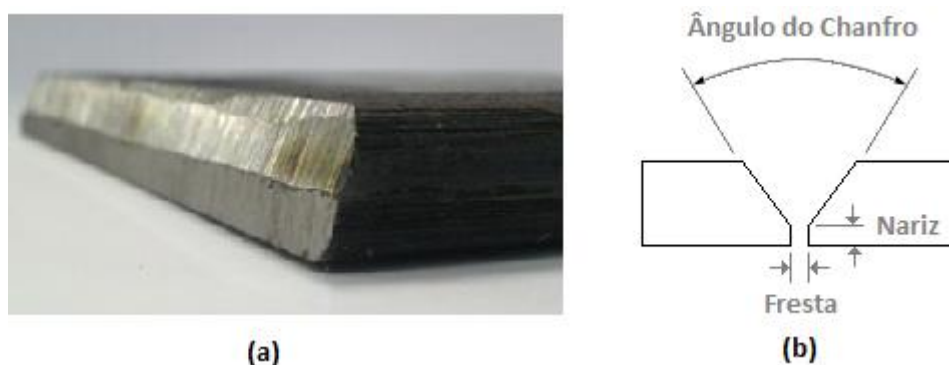


Figura 14 - (a) chanfro feito nas chapas, (b) características do chanfro
Fonte: Autoria própria.

As dimensões são respectivamente: Nariz (16 mm); Fresta (24 mm) e Ângulo do Chanfro (70°).

3.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Após a criação dos chanfros nas chapas, as mesmas foram soldadas através do processo de soldagem MAG no laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Guarapuava, utilizando como equipamento a Máquina de Soldagem MIG/MAG da marca SUMIG, modelo Hank 335. O gás utilizado foi o Argônio 80% + Oxigênio 20% e o arame AWS A5.18 ER70S-6, que de acordo com a

ESAB é composto de: C (0,07-0,15 %); Mn (1,40-1,80 %); Si (0,80-1,15 %); S ($\leq 0,035$ %) e P ($\leq 0,025$ %).

Durante esta etapa preocupou-se com os parâmetros utilizados no processo de soldagem, foram feitas três amostras com parâmetros distintos, contidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados em cada amostra

Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Velocidade de alimentação do arame de solda (m/min)	Vazão do Gás de Proteção (L/min)
1	145	22	25	5	10
2	175	24	25	5	10
3	185	29	25	5	10

Fonte: Autoria própria.

As chapas soldadas foram cortadas a fim de se isolar os cordões de solda, facilitando as inspeções.

3.3 PROCESSOS DE INSPEÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Os cordões gerados foram inspecionados, com o intuito de avaliar suas características, para realização desta etapa utilizaram-se ensaios destrutivos (Metalografia e Dureza) e não destrutivos (Líquidos penetrantes e Inspeção visual).

3.3.1 Ensaio por Líquidos Penetrantes

A inspeção por Líquidos Penetrantes seguiu os passos presentes na literatura, de acordo com Andreucci (2014), realizando a limpeza da superfície (área a ser analisada) das amostras, com água e sabão, posteriormente as mesmas foram secas para aplicação do líquido penetrante.

Aguardou-se o tempo de 10 minutos, em seguida, foi realizada a remoção do penetrante, com água corrente, então, realizou-se novamente a secagem para aplicação do revelador.

3.3.2 Ensaio de Dureza

Neste ensaio foi medida a macro dureza de cada amostra, obtidas na escala Rockwell B (HRB), através do equipamento Durômetro de Bancada para Dureza Rockwell Normal Digimess com edentador esférico de 1/16" de medida e carga de 100 kgf.

As amostras foram divididas em 3 linhas, sendo que foram realizadas 9 medidas por linha tendo a medida central sendo feita em cima do cordão de solda (posição zero), cada medida foi desloca em 3 mm na linha, exemplificado na Figura 15.

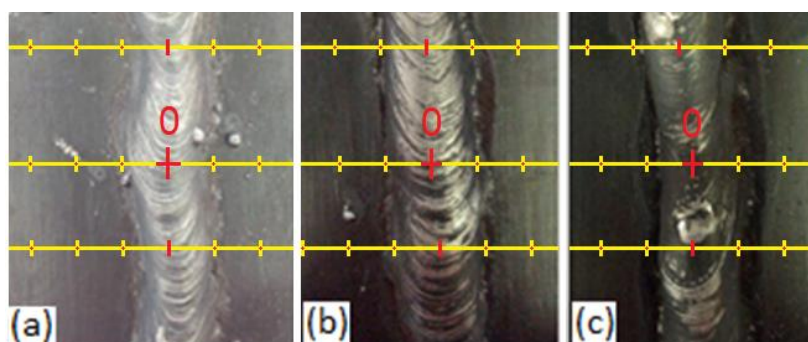


Figura 15 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, exemplificação do ensaio de dureza
Fonte: Autoria própria.

Após a medição, realizou-se a média entre as medidas obtidas para cada um dos pontos medidos em cada peça.

3.3.3 Ensaio Metalográfico

Antes da realização do ensaio propriamente dito, ocorreram procedimentos visando à preparação das amostras. Primeiramente foram cortadas através da Cortadora Metalográfica CM40/60, o que possibilitou um corte sem alterações na microestrutura das amostras, para que adquirissem dimensões que tornassem possível seu embutimento.

As amostras foram embutidas a quente através da Prensa Embutidora Metalográfica Manual EM30D (\varnothing 30mm), sendo utilizada como material de resina a baquelite.

A pressão do equipamento foi mantida entre 125 a 150 kgf/mm², o tempo de aquecimento foi de aproximadamente 13 minutos, atingindo a temperatura de 160°C, na qual foi mantida até o seu resfriamento, que durou cerca de 5 minutos, reduzindo a temperatura para 60°C, gerando amostras como a contida na Figura 16.



Figura 16 - Amostra do cordão de solda após embutimento
Fonte: Autoria própria.

Na etapa seguinte foi realizado o lixamento, através da Politriz Lixadeira Metalográfica - PL02, mostrada na Figura 17, tendo como objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas contidas na superfície das amostras.



