



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

JOSÉ ROGÉRIO DE OLIVEIRA BEZERRA

**EFEITOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NA PROPRIEDADE DE DUREZA
DO AÇO SAE 4340 NA SOLDAGEM PELOS PROCESSOS FCAW E LASER -
UMA REVISÃO**

FORTALEZA
2018

JOSÉ ROGÉRIO DE OLIVEIRA BEZERRA

EFEITOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NA PROPRIEDADE DE DUREZA
DO AÇO SAE 4340 NA SOLDAGEM PELOS PROCESSOS FCAW E LASER -
UMA REVISÃO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Materiais do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Cariri como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Ceará.

Orientador: Professor Doutor Carlos Marley de Souza Júnior.

FORTALEZA
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B469e Bezerra, José Rogério de Oliveira.
Efeitos de tratamentos térmicos na propriedade de dureza do Aço SAE 4340 na soldagem pelos processos FCAW e laser : Uma revisão / José Rogério de Oliveira Bezerra. – 2018.
51 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Marley de Souza Júnior.
1. Aço SAE 4340. 2. Soldagem. 3. Tratamentos térmicos. 4. Dureza. 5. Tenacidade. I. Título.
CDD 669
-

JOSÉ ROGÉRIO DE OLIVEIRA BEZERRA

EFEITOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NA PROPRIEDADE DE DUREZA
DO AÇO SAE 4340 NA SOLDAGEM PELOS PROCESSOS FCAW E LASER -
UMA REVISÃO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Cariri como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Ceará.

Aprovado em, ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Marley de Souza Júnior (Orientador)
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Me. João Victor Barbosa Moura
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Engenheira Larissa Kerollaine Maia Gomes
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à Deus, que permitiu-me atravessar os desafios e dificuldades deste projeto com afinco e resiliência. À minha família, que representa a alicerce da minha formação por meio de valores irrefutáveis e ao meu pai in memoriam, que certamente, estaria muito feliz com esta conquista tão importante em minha vida.

Ao meu orientador, Professor Doutor Carlos Marley de Souza Júnior, pelo acolhimento, a paciência e o apoio na condução deste trabalho, o que foi de suma importância neste momento de dificuldades na continuidade de minha formação acadêmica após a minha transferência compulsória de Fortaleza, minha terra natal, para Juazeiro do Norte.

Aos meus amigos de UFC, em especial a Raylene Ribeiro, Renato Bezerra, João Paulo, Ângelo Leão, Paulo Victor, Bruno Fontenele, Felipe Pires, Gustavo Sabóia, enfim, a todos que dividiram comigo as longas horas a fio de estudos.

Aos meus colegas de profissão durante esta jornada, em especial o Renato Soares, Eduardo Gadelha, Maksuel Moraes, Vinícius Mesquita, Francisco Adailton, Bruno Hunka, Luís César, Lucas Monteiro, Carlos Fabiano, Clairvânia Nascimento, César Masopust e a todos que tive a honra de compartilhar conhecimentos e aprender novas habilidades que contribuíram para minha formação.

À todos os professores e servidores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pela paciência, compreensão e o repasse de conhecimentos específicos.

Aos demais professores e servidores do curso de Engenharia de Materiais da UFCA pela acolhida, em especial ao secretário Tarcito Theóphilo e à professora Doutora Caroline Vieira Gonçalves.

RESUMO

O aço SAE 4340 é um aço para beneficiamento com elevada temperabilidade, ligado ao cromo-níquel-molibdênio, utilizado na fabricação de diferentes componentes mecânicos, inclusive com seções espessas, quando se deseja uma combinação de resistência mecânica média e resistência à fratura. Também possui elevada resistência à fadiga. Este aço é utilizado em componentes para sistemas mecânicos, principalmente estruturais, onde necessita-se uma homogeneidade de dureza ao longo da seção transversal em pequenas ou grandes seções. Suas principais aplicações são: Eixos, engrenagens, engrenagens planetárias, colunas, mangas e cilindros. A razão deste trabalho, é mostrar os efeitos dos tratamentos térmicos na variação de dureza de peças submetidas aos processos de soldagem via arame tubular e laser. Concluiu-se que os tratamentos de pré e pós aquecimento e de revenimento, contribuíram para a melhoria de tenacidade, redução na dureza da ZF e do MB e no alívio de tensões local.

Palavras-chave: Aço SAE 4340, soldagem, tratamentos térmicos, dureza, tenacidade.

ABSTRACT

The steel SAE 4340 is a steel for beneficiation with high hardenability, connected to the chromium-nickel-molybdenum, used in the manufacturing of different mechanical components, including thick sections, when a combination of average mechanical resistance and fracture resistance is desired. It also has high resistance to fatigue. This steel is used in components for mechanical systems, primarily structural, where you need-if a homogeneity in hardness along the cross-section in large or small sections. Its main applications are: Shafts, gears, planetary gears, columns, sleeves, and cylinders. The reason of this work is to show the effects of heat treatments on the variation of the hardness of the parts subject to the processes of welding via flux-cored wire and laser. It was concluded that the treatments of pre and post heating and tempering, have contributed to the improvement of toughness, a reduction in the hardness of the ZF and MB, and at the strain relief location.

Keywords: Steel SAE 4340, welding, heat treatments, hardness, toughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagramas de transformação isotérmica dos aços (a) ao carbono com composição eutetóide e (b) baixa liga SAE 4340.....	19
Figura 2- Curvas de partição térmica. H1 e H2 energia de soldagem.....	22
Figura 3- Macroestrutura esquemática da seção transversal de uma junta soldada e sua relação com as temperaturas de pico. A-ZF, B-ZTA e C-MB.....	22
Figura 4.a - Processo de soldagem com arames tubulares com gás de proteção.....	24
Figura 4.b - Processo de soldagem com arames tubulares autoprotégidos.....	24
Figura 5- Equipamento para a soldagem com arame tubular.....	25
Figura 6- Modos de transferência metálica de acordo com a classificação do IIW	26
Figura 7 - Estação de processamento de materiais com laser a fibra	27
Figura 8 - Soldagem a laser por condução (a) (energia difusiva, pequena penetração e pequena vaporização), por penetração (b) (energia concentrada, alta penetração e alta vaporização) ..	28
Figura 9 - Ciclo térmico esquemático dos tratamentos de recozimento pleno e normalização superpostos à curva CCT de um aço.....	31
Figura 10 - Tensões residuais em função do tempo (a) e temperatura de recozimento para um determinado aço (b).....	33
Figura 11 - Mudanças nas propriedades mecânicas em função da temperatura de revenido para o aço SAE 4340 temperado em óleo.....	34
Figura 12 - Análise microestrutural por microscópio óptico (a) e MEV (b) do Metal de Base do aço 4340 (Conforme Recebido), reagente Nital 2%.....	35
Figura 13 - Representação esquemática dos parâmetros geométricos considerados para a análise dos cordões de solda.....	36
Figura 14 – Macrografias dos cordões de solda para soldagem normal (sem pré e pós aquecimento), amostra (a) Corrente de 250A e amostra (b) Réplica da Corrente de 250A, adaptado do autor.....	36
Figura 15 - Macrografias dos cordões de solda para soldagem com pré e pós-aquecimento, amostra (a) Corrente de 250A e Amostra (b) Réplica da Corrente de 250A, adaptado do autor.....	37

Figura 16 - (a) Área da zona fundida; (b) Área da zona da ZTA; (c) Área do metal de base, reagente Nital 5%.....	38
Figura 17 - (a) Área da zona fundida; (b) Área da zona da ZTA; (c) Área do metal de base, reagente Nital 5%	39
Figura 18 - Micrografias das seções transversais das soldas referentes ao aço 4340 com V= 50 mm/s e P= 1600 W, cordão sem penetração total.....	40
Figura 19 - Micrografias das amostras retiradas do cordão de solda com presença de porosidades no aço 4340 (A e B).....	40
Figura 20 - Microestrutura da ZTA do aço 4340 em MO (A) e MEV (B), reagente Nital 2%.....	41
Figura 21 - Aço 4340 na transição ZTA/ZF via MO (A), ZF via MEV (B), reagente Nital 2%.....	42
Figura 22 - Posições das medições de dureza realizadas após tratamento térmico de normalização.....	42
Figura 23 - Representação esquemática do procedimento e localização das impressões para a obtenção da distribuição da microdureza no aço SAE 4340 após a soldagem.....	43
Figura 24- Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados sem tratamento térmico (250A).....	44
Figura 25 - Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados na condição de pré e pós-aquecimento (250A).....	45
Figura 26 - Dureza HV no cordão de solda, adaptado do autor.....	45
Figura 27 - Dureza HV, após revenimento, adaptado do autor.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de corrida do aço 4340.	18
Tabela 2 - Especificação química do arame (%).	27
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de dureza (médias).	43
Tabela 4 - Resultados de dureza Vickers para o aço SAE 4340 (média de 3 pontos), adaptado do autor.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FCAW	Flux Cored Arc Welding - Soldagem com Arame Tubular
SAE	Society of Automotive Engineers - EUA
ZF	Zona Fundida
MB	Metal de Base
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
NBR	Norma Brasileira aprovada pela ABNT
HRC	Sistema de medição de dureza - Dureza Rockwell-C
IIW	Instituto Internacional de soldagem
ASME	American Society of Mechanical Engineers - Sociedade Norte-americana de Engenheiros Mecânicos
API	American Petroleum Institute
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZL	Zona de Ligação
GMAW	Gas Metal Arc Welding - Soldagem a Arco com Proteção Gasosa e Eletrodo Metálico
CCT	Diagrama de Resfriamento Contínuo
MO	Microscópio Óptico
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
HV	Dureza Vickers
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
A	Ampère
P	Potência
W	Watts
μm	Micrômetro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivo Geral	15
2.2. Objetivos Específicos	15
3. METODOLOGIA	16
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1. Aços.....	17
4.1.1. Classificação dos Aços.....	17
4.1.2. Efeito dos elementos de liga nas propriedades mecânicas.....	18
4.1.3. Microestrutura dos aços.....	20
4.2. Soldagem.....	21
4.2.1. Soldagem com Arame Tubular.....	23
4.2.2. Soldagem a Laser.....	27
4.3. Tratamentos Térmicos.....	30
4.3.1. Normalização.....	30
4.3.2. Recozimento de Alívio de Tensões.....	31
4.3.3. Revenimento.....	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1. Análise da Microestrutura.....	35
5.1.1. Soldagem com Arame Tubular.....	35
5.1.2. Soldagem a Laser.....	39
5.2. Ensaio de Microdureza.....	42
5.2.1. Peças com Soldagem em Arame Tubular.....	42
5.2.2. Peças com Soldagem a Laser.....	45

6. CONCLUSÕES	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

Um vasto número de diferentes processos utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas é abrangido pelo termo SOLDAGEM. Classicamente, a soldagem é considerada como um método de união, porém, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando a recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais.

Segundo Modenesi e Marques (2000), diferentes processos relacionados com os de soldagem são utilizados para o corte ou para o recobrimento de peças.

Aços de baixa liga são aqueles que possuem pequenas quantidades de elementos de liga adicionados com objetivos específicos, ou seja, aumentar a resistência mecânica, a tenacidade, a resistência à corrosão, a resistência à carepa, ou alterar a resposta ao tratamento térmico. Quase todo o fabricante de aços produz uma família de aços de baixa liga vendidos sob marcas comerciais conhecidas pelo mercado (FORTES, 2005).

Durante tratamento de pressão, fundição, soldagem, tratamento térmico, polimento, tratamento de corte e outros processos tecnológicos, podem surgir tensões internas na peça. Estas tensões se acomodam mutuamente no interior do corpo, sem a participação de pressão externa. Na maioria dos casos as tensões internas se conservam após o término do processo tecnológico. Por isso elas são denominadas tensões residuais (NOVIKOV, 1994).

