

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

KLISMANN EDUARDO NEVES

**ESTUDO COMPARATIVO DOS CORDÕES DE SOLDA EM EIXOS
UTILIZANDO ELETRODOS REVESTIDOS E7018 E E6013**

**GUARAPUAVA
2022**

KLISMANN EDUARDO NEVES

**ESTUDO COMPARATIVO DOS CORDÕES DE SOLDA EM EIXOS
UTILIZANDO ELETRODOS REVESTIDOS E7018 E E6013**

**Comparative study of weld seams on shafts using e7018 and e6013
coated electrodes**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado como requisito à obtenção do título
de Tecnólogo em Manutenção Industrial, da
Coordenação do curso de Tecnologia em
Manutenção Industrial, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Dra. Carla Dantas da Silva

**GUARAPUAVA
2022**



Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

KLISMANN EDUARDO NEVES

**ESTUDO COMPARATIVO DOS CORDÕES DE SOLDA EM EIXOS
UTILIZANDO ELETRODOS REVESTIDOS E7018 E E6013**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado como requisito à obtenção do título de Tecnólogo em Manutenção Industrial, da Coordenação do curso de Tecnologia em Manutenção Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Dra. Carla Dantas da Silva

Data de aprovação: 05/12/2022

Carla Dantas da Silva
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Denise Alves Ramalho
Doutora em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Sergio Dalmas
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**GUARAPUAVA
2022**

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, que me conduziu sempre com as devidas ligações de amor, fé, compaixão hoje e sempre.

Aos meus pais Darcy Neves Filho e Lucia Opuchkevich, que sempre me incentivaram e me mostraram o melhor caminho.

A minha irmã Kamila De Fatima Neves, que sempre foi a minha alegria.

A minha esposa Grazielle Cristina Ribeiro Neves, que sempre nos momentos mais difíceis não deixou que desistisse dos meus sonhos.

Aos meus professores do decorrer da graduação.

A minha prezada orientadora Carla Dantas da Silva, pela dedicação, compreensão e auxílio necessário para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

O tempo é um fator muito importante dentro das indústrias, e as paradas inesperadas por falhas e defeitos são comuns, apesar da execução de manutenções preventivas nos equipamentos. A fim de amenizar o tempo de parada em caso de falhas, uma rápida manutenção e utilização de materiais e uma metodologia adequada são essenciais, evitando assim retrabalhos posteriores. Os eixos são componentes comuns e de suma importância para o funcionamento das máquinas, custo e o tempo para a fabricação de um eixo novo é alto, sendo assim este trabalho busca analisar a recuperação de superfícies depositando material sobre a peça por meio da soldagem com os eletrodos revestidos E7018 e E6013, e analisando qual deles apresenta melhores resultados em termos de propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Indústria; Manutenção; Soldagem; Eixos.

ABSTRACT

Time is a very important factor within industries, and unexpected downtime due to failures and defects are common, despite the execution of preventive maintenance on equipment. In order to minimize downtime in case of failures, a quick maintenance and the use of materials and an adequate methodology are essential, thus avoiding subsequent rework. The shafts are common components and of great importance for the operation of the machines, cost and time for the manufacture of a new shaft is high, thus this work seeks to analyze the recovery of surfaces depositing material on the part through welding with the coated electrodes E7018 and E6013, and analyzing which of them presents better results in terms of mechanical properties.

Keywords: Industries; Maintenance; Weld; The Shafts.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Esquema de soldagem de arco elétrico com eletrodo revestido.....	14
Figura 2 - Componentes do eletrodo revestido	14
Fotografia 1 - Eletrodo E7018	17
Fotografia 2 - Eletrodo E6013	18
Fotografia 3 - Etapa 1 de enchimento	18
Fotografia 4 - Etapa 2 de enchimento	19
Fotografia 5 - Etapa 3 de enchimento	19
Fotografia 6 - Eixo após enchimento.....	20
Fotografia 7 - Durômetro de Bancada	20
Fotografia 8 - Pontos de análise de dureza.....	21
Fotografia 9 - Cortadora metalográfica CM40/60	21
Fotografia 10 - Lixadeira Metalográfica manual de 4 pistas LM04	22
Fotografia 11 - Lixadeira Politriz Metalográfica PL02E.....	22
Fotografia 12 - Microscópio Olympus BX51	23
Fotografia 13 - Análise visual E6013.....	24
Fotografia 14 - Análise visual E7018.....	25
Figura 3 - Solda E 6013.....	28
Figura 4 - ZTA solda E6013	28
Figura 5 - Material de base amostra 6013 100x	29
Figura 6 - CS, ZTA e MB amostra E7018.....	29
Figura 7 - Comparação das microestruturas das amostras E6013 e E7018 na região do cordão de solda.....	30
Figura 8 - Composição química dos eletrodos segundo a Norma AWS	30
Figura 9 - Material de base amostra E7018	30
Grafico 1 – Dureza média das amostras	26