Figura 17 - Politriz Lixadeira Metalográfica
Fonte: Autoria própria.

As amostras foram lixadas com lixas de granulometria sucessivamente menor, rotacionando-as em 90° em cada lixa subsequente. A sequência adotada para as lixas de carbeto de silício foi de 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh, utilizando de uma rotação de 400 RPM. As amostras eram mantidas na lixadeira durante 10 minutos, após esse tempo, verificavam-se se os riscos gerados pela lixa anterior haviam se extinguido, para assim dar continuidade ao lixamento.

Finalizado o lixamento as amostras foram limpas com água e depois álcool etílico, visando deixar a superfície isenta de poeira e traços abrasivos.

A etapa seguinte foi o polimento, sendo realizado com a utilização de abrasivo de alumina 0,5 microns. O polimento foi efetuado através da Politriz Lixadeira Metalográfica - PL02E.

Na sequência realizou-se o ataque químico, feito através do reagente Nital a 10% (90 ml de álcool etílico 10 ml de ácido nítrico concentrado) com o tempo de ataque de 10 segundos. Após o ataque as amostras foram limpas com água, álcool etílico e depois secas com ar quente.

Terminado o ataque químico as amostras foram levadas até o microscópio óptico marca Olympus modelo BX521 para realização da análise da micrografia, na qual foram utilizadas lentes de ampliação de 5x, 20x e 100x.

Neste ponto foram realizadas a análise macroscópica do cordão de solda e a análise da penetração, largura, profundidade da solda e diluição de cada uma das amostras, estas feitas no microscópio.

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Após a realização dos ensaios os resultados gerados foram analisados e registrados, afim de responder os objetivos gerais e específicos propostos pelo trabalho.

Foi realizada uma análise referente a alteração da microestrutura no cordão de solda e na ZTA, bem como a avaliação da influência do aporte térmico na geometria do cordão de solda.

Por fim, investigou-se à influência do aporte térmico na macrodureza das amostras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação das características do cordão de solda gerado pelo processo de soldagem MAG na união de chapas para fabricação de caldeira flamotubular, se deu através de ensaios mecânicos, destrutivos (Metalografia e Dureza) e não destrutivos (Líquidos penetrantes e Inspeção visual).

Tendo como metal base utilizado na fabricação de caldeiras flamotubulares o Aço SAE 1020, foram feitas 3 amostras, nas quais, selecionou-se parâmetros de soldagem, de acordo com manual ESAB, que se encontram no mesmo patamar dos utilizados por empresas da região, empregados no processo MAG, vistos na Tabela 5.

Tabela 5 - Intervalo de valores utilizados nos parâmetros de soldagem

Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Velocidade de alimentação do arame de solda (m/min)	Vazão do Gás de Proteção (L/min)
145 -185	22 - 29	25	5	10

Fonte: Autoria própria.

As amostras após o processo de soldagem com os parâmetros acima descritos são mostradas na Figura 18.

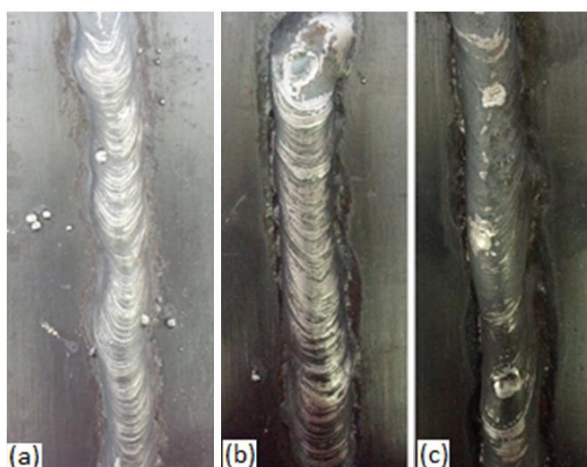


Figura 18 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, após a soldagem
Fonte: Autoria própria.

As dimensões e a diluição (D) do cordão de solda de cada amostra, encontram-se na Tabela 6, apresentando largura (L), altura (A), penetração (P), área depositada do cordão (Ad) e área fundida do metal base (Af).

Tabela 6 - Morfologia dos cordões de solda

Amostra	L (mm)	A (mm)	P (mm)	Ad (mm ²)	Af (mm ²)	D (%)
1	11,4	4,8	2,3	40,77	14,91	26,77
2	10,1	4,1	2,5	30,45	16,91	35,72
3	9,6	3,9	3	27,55	17,97	39,47

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que quanto maior a tensão, maior é a tendência de que ocorra aumento na diluição e na penetração. Isto ocorre uma vez que a tensão se mostra inversamente proporcional as variações nos valores da largura do cordão de solda (COLAÇO et al, 2012).

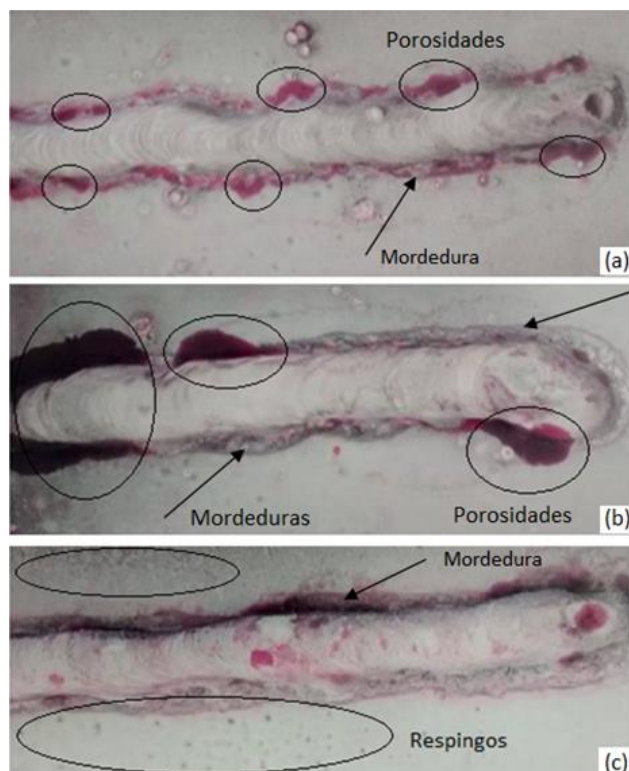
4.1 ENSAIOS MECÂNICOS

4.1.1 Ensaio por Líquidos Penetrantes

No ensaio por líquidos penetrantes as amostras 1, 2 e 3, mostradas na Figura 19, apresentam poros, respingos e mordedura.