Pode-se notar que a operação de soldagem causa alterações localizadas e bruscas de temperatura no material sendo soldado. Estas alterações, por sua vez, podem provocar mudanças estruturais e, conseqüentemente, nas propriedades do material. Em geral, estas alterações se dão na forma de uma degradação nas propriedades, o que pode ter importantes implicações na futura utilização da peça soldada. Existem duas maneiras de se enfrentar este problema. A primeira é desenvolver materiais que sejam menos sensíveis à soldagem, isto é, melhorar a "soldabilidade" dos materiais. A segunda é controlar a operação de soldagem (e, possivelmente, executar operações complementares) de modo a minimizar, ou remover, a degradação de propriedades da peça (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Neste trabalho, será realizada uma síntese dos resultados apresentados em dissertações que abordaram assuntos relacionados à propriedade de dureza do aço SAE 4340, bem como uma apreciação crítica desses resultados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência do tratamento térmico na dureza antes e após a soldagem pelos processos Arame Tubular e Laser do aço baixa liga SAE 4340.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho focarão no estudo do processo de soldagem Arame Tubular e Laser, na análise das fases formadas na ZAC (Zona Afetada pelo Calor), nas alterações das propriedades mecânicas da ZAC em relação às outras zonas da junta soldada e nas implicações decorrentes na dureza do aço quando submetido a tratamento térmico de pré-aquecimento, pós-aquecimento e revenimento.

3. METODOLOGIA

Para descrever os processos de soldagem e tratamentos térmicos elencados, foi optada a utilização de bibliografia adotada nas disciplinas presentes na matriz curricular do curso de Engenharia Metalúrgica da UFC, tais como Metalurgia Física das Ligas Ferrosas, Tecnologia da Soldagem e Tratamento Térmico de Ligas Metálicas.

Utilizando as palavras-chave: Propriedades mecânicas, tratamentos térmicos, pós-soldagem, microestrutura e aço 4340, foram realizadas buscas nos portais Periódicos CAPES, Google Acadêmico, Scielo e BDTD nos quais, foram coletados artigos diversos publicados com informações complementares dos assuntos abordados. Foram utilizados trabalhos publicados no período de 2004 a 2015, perfazendo 5 artigos, 3 dissertações, 2 projetos de graduação e 1 tese de doutorado.

Neste trabalho, foi executada a revisão, análise crítica e comparação de resultados das seguintes produções acadêmicas:

- a) Dissertação sobre a “Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma” (CARDOSO, A. S. M., 2010);
- b) Tratamento térmico e de superfície dos aços 4340 e 300M após soldagem a laser (CARDOSO, A. S. M., 2015);
- c) Dissertação sobre o “Estudo das Transformações Macro e Microestruturais das Juntas Soldadas do Aço SAE - 4340 Pelo Processo FCAW” (OLIVEIRA, F. F., 2015).

A busca supracitada ocorreu entre agosto e outubro de 2018. Em seguida, foi feita uma compilação das informações presentes nos referidos trabalhos através da análise e leitura dos mesmos visando destacar os trechos mais relevantes.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Aços

Aços são ligas de ferro-carbono com até aproximadamente 2,0% de carbono, podendo conter outros elementos de liga tais como Cr, Mn, Si, Mo, V, Nb, W, Ti, Ni e outros elementos (denominados de residuais, provenientes do processo de fabricação, tais como o P, S, Si. São utilizados na confecção de peças (engrenagens, eixos, parafusos, porcas, rolamentos, etc.), ferramentas (pás, martelos, serras, matrizes, punções, etc.) ou estruturas (pontes, edifícios, tanques) (COSTA E SILVA, A.L.; MEI, P.R, 1988).

Nos aços baixa liga, a soma das impurezas e outros elementos de liga vai de 1,5% a 5,0%, já nos aços média liga, a soma das impurezas e outros elementos de liga vai de 5,0% a 10,0%. Por fim, nos aços alta liga, a soma das impurezas e outros elementos de liga é superior a 10%.

O aço baixa liga SAE 4340 possui alta temperabilidade, o que confere uma usinabilidade média e baixa soldabilidade, sendo indicado para peças de grandes espessuras e que estejam sujeitas a elevados esforços, como virabrequins, bielas, engrenagens, parafusos de alta resistência, etc. Em virtude de suas propriedades este aço aplica-se bem a peças que devam manter a dureza nas temperaturas mediamente altas.

Segundo Cardoso (2010), os aços estruturais da série 43XX, entre eles o 4340, também vêm sendo empregados em aplicações que anteriormente eram restritas a aços mais nobres como os aços ferramentas.

4.1.1. Classificação dos aços

Segundo Costa e Silva e Mei (1988), a classificação dos aços não obedece a um único critério, existindo classificações quanto à composição química, processamento, microestrutura, propriedades ou mesmo aplicações a que se destinam.

Os aços podem ser classificados em grupos, em base de propriedades comuns:

a - composição, como aços-carbono e aços-liga

b - processo de acabamento, com aços laminados a quente ou aços laminados a frio

c - forma do produto acabado, como barras, chapas grossas, chapas finas, tiras, tubos ou perfis estruturais.

Os aços-liga, são frequentemente classificados de acordo com o principal ou principais elementos de liga presentes (CHIAVERINI, V, 2007).

Conforme a NBR NM 87/2000, o aço 4340, objeto de estudo deste trabalho, apresenta a composição química indicada na Tabela 1.

Tabela 1- Composição química de corrida do aço 4340

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
0,38 - 0,43	0,60 - 0,80	0,15 - 0,35	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30

Fonte: NBR NM 87/2000.

4.1.2. Efeito dos elementos de liga nas propriedades mecânicas

Segundo Chiaverini (2007), a introdução de elementos de liga nos aços-carbono é feita quando se deseja um ou diversos dos seguintes efeitos:

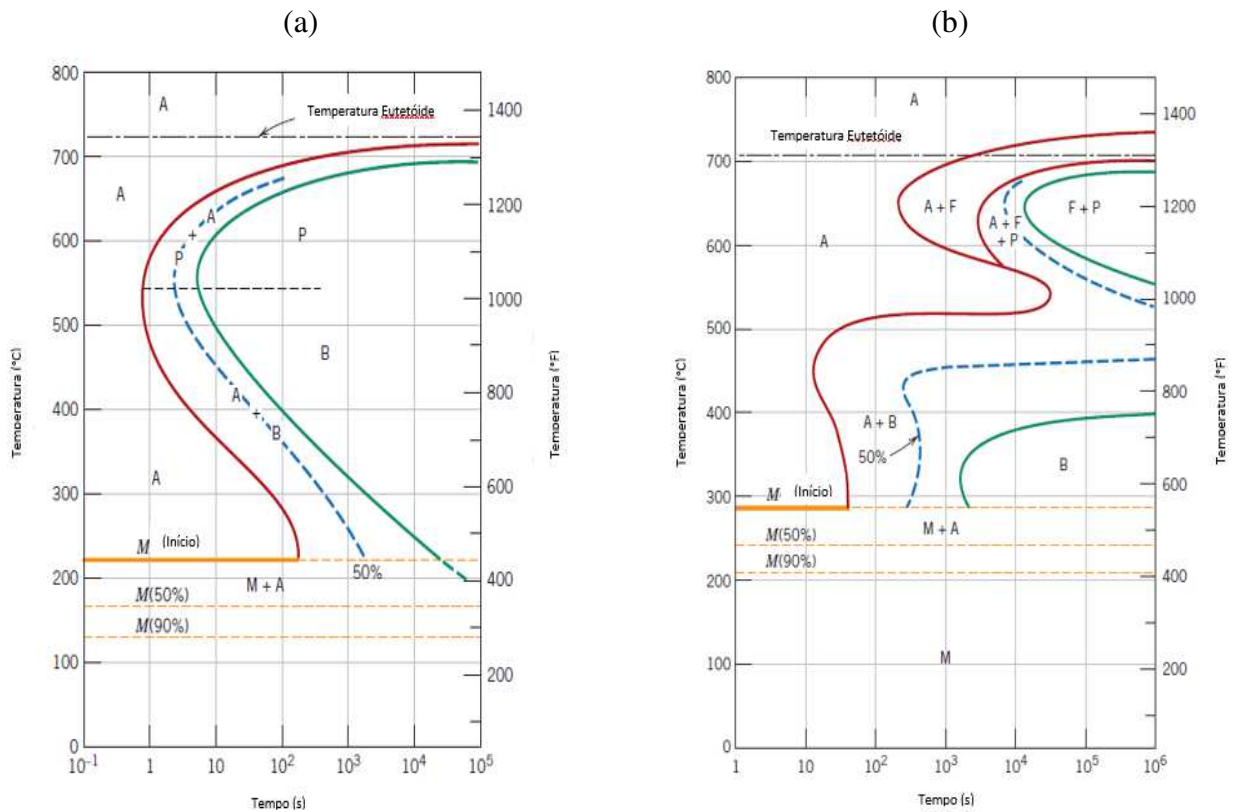
- a) aumentar a dureza e a resistência mecânica;
- b) conferir resistência através de toda a secção em peças de grandes dimensões;
- c) diminuir o peso (consequência do aumento da resistência), de modo a reduzir a inércia de uma parte em movimento ou reduzir a carga-morta em um veículo ou uma estrutura;
- d) conferir resistência à corrosão;
- e) aumentar a resistência ao calor;
- f) aumentar a resistência ao desgaste;
- g) aumentar a capacidade de corte;
- h) melhorar as propriedades elétricas e magnéticas.

Os três primeiros requisitos são alcançados porque os elementos de liga, como se viu, aumentam a resistência da ferrita e formam ainda outros carbonetos, além de Fe₃C, contribuindo para a melhora da resistência do aço, sobretudo em secções que, se se tratasse de aços-carbono comum, dificilmente teriam a resistência alterada.

A presença de elementos de liga, pode causar mudanças importantes nas posições e formas das curvas nos diagramas de transformação isotérmica. Estas mudanças incluem (1) a troca para tempos mais longos do cotovelo da transformação de austenita para perlita (e também o cotovelo da fase pró-eutetóide, se for o caso, e (2) a formação de um cotovelo independente para a transformação bainítica (Kwietniewki et al., 2014).

Estas alterações podem ser observadas através de comparações entre as Figuras 1.a e 1.b, que são os diagramas de transformação isotérmica para aços ao carbono com composição eutetóide e baixa liga SAE 4340, respectivamente. Neste aço é possível obter bainita por resfriamento contínuo.

Figura 1- Diagramas de transformação isotérmica dos aços (a) ao carbono com composição eutetóide e (b) baixa liga SAE 4340.



Fonte: Kwietniewki et al., 2014.

4.1.3. Microestrutura dos aços

Segundo Callister (2016) as principais estruturas de equilíbrio dos aços são:

- a) **Austenita:** Solução sólida de carbono em ferro gama. Somente é estável nas temperaturas superiores a 723 °C, desdobrando-se por reação eutetóide, a temperaturas inferiores, em ferrita e cementita. A austenita poderá aparecer à temperatura ambiente nos aços austeníticos, sendo estável nessa temperatura. É deformável como o ferro gama, pouco dura, apresenta grande resistência ao desgaste, é magnética, e é o constituinte mais denso dos aços e não é atacada por reagentes. Apresenta rede cristalográfica cúbica de face centrada.

- b) **Bainita:** Constituinte que se obtém na transformação isotérmica da austenita quando a temperatura do banho de resfriamento é de 250 a 500 °C. Apresenta 2 tipos de estrutura: a bainita superior formada entre 500 – 580 °C, composta por uma matriz ferrítica contendo carbonetos e a bainita inferior, formada entre 250 – 400 °C. Tem um aspecto similar a martensita e está constituída por agulhas alargadas de ferrita que contém placas finas de carboneto. Possui dureza de 40 a 60 HRC.

- c) **Cementita:** Constituinte que aparece em fundições e aços. É o carboneto de ferro, de fórmula Fe_3C , sendo frágil e muito duro. Apresenta dureza de mais de 840 Vickers, e é muito resistente ao cisalhamento. Em baixas temperaturas é ferromagnético e perde esta propriedade a 212 °C (ponto de Curie). Seu ponto de fusão está acima de 1950 °C. É termodinamicamente instável em temperaturas inferiores a 1200 °C.

- d) **Ferrita:** Este constituinte é formado por uma solução sólida de inserção de carbono em ferro alfa, sendo o constituinte mais mole dos aços, mas o mais tenaz e o mais maleável, sua resistência a tração é de 28 daN/mm² e alongamento de 35%. Sua solubilidade máxima é de 0,008 %. Pode também manter em solução de substituição a outros elementos tais como Si, P, Ni, Cr, Cu, que aparecem nos aços, bem como impurezas como elementos de ligação. A ferrita apresenta-se nos aços como constituinte e forma com a cementita parte da perlita.