LISTA DE SIGLAS

ZTA	Zona Termicamente Afetada
AWS	American Welding Society
C	Carbono
Mn	Manganês
P	Fosforo
S	Enxofre
Si	Silício
TiO ₂	Dióxido de titânio
SAE	Society of Automotive Engineers International
HRB	Rockwell Hardness B scale
CS	Cordão de solda
MB	Material de base

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 1020	16
Tabela 2 - Padrões de soldagem utilizados.....	18
Tabela 3 - Resultado do ensaio de dureza amostra E6013.....	25
Tabela 4 - Resultado do ensaio de dureza amostra E7018.....	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
1.2	Justificativa	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Processo de soldagem	13
2.1.1	Tipos de Eletrodos	14
<u>2.1.1.1</u>	<u>Eletrodo E 7018</u>	<u>15</u>
<u>2.1.1.2</u>	<u>Eletrodo E 6013</u>	<u>15</u>
2.2	Aço carbono sae 1020	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1	Processo de soldagem	17
3.2	Análise e inspeção dos cordões de solda	19
3.2.1	Ensaio destrutivo de dureza	20
3.2.2	Ensaio Metalográficos	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
4.1	Análise visual	24
4.1.1	Análise visual de enchimento com o eletrodo E6013	24
4.2	Ensaio de dureza	25
4.3	Ensaio metalográfico	27
5	CONCLUSÃO	32
	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

Os eixos são componentes imprescindíveis para transmissão de força e rotação nos equipamentos, por este motivo sua manutenção, montagem e desmontagem deve ser executada de forma que não altere sua geometria ou resistência. Para a fabricação dos eixos é utilizada uma tabela de ajuste de folgas a qual delimita as tolerâncias de folga para cada aplicação, qualquer interferência fora dos limites pode acarretar desgastes, superaquecimento ou até mesmo quebra catastrófica dos componentes (ALMEIDA, 2016).

O desgaste da superfície dos eixos pode acontecer devido a falta de ajuste dos componentes, lubrificação insuficiente, quebra de componentes acoplados ao eixo, contato de componentes fixos a parte móvel, etc.

O custo para substituição de um eixo varia de acordo com o diâmetro da peça, material adequado e tempo para a fabricação de um eixo novo, incluindo o tempo de parada na produção. Sendo assim, a recuperação do componente se torna um meio admissível, pois é possível restaurar as medidas adequadas da peça e ter tempo de execução menor. Porém, são necessários alguns cuidados durante o processo para evitar defeitos posteriores, como por exemplo: Empenamento do eixo e ruptura do eixo por fadiga nas zonas termicamente afetadas (SAMPAIO; MORAIS, 2014).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo comparativo de propriedades mecânicas dos enchimentos em um eixo de aço SAE 1020, utilizando os eletrodos revestidos E7018 e E6013, realizando uma análise de dureza e microestrutura das amostras soldadas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar, utilizando microscopia óptica, a microestrutura das zonas termicamente afetadas (ZTA's), dos cordões de solda e do metal base, avaliando a influência da variação da e corrente aplicada, assim como os tipos de eletrodos;
- Analisar as amostras soldadas utilizando o ensaio não destrutivo

(inspeção visual) e os ensaios destrutivos (dureza e metalografia) nas regiões das amostras soldadas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Um ponto importante para a realização da manutenção na indústria é evitar retrabalhos. O enchimento, que é um processo de recuperação de superfícies depositando material sobre a peça, evita custos desnecessários com a substituição do eixo, mas possibilita uma probabilidade maior de erros sendo eles: deslocamento da solda, desgaste na região da solda, quebra do material nas zonas termicamente afetadas, porosidades, trincas, etc.

Este trabalho busca comparar os enchimentos de eixos realizados com eletrodos E6013 e E7018 analisando qual deles apresenta melhores resultados em termos de propriedades mecânicas, para garantir um reparo seguro e de qualidade nas peças. Para o estudo também foram utilizados os materiais e consumíveis mais comuns dentro da indústria e com muitas aplicações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

O método de união dos metais do processo de soldagem se baseia em forças microscópicas, onde acontece a aproximação dos átomos e moléculas em distancias tão próximas que possibilitam a formação de ligações metálicas (MODENESI; MARQUES, 2000).