As mordeduras representam o baixo relevo das bordas do cordão de solda, devido a fusão da superfície do metal de base próxima ao cordão (FIGUEIREDO, 2005). Nota-se que elas estão presentes nas três amostras.

Os poros são mais evidentes nas amostras 1 e 2, enquanto os respingos evidenciam-se na 3, o que indica que os valores de tensão são proporcionais ao aumento e a diminuição da porosidade e dos respingos (KRUPPA et al, 2011).



**Figura 19 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, após a aplicação do revelador
Fonte: Autoria própria.**

4.1.2 Ensaio de Dureza

Os resultados do ensaio de dureza Rockwell são mostrados nos Gráficos 1, 2 e 3, o maior valor individual de dureza obtido foi de 80 HRB na posição zero da amostra 1.

No Gráfico 1 nota-se que o perfil de dureza apresenta um crescimento em direção ao centro do cordão de solda (posição zero), comportamento apresentado nos Gráficos 2 e 3 correlatamente. Esta característica se dá devido a maior temperatura, a qual provoca modificações na microestrutura local.

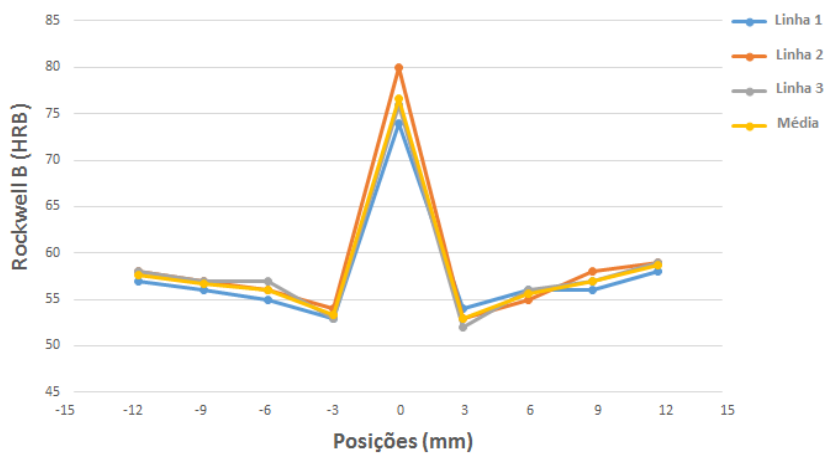


Gráfico 1 - Perfil de dureza da amostra 1
Fonte: Autoria própria.

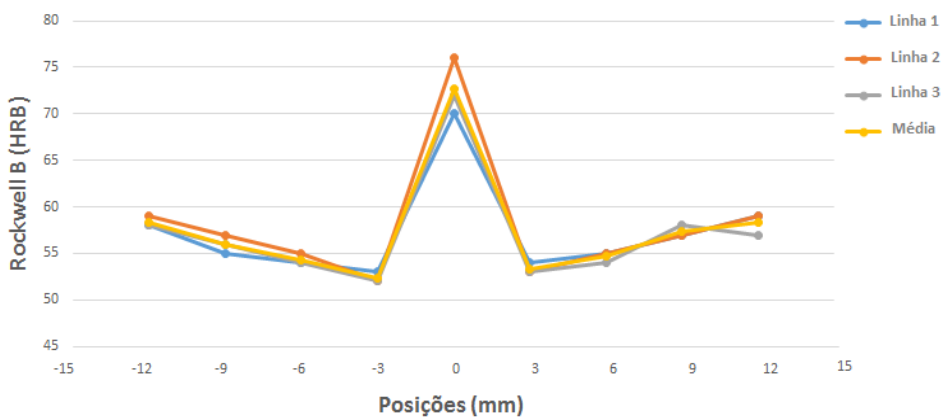


Gráfico 2 - Perfil de dureza da amostra 2
Fonte: Autoria própria.

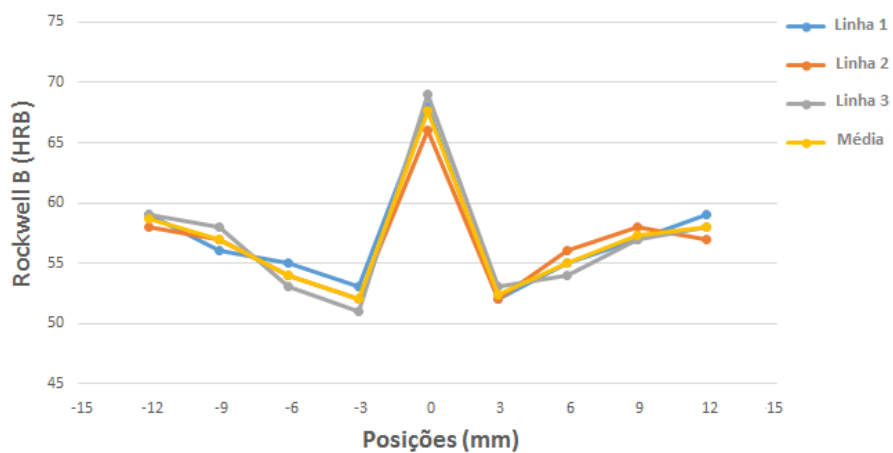


Gráfico 3 - Perfil de dureza da amostra 3
Fonte: Autoria própria.

A dureza no cordão de solda é mais elevada devido sua microestrutura típica, que consiste em uma estrutura de solidificação acicular (feitio de agulha) (SERNA-GIRALDO e PADOVESE, 2010).