- e) **Martensita:** Solução sólida, intersticial, supersaturada de carbono em ferro alfa. É o constituinte estrutural da têmpera dos aços e sua microestrutura apresenta-se na forma de agulhas cruzadas. Os átomos de ferro estão como na ferrita, nos vértices. Os átomos de carbono estão nas faces e nas arestas, apresenta por isso uma rede distorcida. Esta distorção da rede é a responsável pela dureza da martensita. Apresenta uma rede tetragonal. Suas características mecânicas são resistência a tração entre 170 – 250 kg/mm², dureza HRC entre 50 – 60 e alongamento de 0,5 %.
- f) **Perlita:** É formada por uma mistura eutetóide de duas fases, ferrita e cementita, formada a 723 °C quando a composição é de 0,8 %. Sua estrutura está constituída por lâminas alternadas de ferrita e cementita, sendo a espessura das lâminas de ferrita superior ao das de cementita. A perlita é mais dura e resistente que a ferrita, porém mais dúctil e maleável do que a cementita. Apresenta-se em forma laminar, reticular e globular.

4.2.Soldagem

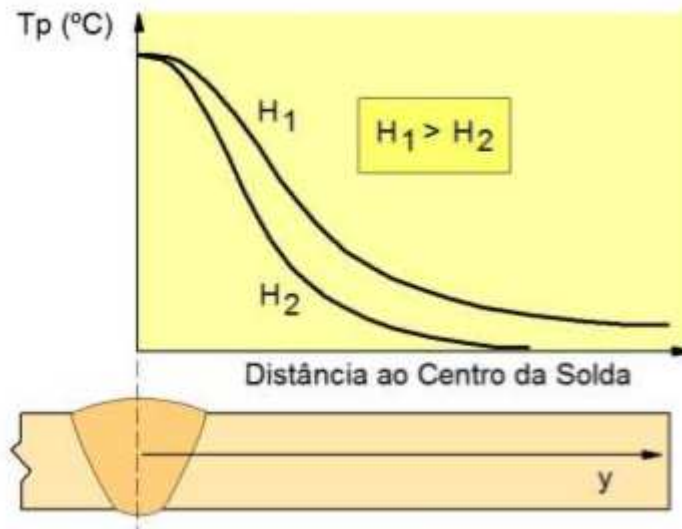
O controle das condições de soldagem é um item de fundamental importância para a garantia da qualidade das juntas soldadas de aços de alta resistência, não somente em termos de ocorrência de trincas por hidrogênio, quanto também em relação à obtenção de microestruturas adequadas para as propriedades mecânicas satisfatórias (JÚNIOR, A.S.L, 2014).

Temos como exemplo, um aço que atende ao grau API 5L X70Q e apresenta estrutura composta por martensita revenida, que por sua vez, sofre alterações estruturais durante o processo de soldagem, especialmente na zona termicamente afetada (ZTA) devido aos ciclos térmicos impostos por múltiplos passes (ARAÚJO, L. C. S, 2015).

Muitos processos de soldagem são utilizados tanto para a união de materiais quanto para a deposição de materiais sobre uma superfície visando a recuperação de uma peça desgastada ou formação de um recobrimento com característica específica. Deve-se ressaltar que não só metais são soldáveis e que é possível soldar metais sem fusão. Na soldagem, deve-se assegurar na junta soldada, a continuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas.

Segundo Modenesi, Marques e Santos (2012), durante a realização de uma solda, esta e as regiões adjacentes do metal de base são submetidas a ciclos térmicos cujas temperaturas de pico decrescem à medida que se afasta do eixo central da solda (Figura 2). Nestas condições, podem-se esperar alterações microestruturais, em relação ao material original, ao longo de sua seção transversal.

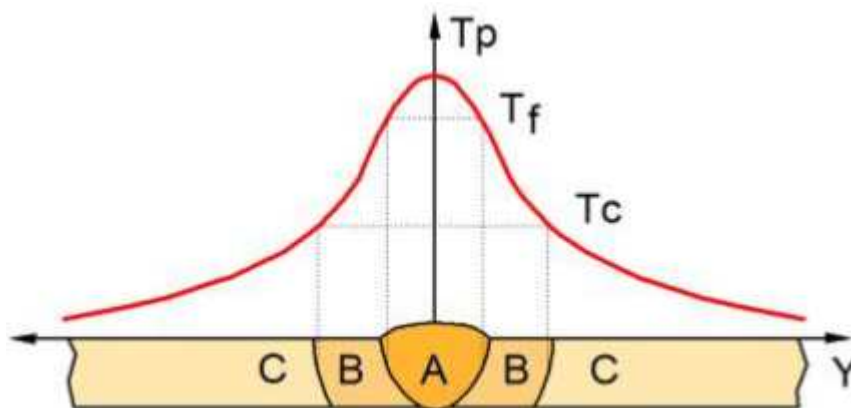
Figura 2- Curvas de partição térmica. H1 e H2 energia de soldagem.



Fonte: MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012.

Desta forma, em uma solda por fusão, pode-se arbitrariamente considerar a existência de três regiões básicas: Zona Fundida (ZF), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Metal de Base (MB). (Figura 3).

Figura 3- Macroestrutura esquemática da seção transversal de uma junta soldada e sua relação com as temperaturas de pico. A-ZF, B-ZTA e C-MB



Fonte: MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012.

a) Zona Fundida (ZF): região onde o material foi fundido durante a soldagem e caracterizado por temperaturas de pico superiores à sua temperatura de fusão.

b) Zona Termicamente Afetada (ZTA): região não fundida do metal de base, mas cuja microestrutura e/ou propriedades foram alteradas pelo ciclo térmico de soldagem. As temperaturas de pico são superiores a uma temperatura crítica (T_c) característica do metal de base.

c) Metal Base (MB): Regiões mais afastadas da solda que não foram alteradas pelo ciclo térmico. Suas temperaturas de pico são inferiores a T_c .

Para se evitar o problema da concentração de tensões na raiz da solda e garantir uma uniformidade da microestrutura próxima à região da solda, utilizam-se passes de alta energia de forma a aprofundar a mesma.

O problema com este processo é que a ZAC será maior, o tamanho de grão também crescerá e com isso, a peça perderá resistência e tenacidade.

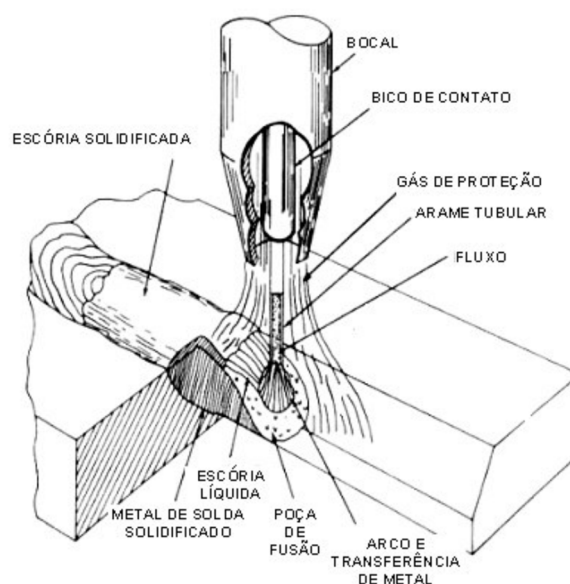
Além destes fatores, a tenacidade na região de crescimento de grão depende também dos elementos de liga, da rota (forma) de fabricação do aço, da taxa de resfriamento e da geometria do chanfro (FERNANDES, P. E. A., 2011).

Em soldagem, podemos utilizar o diagrama tempo-temperatura-transformação (TTT) como uma indicação da provável microestrutura obtida a temperatura ambiente a partir da temperatura de austenitização.

4.2.1 Soldagem com Arame Tubular

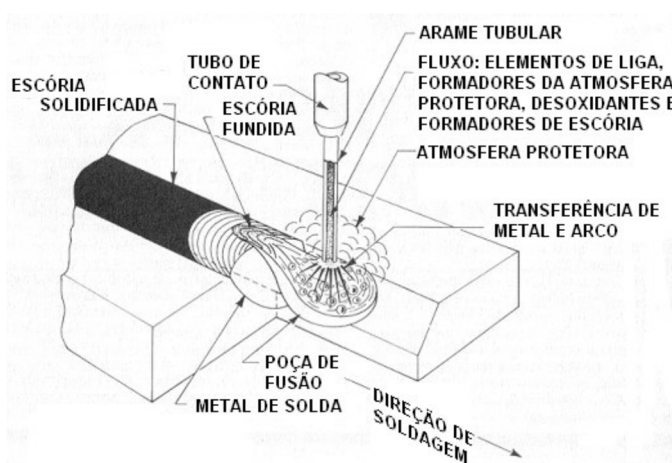
Segundo Bay (2001), a soldagem a arco com arame tubular, também conhecida pela sigla FCAW (Flux Cored Arc Welding), é um processo em que o calor para soldagem é produzido por um arco entre um arame tubular consumível e o metal de base, com proteção de um gás que é formado durante a combustão e decomposição do fluxo utilizado no arame tubular ou um gás de proteção auxiliar. Os processos de soldagem FCAW com gás de proteção e autoprotetido, são ilustrados nas Figuras 4.a e 4.b respectivamente.

Figura 4.a - Processo de soldagem com arames tubulares com gás de proteção.



Fonte: WELDING PROCESS, 2000.

Figura 4.b - Processo de soldagem com arames tubulares autoprotetidos.



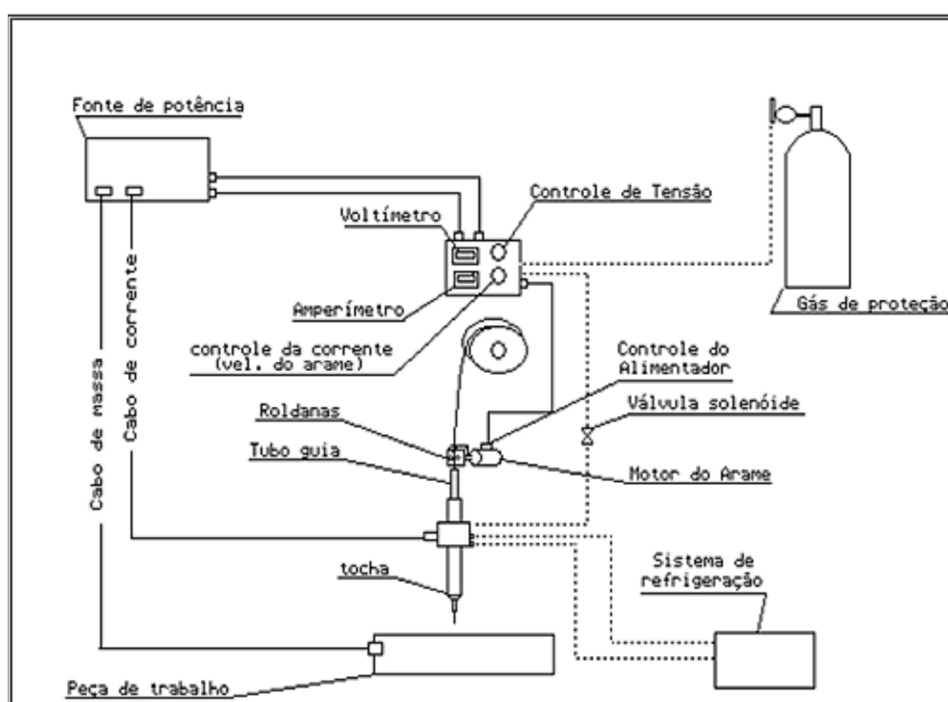
Fonte: WELDING PROCESS, 2000.

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009), o processo de soldagem FCAW geralmente é operado de forma semi-automática, mas em muitas situações, principalmente nas indústrias, podem ser automatizados através do uso de robôs, sendo o arame introduzido de forma contínua e com elevadas densidades de corrente no eletrodo, permitindo assim elevadas taxas de deposição e conseqüentemente maior produtividade.

Os equipamentos utilizados na soldagem FCAW, são praticamente os mesmos utilizados na soldagem GMAW, mas algumas adaptações devem ser realizadas no sistema de alimentação de arame, ou seja, sendo necessária a substituição das roldanas lisas (arames sólidos) por roldanas recartilhadas, para a correta utilização de arames tubulares (MACHADO, 2007).

O processo apresenta elevada produtividade, sendo que o equipamento básico para este processo consiste de tocha de soldagem, fonte de potência, fonte de gás e alimentador de arame, conforme a Figura 5.