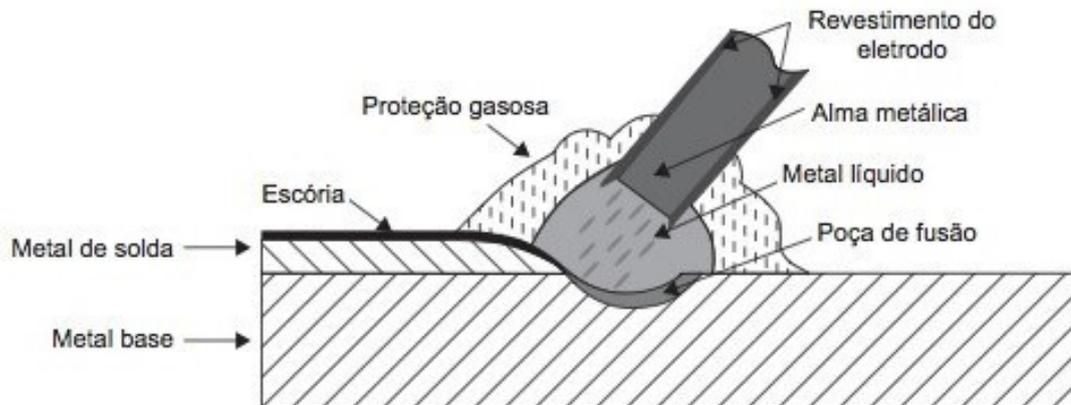
O processo de soldagem proporciona alta resistência de fixação entre componentes, outra funcionalidade do processo é a recuperação de superfícies depositando material sobre a peça, sua praticidade também é um dos motivos pelo qual é amplamente utilizado na indústria (SAMPAIO; MORAIS, 2014). Para a recuperação de superfícies é utilizado o método de enchimento, onde o metal de adição é adicionado ao metal de base por meio da fusão.

A soldagem com eletrodo revestido ocorre pela fusão do metal base com o metal de adição, o aquecimento ocorre através de uma descarga elétrica gerando luz e calor (DANTAS, 2005), o metal base também é chamado de alma e é composto por uma liga metálica. O entorno do eletrodo é revestido com uma camada de materiais minerais os quais, durante a fusão formam um gás e um revestimento protegendo a solda da atmosfera (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Apesar de contar com equipamentos mais simples e que possibilitam a soldagem em locais de difícil acesso, o eletrodo apresenta algumas desvantagens como: a geração de fumos e gases os quais são prejudiciais à saúde, o cuidado necessário com os eletrodos pois, devido ao revestimento devem permanecer secos e livres de contaminantes, este processo também apresenta baixa produtividade, não sendo ideal para a produção em longa escala, por exemplo (MARQUES, 2000).

Neste processo, quando a corrente elétrica passa pelo metal de adição ligado ao equipamento em uma polaridade positiva e entra em contato com o metal base ligado a uma polaridade negativa no equipamento, se forma o arco elétrico gerando calor para a fusão dos materiais. A Fig. 1 apresenta o detalhamento deste processo (ALMEIDA, 2016).

Figura 1- Esquema de soldagem de arco elétrico com eletrodo revestido.

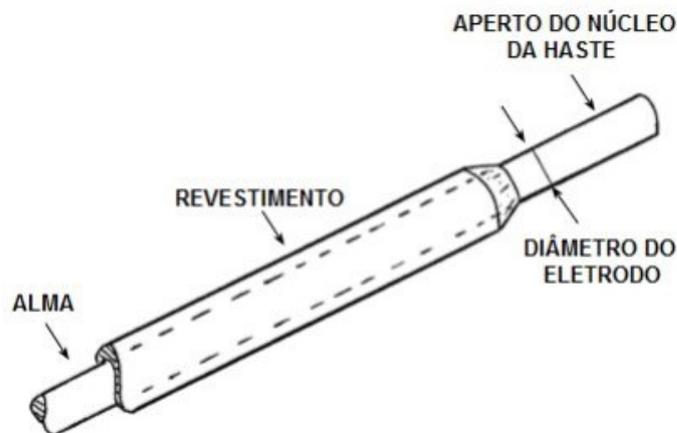


Fonte: ALMEIDA (2016)

2.1.1 Tipos de Eletrodos

O eletrodo revestido utilizado na soldagem de aço carbono é composto por uma alma e um revestimento. A alma é composta por aço de baixo carbono, já o revestimento é composto por seis grupos principais: elementos de liga, aglomerantes, formadores de gases, estabilizadores do arco, formadores de fluxo e escória e Plasticizantes (SANTOS, 2015). Na Fig. 2 é possível identificar os elementos que compõem o eletrodo revestido.

Figura 2 - Componentes do eletrodo revestido



Fonte: Adaptado de UNITOR SHIPS SERVICE, 1968.

A American Welding Society (AWS) A5.1 padroniza da designação dos eletrodos da seguinte maneira: E XXXXX (PEREIRA, 2002).