No Gráfico 4 são plotadas as médias dos perfis de dureza de cada amostra, ficando visível a relação entre os valores de corrente (A) e tensão (V) com os de dureza (HRB).

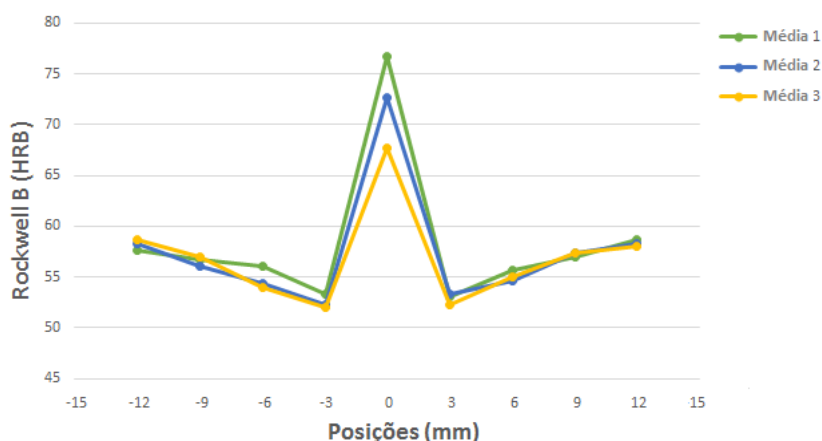


Gráfico 4 - Perfil da dureza média das amostras 1, 2 e 3
Fonte: Autoria própria.

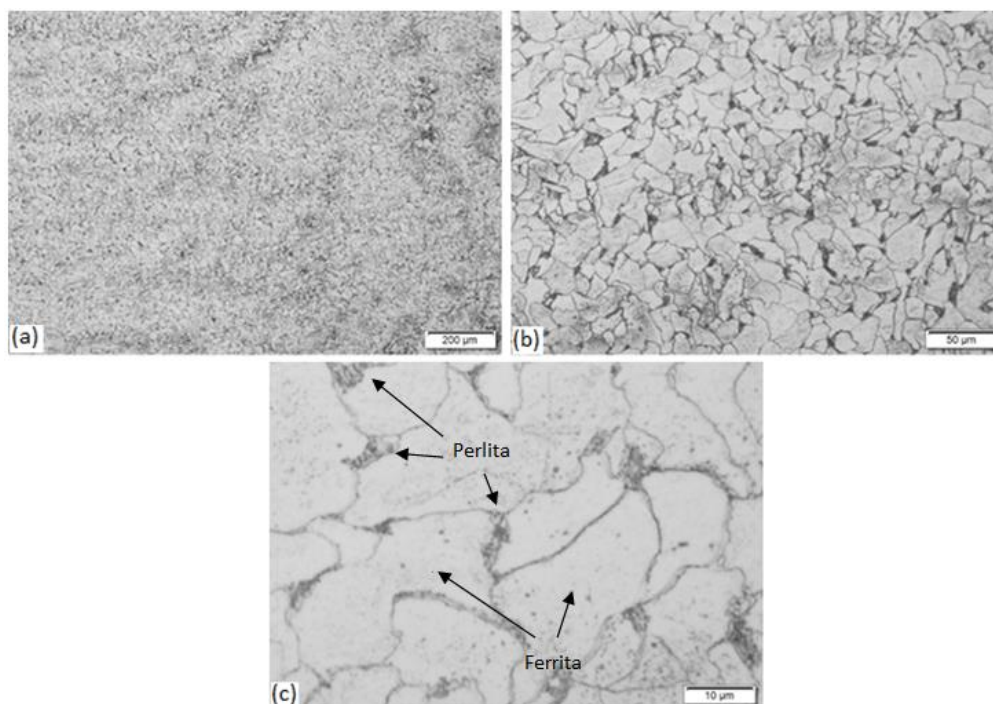
Os maiores valores médios encontrados em cada amostra foram:

- Amostra 1: (145 A - 22 V - 76,67 HRB)
- Amostra 2: (175 A - 24 V - 72,67 HRB)
- Amostra 3: (185 A - 29 V - 67,67 HRB)

Assim, torna-se claro que os valores de dureza são inversamente proporcionais aos de corrente e tensão (LIMA et al, 2007).

4.1.3 Ensaio Metalográfico

A Figura 20, apresenta a micrografia realizada no metal base, nas ampliações (5x, 20x e 100x).



**Figura 20 - Metal base, nas ampliações de (a) 5x, (b) 20x, (c) 100x
Fonte: Autoria própria.**

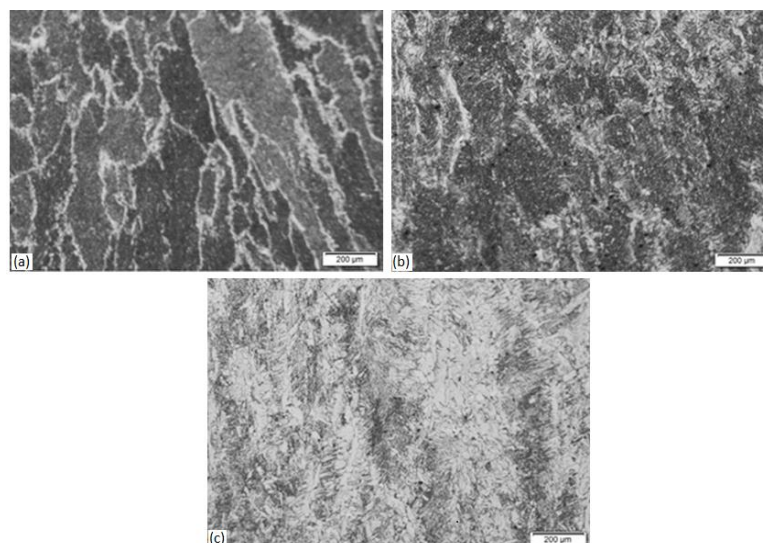
Pode-se observar, através da microscopia no Aço SAE 1020, as fases ferrita e perlita, presentes neste material, assim como os contornos de grãos.