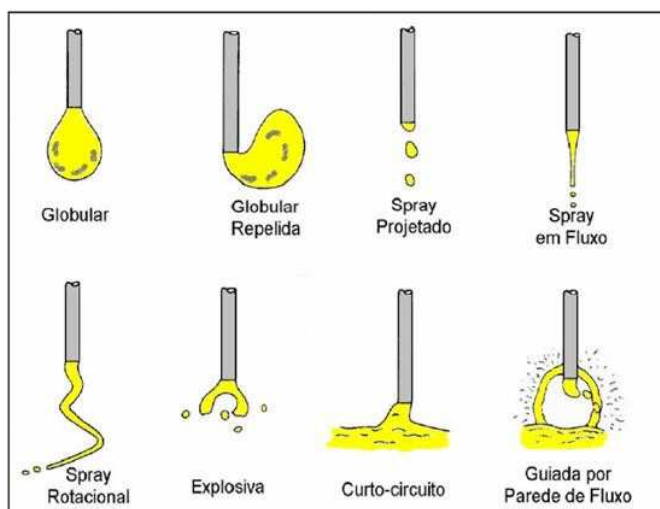
Figura 5- Equipamento para a soldagem com arame tubular.



Fonte: PIMENTEL, A. C.; ZANOTELLI, W, 2004.

De acordo com Fernandes (2011), no processo Arame Tubular, a fonte de soldagem deve ser do tipo tensão constante e corrente contínua e o modo de transferência metálica terá influência no processo de soldagem. Na figura 6, são mostrados os modos de transferência conforme a classificação do IIW.

Figura 6- Modos de transferência metálica de acordo com a classificação do IIV.



Fonte: FERNANDES, P. E. A, 2011.

Segundo Oliveira (2015), este o processo apresenta inúmeras vantagens como: ser utilizado na soldagem de todos os metais comerciais e ligas especiais; ter altas taxas de deposição; poder executar longos cordões de solda em função da alimentação contínua do arame consumível e ainda ser um processo de fácil automação, além de poder soldar em uma grande variação de ambiente, como por exemplo, ar livre quando se solda com o processo autoprotégido.

Já as principais desvantagens do processo FCAW são: soldagem em locais de difícil acesso, devido à necessidade do bocal da tocha de soldagem ficar próximo ao do metal base a ser soldado, geração de uma maior quantidade de fumos em relação ao processo GMAW, custo do arame tubular maior se comparado com o custo do arame do sólido, gera escória, necessitando assim de uma limpeza adequada para realização de soldas multipasses.

De acordo com o trabalho de Oliveira (2015), para realizar a confecção dos 8 CP's, destinados à microdureza Vickers após a soldagem a Arco Tubular com pré-aquecimento e pós-aquecimento, uma chapa de aço forjado SAE 4340 foi cortada com a ajuda de um maçarico oxi-corte, sendo que todas as peças foram submetidas ao tratamento térmico de normalização a uma temperatura de 910°C. Este procedimento foi adotado devido a altas temperaturas geradas na chapa durante o procedimento de corte. O objetivo desta normalização foi garantir a uniformidade microestrutural dos corpos de prova e evitar a presença de outras fases, como martensita e/ou bainita, que poderiam ter sido geradas durante o processo de corte devido à alta temperabilidade do aço SAE 4340.

Para a condição normal de soldagem a Arame Tubular, o consumível utilizado é o ASME SFA 5.29 (Especificação química conforme Tabela 2), no diâmetro de 1,2 mm, pois o mesmo apresenta propriedades mecânicas e especificações químicas compatíveis com a soldagem proposta. O gás de proteção é composto de 85% Argônio + 15% de CO₂, vazão de 13L/min e corrente de soldagem de 250A.

Tabela 2 - Especificação química do arame (%).

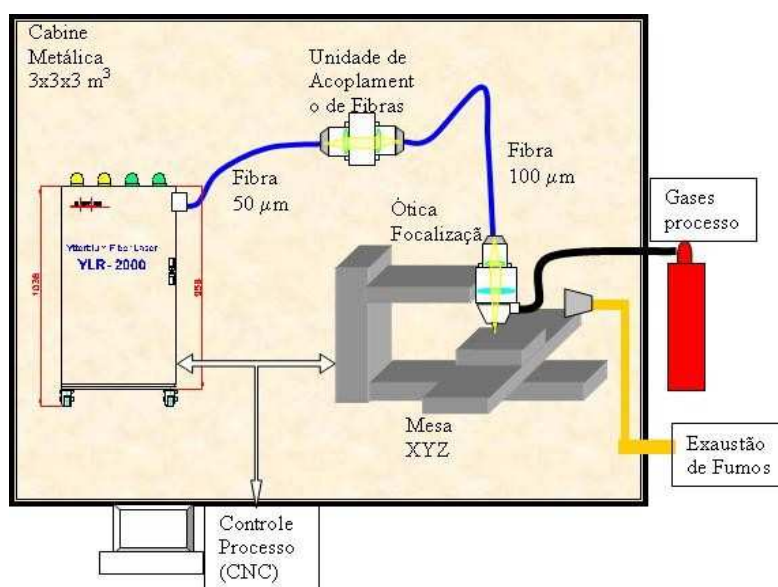
Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Ni (%)	Mo (%)
ASME SFA 5.29	0,05	0,50	1,50	1,65	0,10

Fonte: OLIVEIRA, F. F, 2015.

4.2.2. Soldagem a laser

De acordo com Lima (2008), a soldagem a laser é utilizada quando é essencial limitar as dimensões da zona afetada termicamente, reduzir a rugosidade da superfície soldada, eliminar efeitos mecânicos ou estabelecer rotinas de automatização. Existem dois tipos de soldagem a laser, a soldagem por condução e por penetração, no qual o material a ser soldado é ajustado no suporte, onde o feixe laser é focado, então o metal é aquecido até seu ponto de fusão e, em seguida resfriadas após a saída do feixe conforme exemplo da Figura 7.

Figura 7 - Estação de processamento de materiais com laser a fibra.



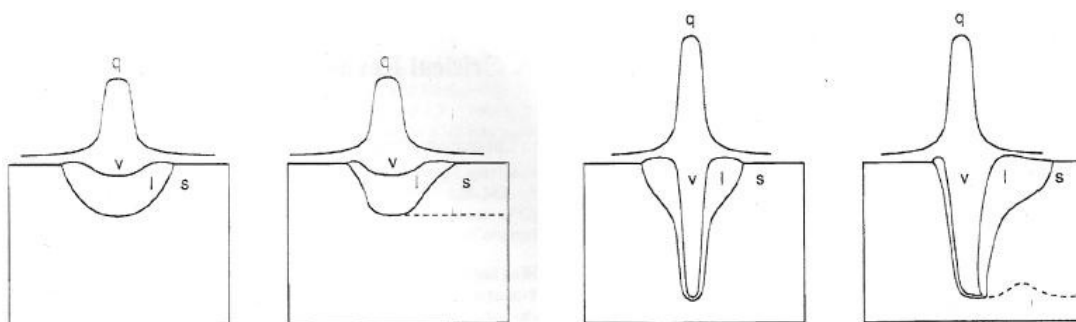
Fonte: OLIVEIRA, 2008.

Os lasers podem ser operados de duas maneiras, pulsado ou contínuo, pulsado pode liberar potências de pico muito elevadas em períodos curtos de tempo e são aplicados em operações de corte, já o sistema contínuo é preferido para soldagem, pois permitem cordões mais regulares e menos porosidades (LIMA, 2008).

Segundo Cardoso (2010), os parâmetros devem ser levados em conta na soldagem a laser, entre eles podemos destacar a velocidade de soldagem, a largura temporal do pulso, a frequência destes pulsos, a taxa de sobreposição (que depende dos 3 fatores anteriores, caso o laser seja pulsado), o gás de proteção, o fluxo do gás de proteção, o bocal de distribuição do gás, a distância do bocal até a superfície e a posição do foco em relação à superfície das amostras a serem soldadas, a intensidade do feixe, a potência do laser e a posição do foco. Lembramos que estes parâmetros deverão ser recalculados quando a espessura do material variar.

De acordo com Cardoso (2010), a soldagem a laser é um método de união que usa energia proveniente de um feixe de luz colimada, eficiência típica de $0,35 \text{ kJ.mm}^{-1}$, e que inevitavelmente envolve fusão e solidificação, com intensidade de 10^4 a 10^9 W.cm^{-2} e largura temporal de pulsos variando de 10^{-4} e 1 s , podendo ocorrer por condução ou penetração. A soldagem por condução pode ser transmitida por emissão contínua ou pulsada com atmosfera de proteção e intensidade relativamente baixa, os problemas de soldagem são normalmente controlados através do aporte térmico conforme a Figura 8.

Figura 8 - Soldagem a laser por condução (a) (energia difusiva, pequena penetração e pequena vaporização), por penetração (b) (energia concentrada, alta penetração e alta vaporização).



Fonte: LIMA,2008.

De acordo com Lima (2008), a soldagem por penetração utiliza maior potência, pois envolve a vaporização do material de base.

As vantagens da soldagem a laser segundo Siqueira (2007) são:

- a) A soldagem a laser não contamina a solda;
- b) A Zona Afetada Termicamente (ZTA) é estreita;
- c) São introduzidas mínimas tensões térmicas, resultando na diminuição de distorções do reticulado e bons resultados mecânicos;
- d) Elevada flexibilidade no caso de manipulação de feixes por meio de fibras ópticas;
- e) Usando-se divisores de feixe, o feixe pode ser compartilhado por diferentes estações de trabalho, aumentando a flexibilidade de sua utilização;
- f) A velocidade de soldagem a laser pode ser da ordem de vários metros por minuto, dependendo de: potência disponível, tamanho do cordão, tipo de material e espessura a ser soldada;
- g) É uma técnica apropriada para soldagem com penetração total em um único passe;
- h) Não possui contato entre o laser e o material, portanto não existe desgaste de eletrodos e bocais;
- i) É possível unir diferentes espessuras de chapas e diferentes materiais, pois a fusão é concentrada durante a soldagem.

Segundo Siqueira (2007), as desvantagens da soldagem a laser são:

- a) Os requisitos de tolerância da junta são mais elevados;
- b) Problemas com refletividade em alguns materiais;
- c) Limitação de espessura do material a ser soldado pela potência do equipamento;
- d) O investimento inicial do equipamento é relativamente alto, porém pode ser justificado pela alta produtividade ou por melhorias na qualidade da solda;
- e) A eficiência energética do laser é baixa, tendo como exemplo o laser à fibra que possui eficiência em torno de 20%;
- f) Altas intensidades dos lasers podem provocar danos aos olhos e queimaduras na pele;
- g) É necessário um ambiente protegido e isolado para soldagem, como em qualquer solda por arco.

Segundo Cardoso, A. S. M. (2015), foram utilizadas chapas laminadas do aço SAE 4340 com dimensões aproximadas de 1,15 x 0,5 metros e espessura de 4,13 mm. As chapas foram submetidas ao tratamento térmico de normalização a 950°C, durante 2 horas e resfriadas ao forno a vácuo com atmosfera controlada pertencente até a temperatura ambiente, tendo como objetivo eliminar os defeitos da laminação.

O laser à fibra utilizado tem potência média de 2 kW, é dotado de uma fibra de saída com 50 µm de diâmetro e 5 metros de extensão. Foram utilizadas soldas por penetração autógenas nas chapas cortadas nas dimensões 280X180mm e retificadas em aproximadamente 3 mm para ambos os materiais. Os parâmetros de soldagem aplicados foram: potência de 1600 watts, velocidade de soldagem de 50 mm/s e fluxo de Argônio de 30 l/min. O foco foi na superfície das chapas com inclinação da cabeça de 5° e distância focal de 160,5 mm com a lente em 160 mm. O nitrogênio foi utilizado como gás de proteção da cabeça do dispositivo.

De acordo com Cardoso (2010), visando reduzir as tensões geradas na etapa de soldagem foi realizado o tratamento de revenimento, que ocorreu em um forno elétrico (mufla), a 400°C por 2 horas.

4.3. Tratamentos Térmicos

Segundo Costa e Silva e Mei (2010), os tratamentos térmicos são denominados operações de aquecimento e resfriamento controlados, que visam afetar as características de aços e ligas especiais. Englobam uma das mais amplas faixas de temperaturas dentre os processos industriais, variando desde o tratamento subzero (temperaturas abaixo de 0°C) para estabilização, até a austenitização de alguns tipos de aços rápidos a 1280°C. Além disso, diversas taxas de resfriamento são empregadas, visando a permitir a obtenção de exata estrutura desejada.

Abordaremos as principais características dos tratamentos térmicos de normalização, recozimento de alívio de tensões e revenimento, objetos de estudo deste trabalho.

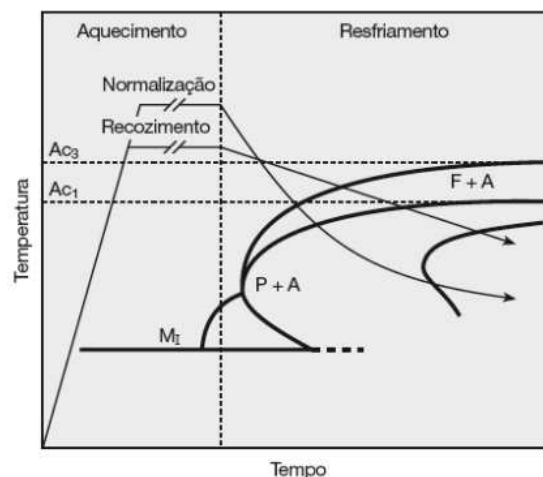
4.3.1. Normalização

Segundo Colpaert (2008), a normalização é o tratamento térmico indicado para obter uma estrutura homogênea e refinada e melhorar a resistência e a tenacidade dos aços submetidos a trabalho a quente convencional, que normalmente, têm ao fim da conformação, estruturas pouco homogêneas e com tamanho de grão grosseiro.

De acordo com o trabalho de Oliveira (2015), para realizar a confecção dos 8 CP's, destinados à microdureza Vickers, uma chapa de aço forjado SAE 4340 foi cortada com a ajuda de um maçarico oxi-corte, sendo que todas as peças foram submetidas ao tratamento térmico de normalização a uma temperatura de 910°C. Este procedimento foi adotado devido a altas temperaturas geradas na chapa durante o procedimento de corte. O objetivo desta normalização foi garantir a uniformidade microestrutural dos corpos de prova e evitar a presença de outras fases, como martensita e/ou bainita, que poderiam ter sido geradas durante o processo de corte devido à alta temperabilidade do aço SAE 4340.

O ciclo térmico de normalização consiste no aquecimento de austenitização completa, seguido de resfriamento ao ar, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Ciclo térmico esquemático dos tratamentos de recozimento pleno e normalização superpostos à curva CCT de um aço.



Fonte: COLPAERT. H, 2008.

- Recozimento Pleno: Aquece até 50°C acima de A3 e resfria-se em forno para obter ferrita + perlita grosseira.
- Normalização: Aquece um pouco além de 50°C acima de A3 e resfria-se ao ar para obter ferrita + perlita fina.

4.3.2 Recozimento de alívio de tensões

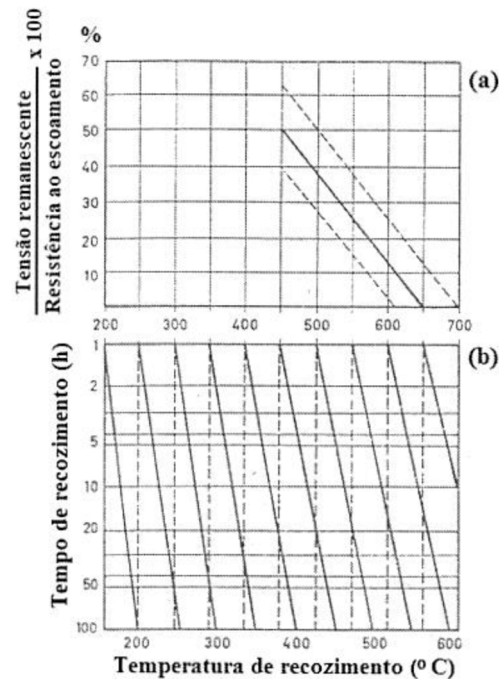
Segundo Kwietniewski et al. (2014), nos processos térmicos e mecânicos, são produzidas tensões residuais que podem ser prejudiciais ao desempenho de peças e componentes de aço. As tensões residuais surgem devido:

(a) Fatores térmicos, isto é, tensões térmicas causadas por gradientes de temperatura ao longo da seção transversal de uma peça durante o aquecimento ou resfriamento; (b) Fatores mecânicos, quando existem gradientes de deformação plástica, durante o processamento a frio do material; (c) Fatores metalúrgicos, isto é, quando transformações de fase produzem expansão/contração não uniforme ao longo da seção da peça, sendo que existem dois tipos de tensões residuais, isto é, trativas e compressivas, sendo que as tensões trativas são prejudiciais, pois somam-se às tensões de serviço e tendem a abrir trincas.

Entendemos que não se deve confundir alívio de tensões com revenido. O primeiro, fundamentalmente, não busca alterações nas propriedades mecânicas do material, mas sim uma redução nas tensões residuais. Já o revenido tem como objetivo garantir uma mínima tenacidade ao aço temperado, à custa de reduções de dureza.

De acordo com Kwietniewski et al. (2014), para um determinado aço, a resposta ao recozimento para alívio de tensões pode ser representada na forma de curvas. Para demonstrar o uso destas curvas, observa-se na Figura 10.a que um recozimento por 1 hora a 450°C resulta em aproximadamente 50% de alívio de tensões. Se o mesmo nível de alívio é desejado com o emprego de uma temperatura de recozimento de 400°C, o tempo necessário é obtido através da construção de uma linha vertical a partir do ponto 1h/450°C até que a curva inclinada correspondente seja intersectada, o que resulta em um tempo de 20h de recozimento, Figura 10.b.

Figura 10 - Tensões residuais em função do tempo (a) e temperatura de recozimento para um determinado aço (b).



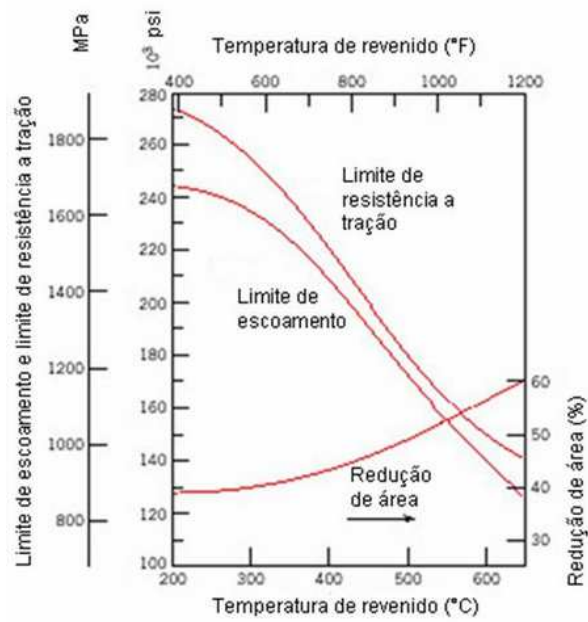
Fonte: Kwietniewski et al., 2014.

4.3.3 Revenimento

Virtualmente, todos os aços que foram endurecidos por têmpera são submetidos a um tratamento térmico subcrítico, conhecido como revenido ou revenimento. O revenido aumenta a tenacidade da microestrutura martensítica como temperada, mas reduz a dureza e a resistência mecânica. A estrutura resultante é conhecida como martensita revenida que na verdade não contém martensita. De fato, a martensita revenida é composta por partículas finas de carbonetos em uma matriz ferrítica (Kwietniewski et al., 2014).

A Figura 11 mostra as mudanças nas propriedades mecânicas que ocorrem quando um aço SAE 4340, temperado em óleo, é revenido a temperaturas acima de 200°C. As resistências ao escoamento e à tração diminuem continuamente, enquanto que o alongamento e a redução de área aumentam com o aumento da temperatura de revenido.

Figura 11 - Mudanças nas propriedades mecânicas em função da temperatura de revenido para o aço SAE 4340 temperado em óleo.



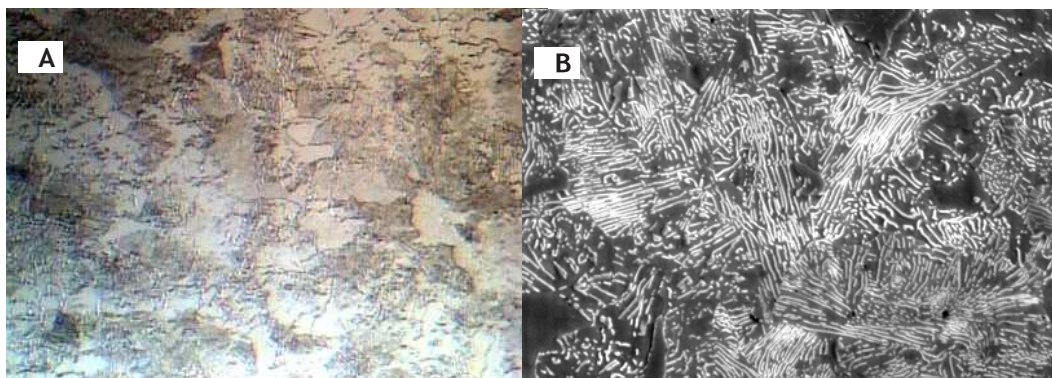
Fonte: Kwietniewski et al., 2014.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise da Microestrutura

De acordo com Cardoso (2015), na Figura 12, podemos visualizar a microestrutura de MB do aço 4340, em que uma matriz típica de aços médio carbono, possui a presença de perlita e ferrita.

Figura 12 - Análise microestrutural por microscópio óptico (a) e MEV (b) do Metal de Base do aço 4340 (Conforme Recebido), reagente Nital 2%.



(A) Escala 20 μm ; (B) Escala 2 μm , Signal A=SE1, EHT=20.00kV, Mag=5.00KX, WD=15mm

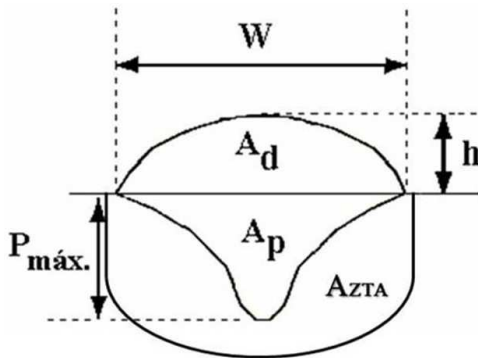
Fonte: CARDOSO, A. S. M, 2015.

5.1.1 Soldagem com Arame Tubular

Segundo Oliveira (2015), o exame macroestrutural foi realizado anteriormente à caracterização microestrutural das regiões da solda.

A Figura 13, mostra de forma esquemática, os parâmetros geométricos e as regiões analisadas do cordão de solda. Já na Figura 14 e 15, estão apresentadas as macrografias das regiões soldadas do aço SAE 4340, e os seus respectivos valores (dimensões e áreas) para as condições de soldagem normal e com pré e pós aquecimento a 250A.

Figura 13 - Representação esquemática dos parâmetros geométricos considerados para a análise dos cordões de solda.



W = Largura (mm)

h = Reforço (mm)

$P_{máx}$ = Penetração máxima (mm)

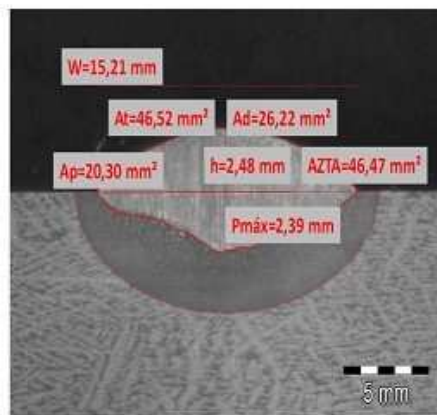
A_d = Área depositada (mm^2)

A_p = Área de penetração (mm^2)

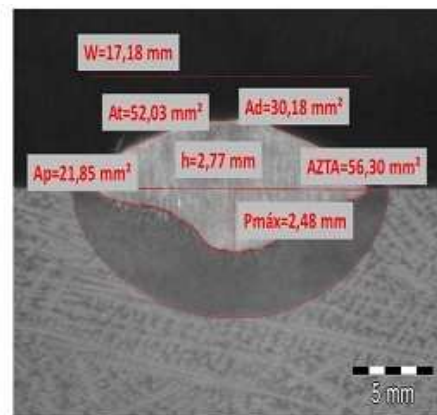
A_{zta} = Área da zona termicamente afetada (mm^2)

Fonte: OLIVEIRA, F. F, 2015.