Sendo a ferrita definida, como a solução (fase) sólida do carbono em ferro alfa e a perlita, a junção das fases ferrita e cementita (carboneto de ferro, Fe_3C), vistos no Anexo B (CALLISTER, 2007).

A composição do Aço SAE 1020, segundo a Catálogo de Chapas e Placas de Aço - TENAX, consiste em: C (0,18-0,23 %); Mn (0,30-0,60 %); P ($\leq 0,040$ %) e S ($\leq 0,050$ %).

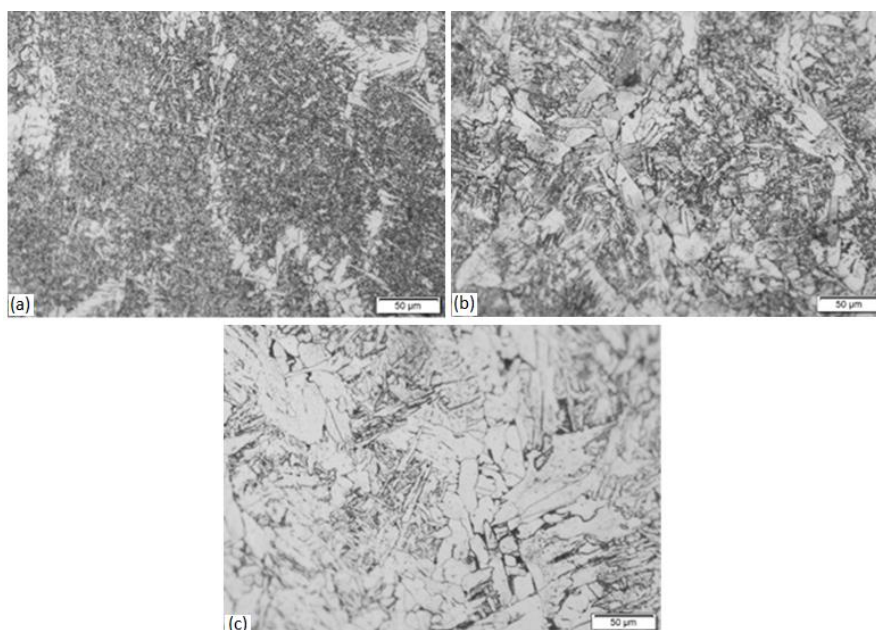
A Figura 21 mostra a variação da microestrutura presente no cordão de solda de cada amostra, na ampliação de 5x.

O material do cordão de solda (AWS A5.18 ER70S-6) favorece a formação de uma microestrutura composta basicamente por ferrita e perlita, semelhante ao Aço SAE 1020, porém, devido a influência da amplitude térmica de soldagem, ele ainda se encontra no estado bruto de fusão, apresentando granulação grosseira devido ao superaquecimento (COLPAERT, 2008).



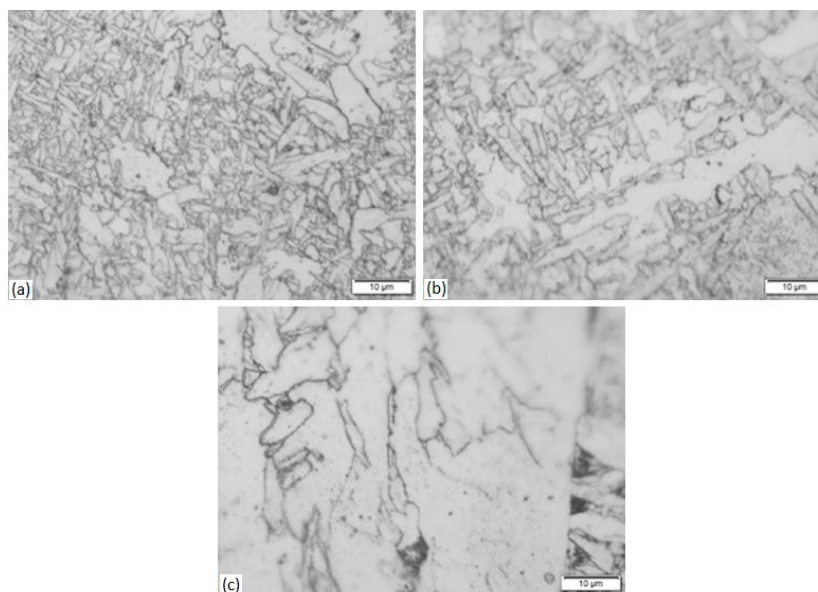
**Figura 21 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, na ampliação de 5x
Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 22 pode-se observar a variação da microestrutura presente no cordão de solda de cada amostra, na ampliação de 20x.