Figura 14 – Macrografias dos cordões de solda para soldagem normal (sem pré e pós aquecimento), amostra (a) Corrente de 250A e amostra (b) Réplica da Corrente de 250A.



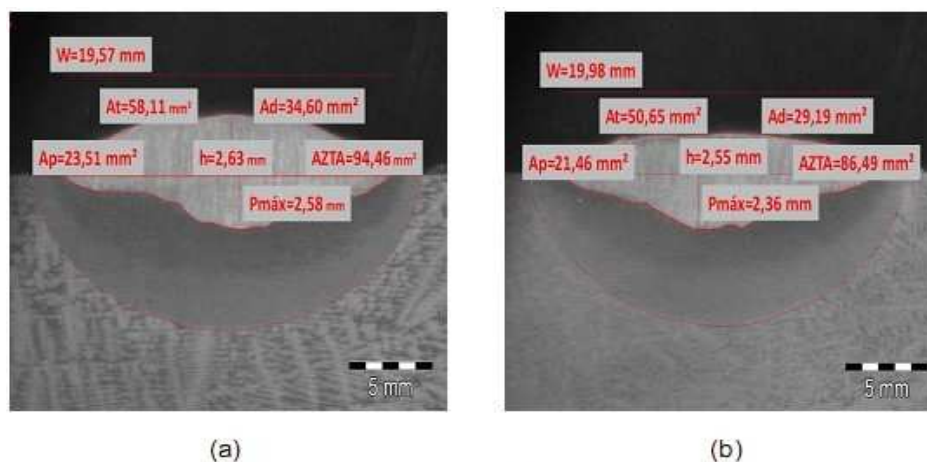
(a)



(b)

Fonte: adaptado de Oliveira (2015).

Figura 15 - Macrografias dos cordões de solda para soldagem com pré e pós-aquecimento, amostra (a) Corrente de 250A e Amostra (b) Réplica da Corrente de 250A. adaptado do autor.



Fonte: adaptado de Oliveira (2015).

A microestrutura mais desejada é a ferrita acicular, por ter tamanho de grão pequeno (0,1 a 1 micron) e contornos de alto ângulo. Tais características propiciam excelente combinação de resistência e tenacidade (ASSUMPCÃO, G. A, 2006). Salientando também que a alta densidade de discordâncias da ferrita acicular, dificulta a propagação de trincas (MAROUÇO, E. S, 2013).

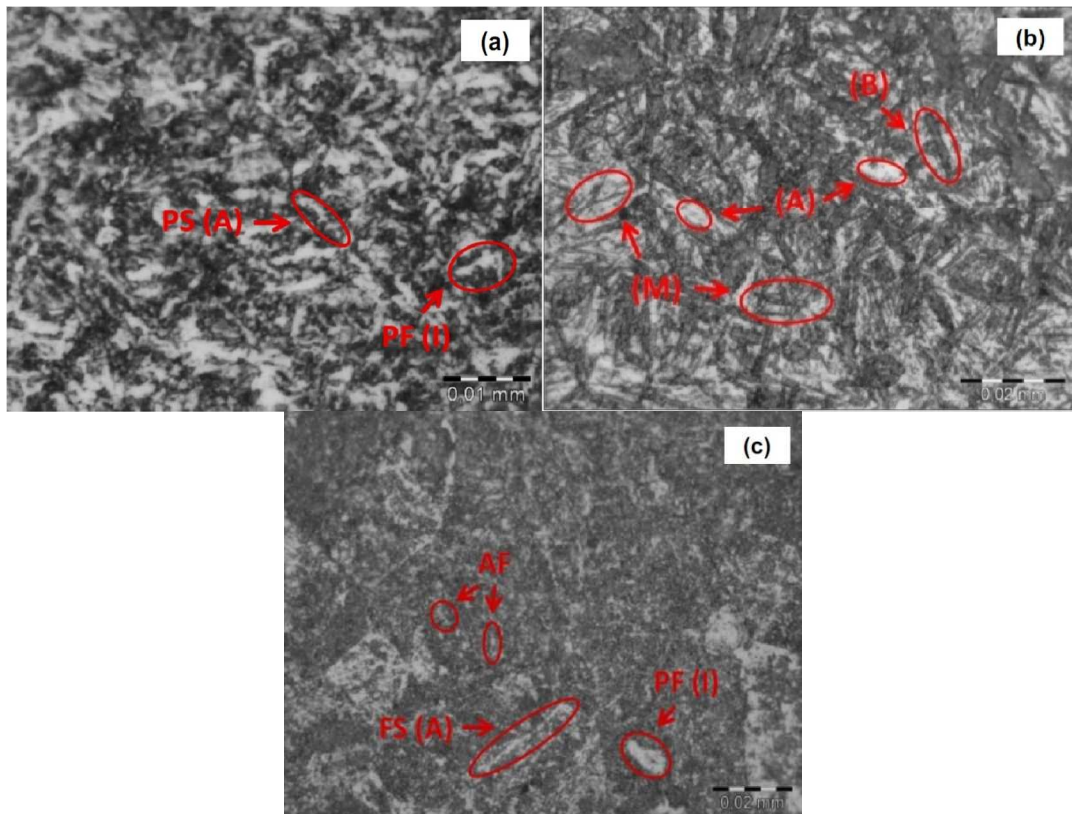
As micrografias mostradas no trabalho de Oliveira (2015), apresentam uma baixa nitidez, o que causou certa dificuldade na identificação das microestruturas. A situação abaixo confirma a predominância do microconstituente metaestável martensita, o qual é extremamente duro e frágil.

Na ZF (Figura 16.a), há formações de ferrita poligonal intergranular (PF) (I) e ferrita de segunda fase alinhada FS (A) e também a perlita (P) parte mais escura.

Para a Figura 16.b, na região da ZTA, observa-se a formação de uma estrutura predominante de martensita (M) com traços de formação de bainita (B) e fundo branco representado por uma parte da austenita retida (A), o que explica o aumento da dureza obtida nesta região.

Já na figura 16.c, a região do MB, apresenta a formação de grãos mais finos de ferrita de segunda fase alinhada (FS) (A) e ferrita acicular (AF), com traços de ferrita poligonal intergranular (PF) (I) e a parte mais escura perlita (P).

Figura 16 - (a) Área da zona fundida; (b) Área da zona da ZTA; (c) Área do metal de base, reagente Nital 5%.



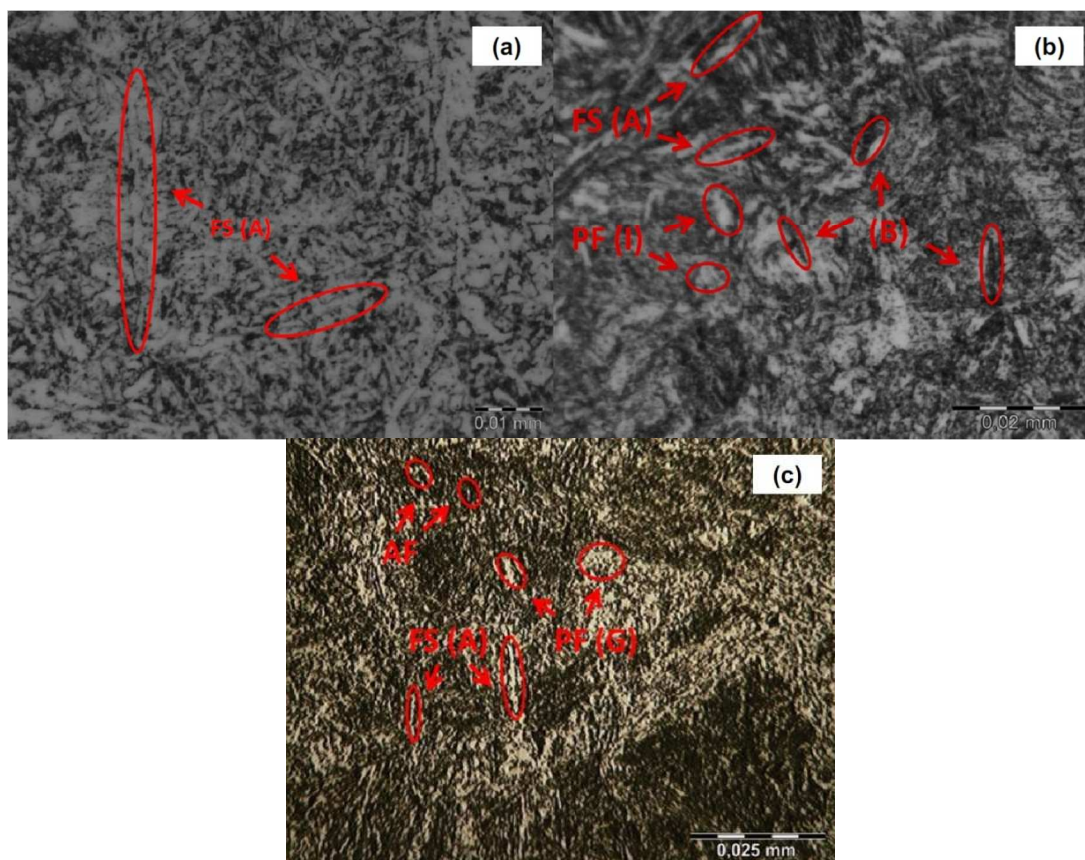
Fonte: OLIVEIRA, F. F, 2015.

Já para a condição de soldagem a 250A com pré e pós-aquecimento de 350°C (1h) e 550 (3h), respectivamente, na região da ZF (Figura 17.a), as microestruturas predominantes são de ferrita com segunda fase alinhada FS (A), ou ferrita de Windmanstatten e perlita (P), região mais escura (preta).

Já na Figura 17.b, região da ZTA, observa-se a formação de uma estrutura predominante de ferrita de segunda fase alinhada (FS) (A) e ferrita poligonal intergranular (PF) (I), com traços de formação de bainita (B).

Na região do MB, observa-se a formação grãos mais finos de ferrita com segunda fase alinhada (FS) (A) e ferrita acicular (AF), com traços de ferrita poligonal intergranular (PF) (I) e região mais escura (preta) formada pela perlita (P) (Figura 17.c).

Figura 17 - (a) Área da zona fundida; (b) Área da zona da ZTA; (c) Área do metal de base, reagente Nital 5%

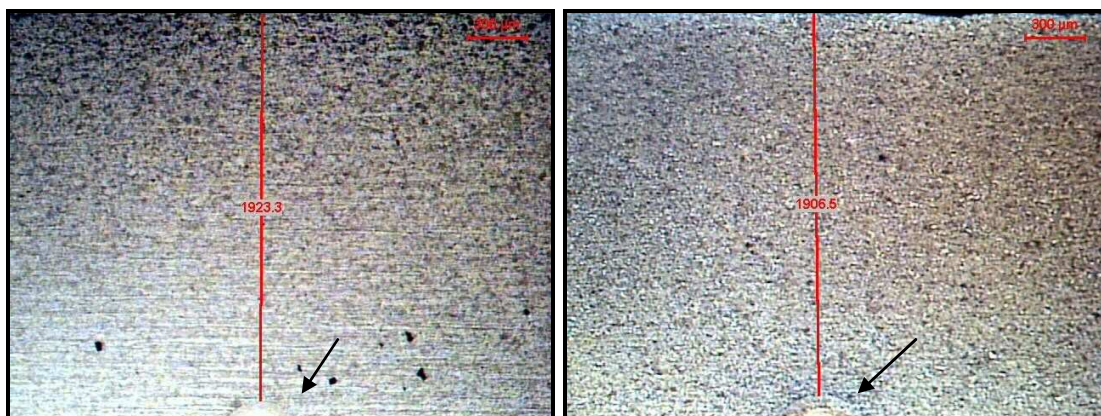


Fonte: OLIVEIRA, F. F, 2015.