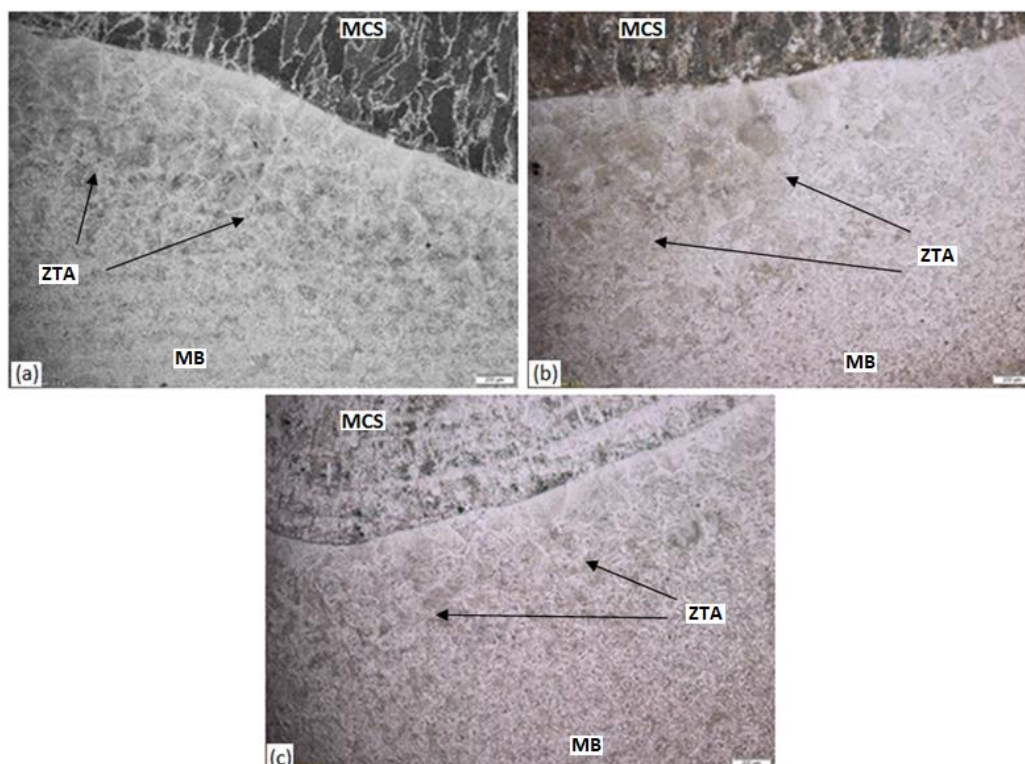
**Figura 22 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, na ampliação de 20x
Fonte: Autoria própria.**

A variação da microestrutura presente no cordão de solda de cada amostra, na ampliação de 100x, pode ser vista na Figura 23, a qual, possibilita uma melhor visualização dos grãos (microestrutura como um todo).



**Figura 23 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, na ampliação de 100x
Fonte: Autoria própria.**

A Figura 24 apresenta a micrografia realizada na linha de soldagem com a ampliação de 5x, na qual, ZTA (zona termicamente afetada), MB (material base) e MCS (material do cordão de solda).



**Figura 24 - (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, linha de soldagem na ampliação de 5x
Fonte: Autoria própria.**

Observa-se que na ZTA ocorre um aumento do tamanho dos grãos, isso devido a altas temperaturas atingidas e posteriormente o resfriamento, que se deu a temperatura ambiente, ou seja, o material foi submetido a uma alta temperatura por tempo prolongado e em seguida a um resfriamento lento, o qual possibilita a remoção de tensões, diminuição da dureza e ajuste no tamanho dos grãos (CALLISTER, 2007).

Constata-se também na Figura 24 um aumento na largura da ZTA, isto ocorre devido ao alto aporte térmico referente aos parâmetros das amostras, implicando na queda da dureza destas regiões (MEZZOMO, 2015).

5 CONCLUSÕES

Pode-se constatar que quanto maior o valor de tensão, maiores eram os valores de penetração e diluição da solda, possibilitando uma união total das chapas. Verificou-se ainda que quando maior a tensão maiores eram as incidências de respingos e menores as de porosidade, a qual, favorece a formação de trincas e corrosões.

No que se refere a geometria do cordão de solda, verificou-se que os valores de largura (L), penetração (P) e diluição (D), são diretamente proporcionais aos valores de tensão, enquanto os de altura (A), área depositada do cordão (Ad) e área fundida do metal base (Af), são inversamente proporcionais.

Em relação ao ensaio de dureza, conclui-se que quanto maior a tensão empregada, menores eram os valores médios de dureza presentes na ZTA, enquanto que no metal base, não foram constatadas alterações.

Através do ensaio metalográfico, notou-se que o arame de solda (AWS A5.18 ER70S-6) utilizado, favorece a formação de ferrita e perlita, semelhante ao encontrado no metal base (Aço SAE 1020). Em relação a ZTA, nota-se que maiores valores de tensão, implicam no aumento da largura e uma microestrutura com grãos maiores, isto, devido ao aporte térmico.

6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Encoraja-se estudos mais aprofundados através da obtenção de mais amostras, possibilitando assim, uma maior variação nos parâmetros empregados na soldagem.

Seria interessante a realização de mais ensaios que visem a caracterização mecânica, podendo ser realizado, por exemplo, ensaio de tração.

REFERÊNCIAS

ASSUNÇÃO, K. M.; RIBEIRO, M. M. **INSPEÇÃO DE CALDEIRAS**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, 2008.

American Welding Society. **Welding Handbook Fundamentals of Welding**. 8th Edition. Miami: 1987.

BABCOCK WANSON. Disponível em: <<http://www.babcock-wanson.pt/>>. Acessado em: 1 de. out. 2015.

BARBOSA, R. P. **Tecnologia Mecânica – Metalurgia da soldagem, soldabilidade dos materiais**. UNILESTE, Coronel Fabriciano-MG, 2007.

BRASIL. **NR-13 - Manual Técnico de Caldeiras e Vasos de Pressão**. ed. Comemorativa 10 anos da NR-13 (da Portaria nº 23/94). Brasília: Ministério do Trabalho, 2006.

Caldeira explode e deixa três trabalhadores feridos no Oeste de SC. **G1 - O portal de notícias da Globo (2012)**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2015/07/caldeira-explode-e-deixa-tres-trabalhadores-feridos-no-oeste-de-sc.html>>. Acesso em: 20 de set. 2015.

CALDEIRAS AQUATUBULARES. Disponível em: <<http://www.thamil.com.br/caldeiras-aquatubulares>>. Acesso em: 20 de set. 2015.

CALLISTER, Jr., W.D. **Materials Science and Engineering**. 7 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

COLAÇO, F. G.; PERUCHI, L. V.; BASSI, V. B.; MARANHO, O. INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM NO DESGASTE ABRASIVO DE REVESTIMENTOS DUROS APLICADOS PELO PROCESSO FCAW. In: **IIV CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012, São Luis - MA**. Anais do IIV CONEM, 2012.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos comuns**. 4. ed. revista e atualizada. São Paulo: Editora Blucher, 2008.

CUPPARI, F. M.; NOSE, M. M. TIPOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E APLICAÇÃO EM CALDEIRAS. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, 2008.