5.1.2 Soldagem a Laser

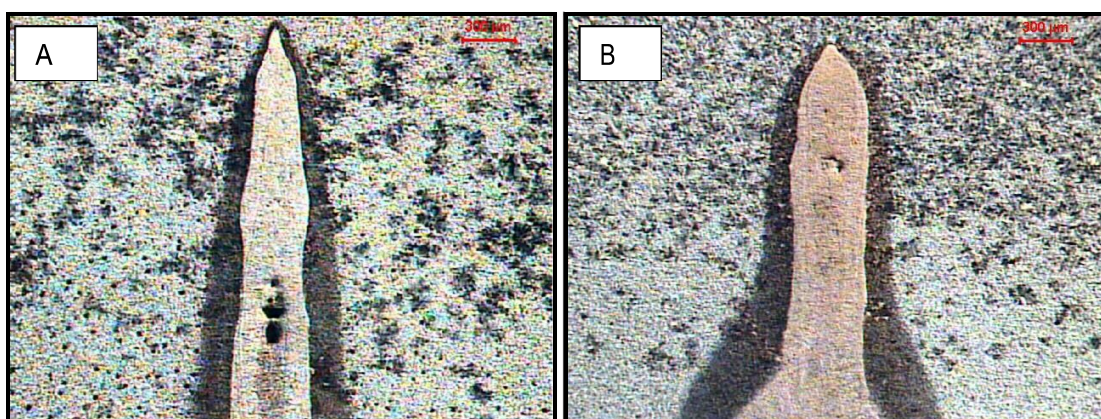
De acordo com Cardoso (2010), nas micrografias obtidas da seção transversal da solda, após selecionada a escala, foi possível calcular a distância entre a superfície do material de base e o topo da solda. Para realizar as análises da qualidade das soldas, foram obtidas micrografias das seções transversais dos cordões de solda. Na Figura 18, é possível constatar que a raiz do cordão não alcança a espessura da amostra. Já na Figura 19, a presença de defeitos, tais como porosidades nos cordões de solda, era esperada, pois os parâmetros escolhidos não foram os ideais. As porosidades grosseiras nos centros dos cordões, são originárias do desabamento do chamado “*keyhole*” que é uma cavidade de vapor ao redor do metal líquido, na qual se tem o equilíbrio entre densidade, viscosidade e pressão hidrostática, permitindo alta razão de aspecto (relação entre comprimento e largura do cordão) e a seção transversal da solda tem formato em “V” (LIMA,2008). Já as porosidades mais finas e dispersas no cordão de solda, advêm da desgaseificação do material de base fundido além de contaminações superficiais (CARVALHO,2009).

Figura 18 - Micrografias das seções transversais das soldas referentes ao aço 4340 com $V=50$ mm/s e $P=1600$ W, cordão sem penetração total.



Fonte: CARDOSO, 2010.

Figura 19 - Micrografias das amostras retiradas do cordão de solda com presença de porosidades no aço 4340 (A e B).

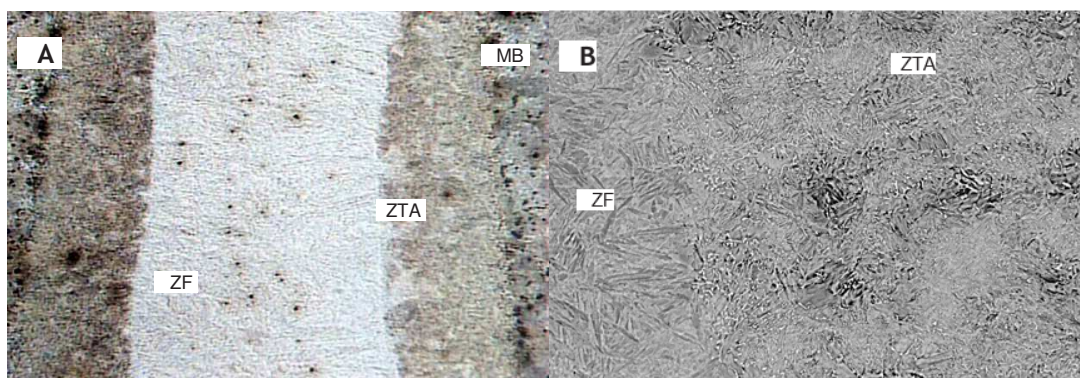


Fonte: CARDOSO, 2010.

Segundo Cardoso (2015), no cordão de solda do aço 4340 mostrado na Figura 20, observa-se a ZF, na qual encontramos uma microestrutura composta basicamente de martensita com presença de ferrita e austenita. A região fundida é aquela na qual a temperatura atingida pela exposição ao laser supera a temperatura liquidus do material e inicia-se a fusão, com posterior solidificação na forma de austenita e resfriamento brusco levando às transformações, no qual teremos a matriz composta principalmente por martensita. Na ZTA encontramos duas regiões distintas: austenitizada e aquecida abaixo da temperatura de austenitização. Na região onde ocorre a austenitização, após o resfriamento, observa-se a predominância de matriz bifásica (martensita e bainita).

Na região de transição ZTA/MB, encontra-se a decomposição parcial das fases presentes em subprodutos tais como carbonetos e ferrita. A presença de martensita, é responsável pela alta dureza e fragilidade oriundas do resfriamento rápido.

Figura 20 - Microestrutura da ZTA do aço 4340 em MO (A) e MEV (B), reagente Nital 2%.

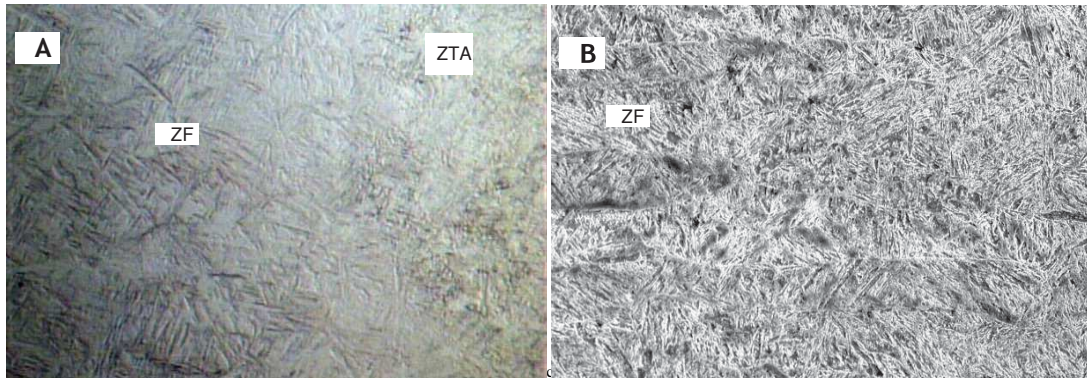


(A) Escala 100 μm ; (B) Escala 10 μm , Signal A=QBSD, EHT=20.00kV, Mag=2.00 K X, WD=15 mm

Fonte: CARDOSO, A. S. M, 2015.

Na Figura 21, observa-se a microestrutura da ZF do cordão de solda, com predominância de martensita, verifica-se também a formação dendrítica que mostra o processo de transferência de calor e solidificação, após a passagem do feixe de laser. Após caracterização do material soldado, foi estudado o aço após tratamento térmico de revenimento, no qual em análise visual, pode-se observar o crescimento de grãos. Na ZF foram vistas as formações das dendritas equiaxiais, saindo da transição ZTA/ZF e se direcionando até o meio do cordão, já as dendritas colunares foram encontradas no topo do cordão de solda, mostrando o processo de solidificação e possível processo de segregação de elementos químicos.

Figura 21 - Aço 4340 na transição ZTA/ZF via MO (A), ZF via MEV (B), reagente Nital 2% .



(A) Escala 20 μm ; (B) Escala 20 μm ; (B) Escala 10 μm , Signal A=SE1, EHT=20.00kV, Mag=1.00 K X, WD=15 mm

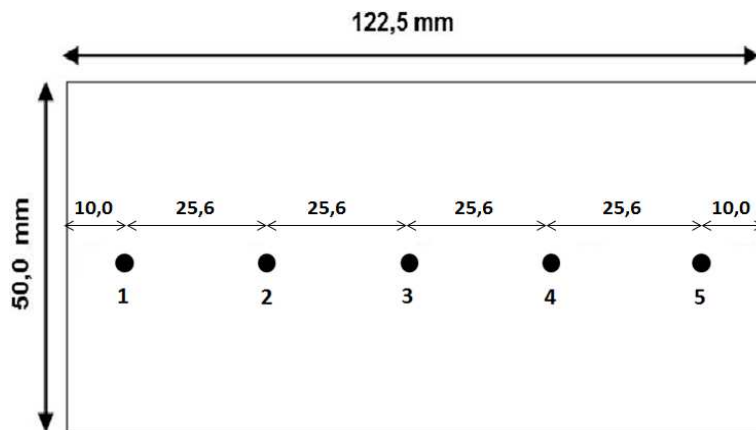
Fonte: CARDOSO, A. S. M, 2015.

5.2 Ensaio de Microdureza

5.2.1 Peças com Soldagem em Arame Tubular

Segundo o trabalho de Oliveira (2015), a medição de dureza foi realizada em 3 corpos de prova, de acordo com o esquema apresentado na Figura 22, utilizando medições de dureza Rockwell-B com penetrador esférico de 1/16", pré carga de 10 kg e carga total de 100 kg. Foram indicados 5 pontos distintos em que a distância utilizada entre as medições de cada um dos pontos foi aproximadamente de 25,6 mm. A distância da extremidade esquerda até o ponto 1 e a distância da extremidade direita até o ponto 5 foi de aproximadamente 10 mm.

Figura 22 - Posições das medições de dureza realizadas após tratamento térmico de normalização.



Fonte: OLIVEIRA, F. F, 2015.

Conforme a tomada de dureza nos pontos apresentados na Figura 20, a Tabela 2 apresenta os resultados no metal de base SAE 4340 antes dos procedimentos de soldagem, sendo que o valor apresentado é a média dos valores encontrados.

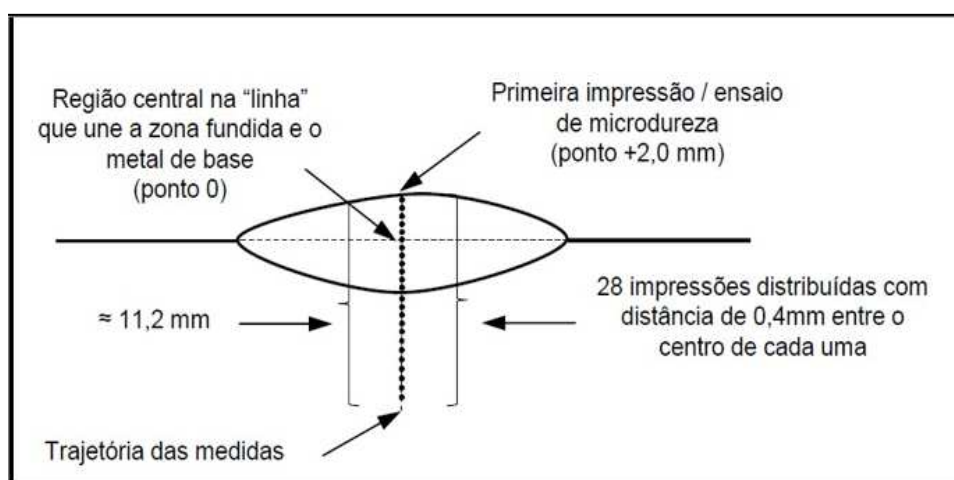
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de dureza (médias).

Ensaio	Dureza (HRB)
Ponto 1	108,0
Ponto 2	106,0
Ponto 3	106,0
Ponto 4	105,0
Ponto 5	107,0
Média	106,4

Fonte: OLIVEIRA, F. F, 2015.

Na Figura 23, temos o procedimento representando esquematicamente a localização das impressões para a obtenção da distribuição da microdureza Vickers.

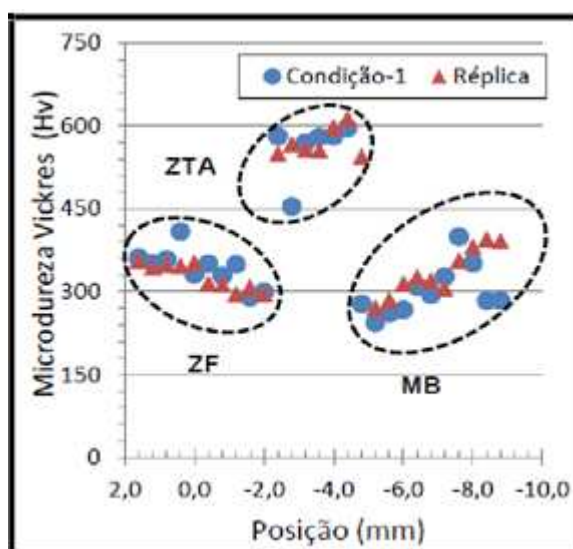
Figura 23 - Representação esquemática do procedimento e localização das impressões para a obtenção da distribuição da microdureza no aço SAE 4340 após a soldagem.