ESAB. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/>>. Acesso em: 25 de mai. 2016.

ESAB. **Apostila Metalurgia da Soldagem**. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/>>. Acesso em: 25 de mai. 2016.

FABRICAÇÃO DE CALDEIRAS E ACESSÓRIOS PARA CALDEIRAS. Disponível em: <<http://www.thamil.com.br/caldeiras-e-acessorios.html>>. Acesso em: 19 de set. 2015.

FIGUEIREDO, K. M. **Tecnologia da Soldagem**. Departamento de mecânica e materiais. São Luis, 2005.

FORTE, C. **Soldagem MIG / MAG - traduzido e adaptado**. Contagem: ESAB, 2005.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HOW STUFF WORKS SCIENCE. Disponível em: <<http://science.howstuffworks.com>>. Acesso em: 17 de out. 2015.

INSTITUTO DE SOLDAGEM E MECATRÔNICA. Disponível em: <<http://www.labsolda.ufsc.br/>>. Acesso em: 25 de out. 2015.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. New York: John Wiley & Sons, 1987.

KUMAR, R. **Boilers: A Practical Reference**. 1 ed. Florida, USA: CRC Press, 2013.

KRUPPA, R. de G. et al. A INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO NA METALURGIA DE SOLDAGEM DE REVESTIMENTOS DE AÇO INOXIDÁVEL COM COBALTO. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, ISSN 2176-7270. Vol. 3, No 2, 2011.

LIPPOLD, J.C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. John Wiley & Sons. USA, New Jersey, 2005.

LÍQUIDOS **PENETRANTES**. Disponível em:
<<http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/andreucci/LP-2014.PDF>>. Acesso
em: 25 de out. 2015.

LIMA, E. G.; Ferreira, F. J.; REIS, L.P.S.; COBAXO, R.; ANDRADE, W.C.; BARBOSA, R.P. 2007. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM DO PROCESSO ELETRODO TUBULAR NA DUREZA DA ZTA DE UM AÇO CRMO**. Centro Universitário do Leste de Minas Gerais / Unileste-MG, 2007.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamento e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MEZZOMO, T. **Estudo comparativo do efeito de diferentes arames de adição em juntas soldadas de aços de dupla**. 2015. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 2015.

MODENESI, P. J. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

MODENESI, P. J. **Introdução aos processos de soldagem**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2000.

MARTINELLI JÚNIOR, L. C. **Introdução às Máquinas Térmicas: Caldeiras - ISBN: 9788590877523**. 01. ed. , 2008. v. 01. 175 p. .

NR-13: Manual técnico de caldeiras e vasos de pressão. Edição comemorativa 10 anos da NR-13. 1. reimpressão. Brasília: MTE, SIT, DSST, 2006.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia da soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC - LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS EDITORA S.A., 1982.

PESSOA, A. R. P. et al. Seleção de parâmetros através do método Taguchi para soldagem de revestimento com ligas de níquel pelo processo MIG/MAG. **Soldag. insp.** (Impr.) [online]. 2010, vol.15, n.4, pp. 317-324. ISSN 0104-9224. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242010000400009>>. Acesso em: 6 de nov. 2015.

PORTAL BRASILEIRO DA SOLDAGEM. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/>>. Acesso em: 22 de out. 2015.

Quatro trabalhadores ficam feridos após explosão de caldeira a gás. **G1 - O portal de notícias da Globo (2015)**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2012/09/quatro-trabalhadores-ficam-feridos-apos-explosao-de-caldeira-gas.html>>. Acesso em: 19 de set. 2015.

PROCESSOS DE SOLDAGEM. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos>>. Acesso em: 27 de out. 2015.

SERNA-GIRALDO, C. P. and PADOVESE, Linilson R.. Avaliação de soldagem de aço estrutural através do Ruído Magnético de Barkhausen. **Soldag. insp.** (Impr.) [online]. 2010, vol.15, n.4 [cited 2016-06-07], pp.273-280. ISSN 0104-9224. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242010000400004>. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242010000400004&lng=en&nrm=iso>. Acesso: 30 de mai. 2016.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho.** São Paulo: Artliber Editora, 2008.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos.** 5 ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2000.

STEAM: ITS GENERATION AND USE. 41 edition. Editors: John B. Kitto and Steven C. Stultz. 41 edition. The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, U.S.A, 2005.

TELLES, P. C. S. **Vasos de pressão.** 2 ed. São Paulo: Saraiva, 1996.

TENAX AÇO E FERRO LTDA. **Catálogo - Chapas e Placas de Aço.** Disponível em: <http://www.tenax.com.br/dados/produtos/catalogos/Catalogo_Chapas.pdf>. Acesso em: 29 de mai. 2016.

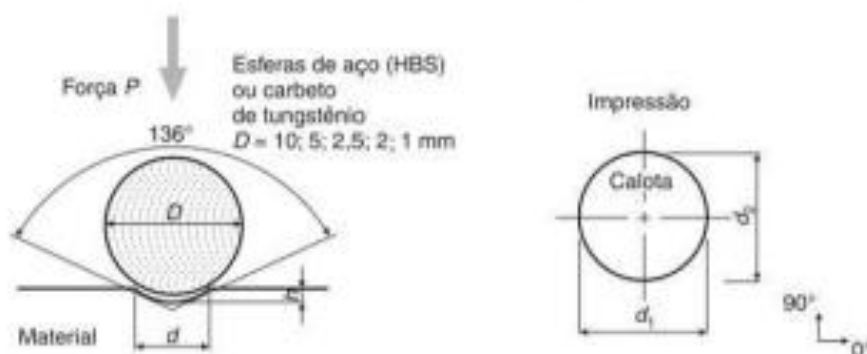
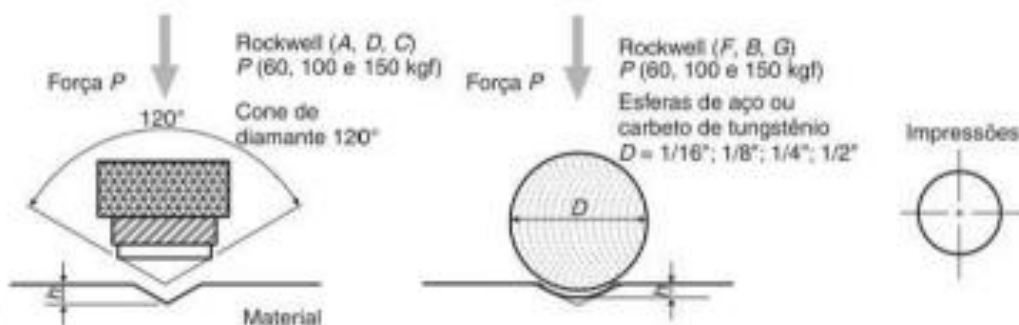
VAN VLACK, L. H. **Materials for engineering**. Reading, Addison Wesley, 1989.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**.
8. reimpressão. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992.

ANEXO A - Tipos de ensaios de dureza.

BRINNELL HB

$$HB = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}; P(\text{kgf}) D, d(\text{mm})$$

**ROCKWELL (HR)****VICKERS (HV)**

$$HV = 1,89 \cdot \left(\frac{P}{d_1^2} \right); P(\text{kgf}) \text{ e } d_1(\text{mm})$$

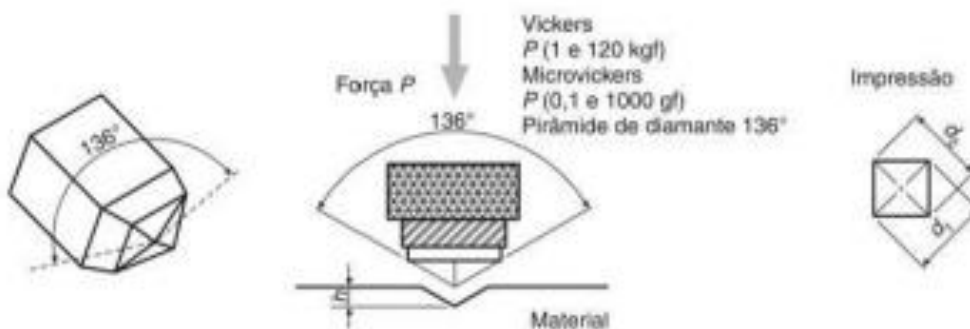


Figura 25 - Tipos de ensaios de dureza
Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012).

ANEXO B - Diagrama de Fases Fe-C.

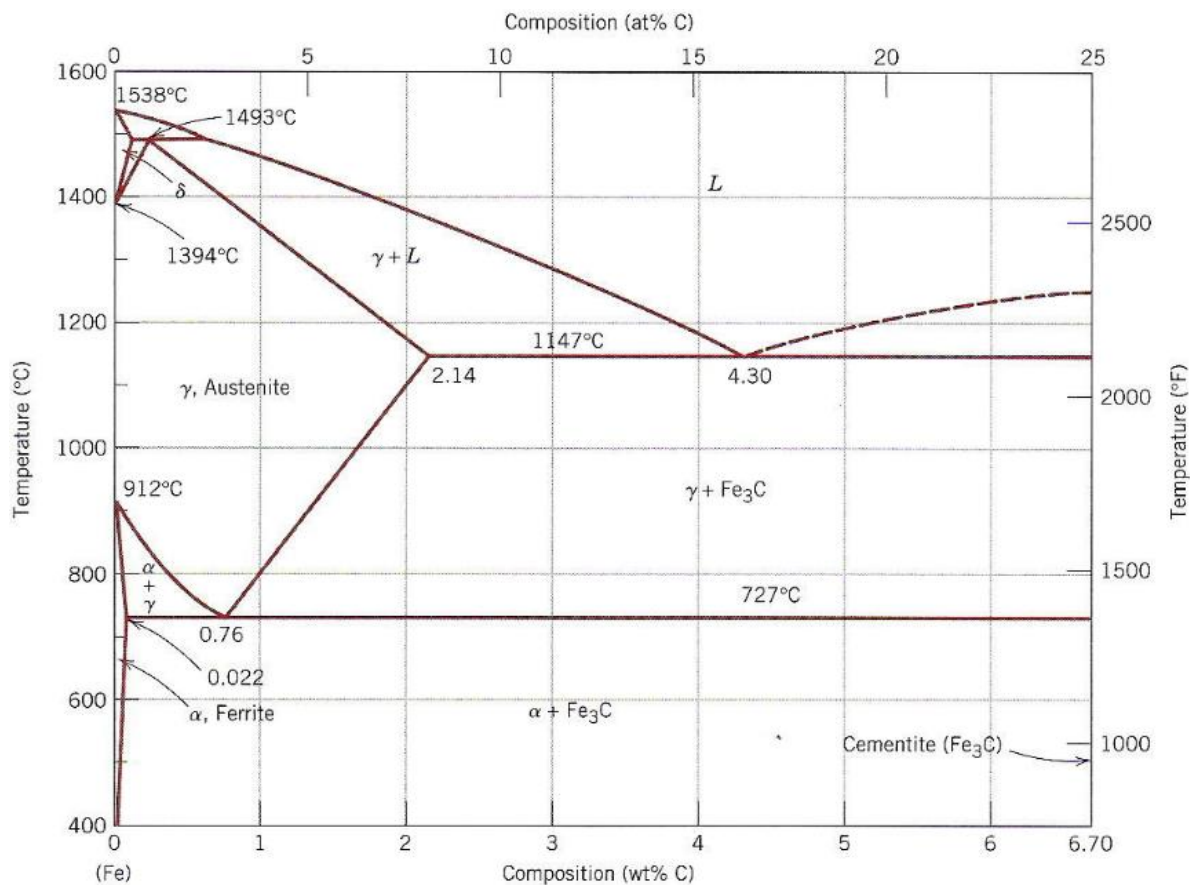


Figura 26 - Diagrama de Fases Fe-C
Fonte: Callister (2007).