Fonte: OLIVEIRA, F. F, 2015.

Para a Figura 24, consideramos inicialmente as amostras soldadas na condição normal (sem tratamento térmico) apenas com variação de corrente na soldagem (250A), constatando-se que os valores iniciais de dureza (à partir da posição +2,0 mm, na ZF) ficaram um pouco acima da média de dureza inicial do aço 4340 (310 HV), ficando entre 340 e 350 HV, possivelmente ocasionado pelo metal de adição e um aporte térmico maior, sendo que nas proximidades da ZTA, ocorreu uma redução na dureza (posições -1,2 a -2,0 mm).

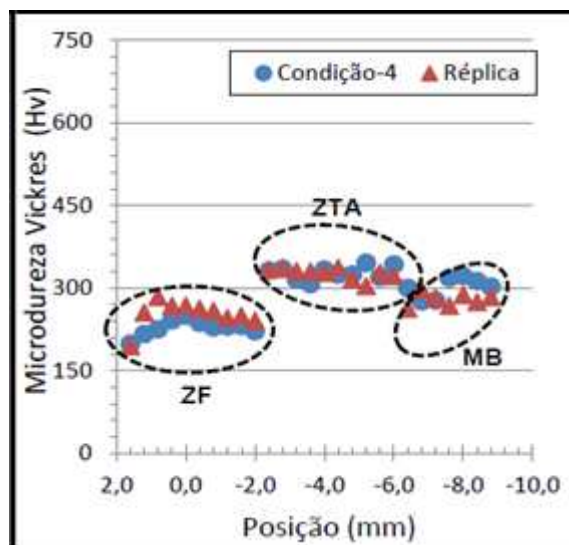
Figura 24- Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados sem tratamento térmico (250A).



Fonte: OLIVEIRA, F. F, 2015.

Na condição de soldagem com pré e pós-aquecimento (250A), as variações nas durezas tiveram pequenas alterações ao longo das áreas de interesse. Conforme a Figura 25, as durezas médias verificadas foram de 235 HV, 326 HV e de 289 HV nas regiões da ZF, ZTA e MB, respectivamente.

Figura 25 - Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados na condição de pré e pós-aquecimento (250A).

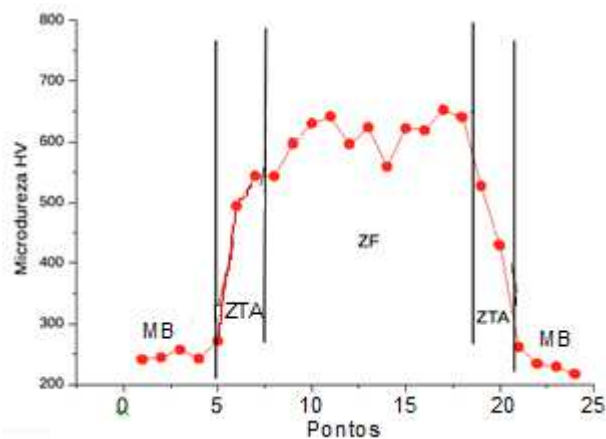


Fonte: OLIVEIRA, F. F, 2015.

5.2.2 Peças com Soldagem a Laser

De acordo com Cardoso (2015), na Figura 26, pode-se verificar a dureza dos corpos de provas soldados. Os perfis de dureza foram na direção longitudinal do cordão de solda. No eixo Y encontram-se os valores de dureza em HV e no eixo X verificam-se as endentações. Cada ponto (endentações) foi marcado com uma distância de 140 μ m um do outro. Foram realizadas medidas de dureza por microindentações, nas quais foi empregado um microdurômetro digital FM-700 Future Tech, com penetrador piramidal de base quadrada e ângulo entre faces de 136°, do tipo Vickers. A carga aplicada foi de 50 gf.

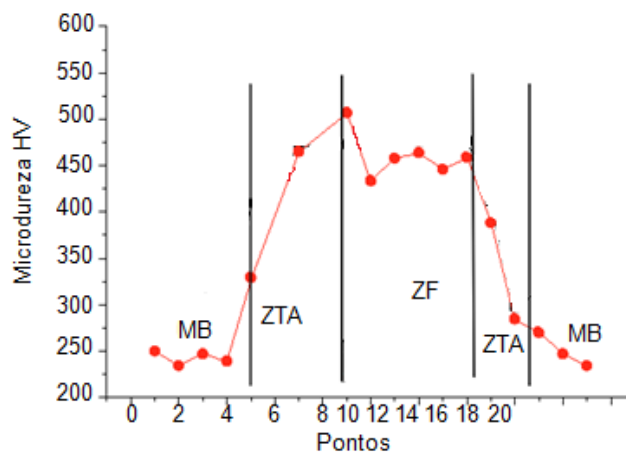
Figura 26 - Dureza HV no cordão de solda.



Fonte: adaptado de Cardoso (2015).

Na Figura 27, observa-se o perfil de dureza do aço 4340 após o revenimento realizado a 400°C no período de três horas. Notou-se uma redução da dureza na região soldada e na ZTA e observou-se a ocorrência da aproximação no valor da dureza na região fundida.

Figura 27 - Dureza HV, após revenimento.



Fonte: adaptado de Cardoso (2015).

Segundo Cardoso (2015), a Tabela 4 mostra as alterações nos valores de microdureza na microestrutura do aço soldado a laser, após o revenimento, aplicado ao aço SAE 4340.

Na ZF, ocorreu elevação da dureza devido à formação de microconstituintes mais resistentes como a martensita e a bainita, advindos do rápido processo de solidificação. Na região de transição (ZTA) ocorreu alteração parcial das fases, devido à elevação da temperatura até a região de austenitização e resfriamento rápido. Após o revenimento há uma redução na dureza na região da ZF e ZTA, pois com o aquecimento, o processo difusional é favorecido, levando ao alívio da tensão e movimentação de carbono e elementos de liga.

Tabela 4 - Resultados de dureza Vickers para o aço SAE 4340 (média de 3 pontos).

Dureza Vickers (HV)					
Soldado					
Borda	MB	ZTA	ZF	MB/ZTA	ZTA/ZF
218	224	496	621	387	625
Soldado e Revenido					
231	241	472	452	389	483

Fonte: adaptado de Cardoso (2015).

6. CONCLUSÕES

Para a soldagem a arame tubular e de acordo com os parâmetros e tratamentos térmicos utilizados, podemos inferir que o tratamento térmico de normalização realizado nos corpos de prova de ambos processos de soldagem, contribuiu para uma melhor homogeneização e refinamento do grão, melhorando assim a resistência e tenacidade do aço.

Além disso, na condição de soldagem para corrente de 250A, sem pré ou pós aquecimento, os valores médios de dureza, foram os mais significativos, em que na ZTA, constatou-se a presença de microestrutura martensítica em forma de agulhas, em fundo de austenita retida, o que caracteriza grande fragilidade da solda e grande dureza.

Já para a soldagem a 250 A, com tratamentos térmicos de pré e pós-aquecimento, formou-se uma área de ZTA bastante extensa, em relação às outras condições de soldagem. Porém, não ocorreu alteração de forma significativa na dureza, estabelecendo-se uma dureza um pouco acima da dureza do material antes da soldagem. Desta forma, formou-se uma microestrutura de ferrita acicular, sendo benéfico para o cordão de solda por conta de sua elevada tenacidade. Houve razoável redução na dureza das regiões da zona fundida e do metal de base, que pôde ser observada pela microestrutura predominante de ferrita acicular, mas formada por grãos mais grosseiros.

A baixa nitidez nas micrografias poderia ser compensada com ajuste adequado do sistema de lentes. Outro agente causador desse “borramento” pode estar relacionado com a sujeira das lentes.

Para a soldagem a laser autógena, ocorre a fusão (ZF) e o consequente tratamento térmico local (ZTA) do aço. Na ZF, ocorreram fusão e solidificação rápida, na qual formaram-se fases duras como a martensita. Na ZTA ocorreu a austenitização e com a troca de calor, a matriz tornou-se predominantemente multifásica.

Na condição com revenimento, foi constatada a queda de dureza na ZF, no qual ocorreu o alívio de tensão local, sendo que a ZTA e ZF mostraram resultados com valores parecidos.

Constatou-se que a principal diferença entre os processos de soldagem com arame tubular e a laser, está na elevada produtividade deste, pois desconsiderando o fator eficiência energética, a velocidade de soldagem poderá compensar os custos adicionais com maior escala de produção. Dependendo das aplicações do aço e com os tratamentos térmicos apropriados, os resultados de dureza e tenacidade podem apresentar valores semelhantes nos dois processos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, L. C. S. **Avaliação da Influência de Tratamentos Térmicos Pós-Soldagem Sobre a Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Juntas de um Aço API 5L X70Q.** Rev. Soldagem & Inspeção, pp. 171-179, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 172/2000; **Critérios de Classificação dos Aços.** Rio de Janeiro, 2000. 8p.

ASSUMPCÃO, G. A. **Estudo da Técnica Dupla Camada na Soldagem do Aço ABNT 1045.** Projeto de Graduação. Universidade Federal do Espírito Santo-UFES, 2006.

BAY, Y., **Pipelines and Risers.** Elsevier, 2011, p 353-380

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARDOSO, A. S. M. **Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, 2010.

CARDOSO, A. S. M. **Tratamento térmico e de superfície dos aços 4340 e 300M após soldagem a laser.** Rev. Bras. Apl. Vac., Campinas, Vol. 34, N°1, pp. 5-13, Jan.- Abr., 2015.

CARVALHO, S. M. **Soldagem com laser a fibra do aço 300M de alta resistência.** Dissertação (Mestrado), 2009, 80 f. – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos.** 7.ed. São Paulo: ABM, 2007.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 4. ed., São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2008. 652p.

COSTA E SILVA, A.L.; MEI, P.R. **Aços e ligas especiais.** 3.ed. Sumaré: Editora Blucher, 2010.

FERNANDES, P. E. A. **Avaliação da Tenacidade à Fratura da Zona Afetada Pelo Calor (ZAC) do Aço API 5L X80 Soldado pelos Processos SMAW E FCAW.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

FORTES, C. **Apostila Eletrodos Revestidos.** 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901097rev0_ApostilaEletrodosRevestidos.pdf>. Acesso em 20 de setembro de 2018.

JÚNIOR, A.S.L. **Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Juntas Soldadas do Aço HY-80 pelos Processos Eletrodo Revestido e GMAW.** Soldag. Insp. São Paulo, v. 19, n.3, p.200-211, jul/set. 2014.

KWIETNIEWSKI, C. E. F; KISS, F.J.; STROHAECKER, T.R.; REGULY, A. **Tratamentos Térmicos de Aços e Ferros Fundidos**. 1.ed. Porto Alegre: Gráfica UFRGS, 2014.

LIMA, M.S.F. Lasers in Material Processing. In: LACKNER, **Lasers in Chemistry: Influencing Matter**, 2008, p.1195-1209.

MACHADO, I.G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: Editado pelo autor, 2007, 477p.

MAROUÇO, E. S. **Estudo do Aporte Térmico nas Propriedades Mecânicas de Metais de Solda de Aço C-Mn Obtidos pelo Processo Arco Submerso**. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 10, n. 2, p. 128-137, abr.-jun. 2013.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. **Soldagem fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 362p.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2000.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2011.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V; SANTOS, D.B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2012.

NOVIKOV, I. **Teoria dos tratamentos térmicos dos metais**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1994.

OLIVEIRA, A.C. de Relatório de Atividades: **Soldagem de Alumínio Estrutural Aeronáutico utilizando um Laser a Fibra**, São Paulo: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), 2008, 15 p.

OLIVEIRA, F. F. **Estudo das Transformações Macro e Microestruturais das Juntas Soldadas do Aço SAE - 4340 Pelo Processo FCAW**. Dissertação de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2015.

PIMENTEL, A. C.; ZANOTELLI, W. **Otimização de Processo de Soldagem: Estudo de Caso para o Processo Arame Tubular Na HZM Industrial LTDA**. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Espírito Santo-UFES, 2004.

WELDING PROCESS. **The Procedure Handbook of Arc Welding**. 43° ed. Cleveland, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, p. 742, 2000.