A primeira letra "E" informa que se trata de um Eletrodo para soldagem de

arco elétrico, a numeração seguinte é formada de 1 á 3 números os quais representam o limite de resistência a tração em ksi, por exemplo: E 70XX (70ksi), E 60XX (60ksi), E 110XX (110ksi). O próximo dígito se refere a posição de soldagem adequada para o eletrodo (PEREIRA, 2002).

1 – Todas as posições

2 – Horizontal

3 – Plana

4 – Plana Sobre cabeça, horizontal e vertical descendente.

O 4° ou 5° (dependendo das sequencias anteriores) indica o material de revestimento, polaridades para solda, nível de penetração e tipo de corrente. (SANTOS, 2015)

2.1.1.1 Eletrodo E 7018

Constituído por um revestimento de baixo hidrogênio e adição de pó de ferro este eletrodo pode ser aplicado em soldas com um nível de amperagem alto durante a solda, o pó de ferro do revestimento também se funde ao metal durante a solda, resultando em uma eficiência de deposição elevada, entre 66% (E 7018- 48.04) à 75% (E 7018-1 –55.00) (FORTES, 2005).

Seguindo a normativa da AWS 5.1 obtemos as seguintes informações do o Eletrodo E 7018:

E XXXX: Eletrodo revestido

E 70XX: Limite de resistência a tração de 70 ksi ou 7000 psi

E XX1X: Soldável em qual quer posição

E XXX8: Revestimento-escória baixo hidrogênio com pó de ferro, o eletrodo deve estar na polaridade positiva durante a soldagem. Apresenta penetração média e as correntes para a solda podem ser CA ou CC (SANTOS 2015).

Entre as vantagens deste eletrodo estão, a possibilidade da realização da solda em todas as posições, baixo nível de ocorrência de respingos, resistência elevada e boa penetração (LOUREIRO, 2017).

2.1.1.2 Eletrodo E 6013

O revestimento deste eletrodo é constituído em maior parte de rútilico, dióxido de titânio (TiO₂) e potássio, é amplamente usado em materiais de espessura mais fina, pois tem um arco suave e que exige menor amperagem para a realização

da solda, porém produz maior nível de respingos. Sua eficiência de deposição média é 73% para o eletrodo com diâmetro de 2,5mm (LOUREIRO, 2017).

Seguindo a normativa da AWS 5.1 obtemos as seguintes informações do o Eletrodo E 6013:

E XXXX: Eletrodo revestido

E 60XX: Limite de resistência a tração de 60 ksi ou 6000 psi

E XX1X: Soldável em qual quer posição

E XXX3: Rutílico e potássio, o eletrodo pode estar na polaridade positiva ou negativa durante a soldagem, apresenta penetração baixa e as correntes para a solda podem ser CA ou CC (SANTOS 2015).

2.2 AÇO CARBONO SAE 1020

É uma liga constituída por ferro e carbono, sendo 0,20% o teor de carbono, podendo ter uma variação de 0,05%% (SANTOS, 2015). Comumente utilizado em estruturas, chapas, e eixos (SILVA, 2021), Sendo composto quimicamente pelos componentes: Carbono (C), Manganês (Mn), Fosforo (P), e Enxofre (S), como descritos na Tab. 1.

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 1020

C	Mn	Si	Cr	S
0,18 – 0,23	0,60 – 0,90	0,15 – 0,35	0,30 – 0,40	0,02 – 0,04

Fonte: SILVA (2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

Para realizar os ensaios de soldagem obteve-se o aço SAE 1020 pela empresa Zico Ferragens situada na cidade de Guarapuava-PR, a qual forneceu o tarugo de eixo em aço laminado com diâmetro de 40 mm e 250 mm de comprimento. A Fotografia 1 apresenta o material utilizado.

Fotografia 1 - Eixo aço SAE 1020 laminado



Fonte: Autoria própria (2022)

O processo de soldagem utilizado foi o de eletrodo revestido com o equipamento ESAB modelo A250, e os consumíveis foram os eletrodos E7018 (2,5mm de diâmetro) e E6013 (2,5mm de diâmetro). As Fotografias 2 e 3 dos eletrodos utilizados.

Fotografia 2 - Eletrodo E7018



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 3 - Eletrodo E6013

Fonte: Autoria própria (2022)

Realizando a soldagem no eixo em padrão de enchimento em duas amostras na posição PA-AWS 1G, tanto para E7018 como para E6013, a Tab.2 apresenta os padrões utilizados para a soldagem nas peças.

Tabela 2 - Padrões de soldagem utilizados

Amostra	Eletrodo	Corrente (A)
1	E7018	70
2	E6013	70

Fonte: Autoria própria (2022)

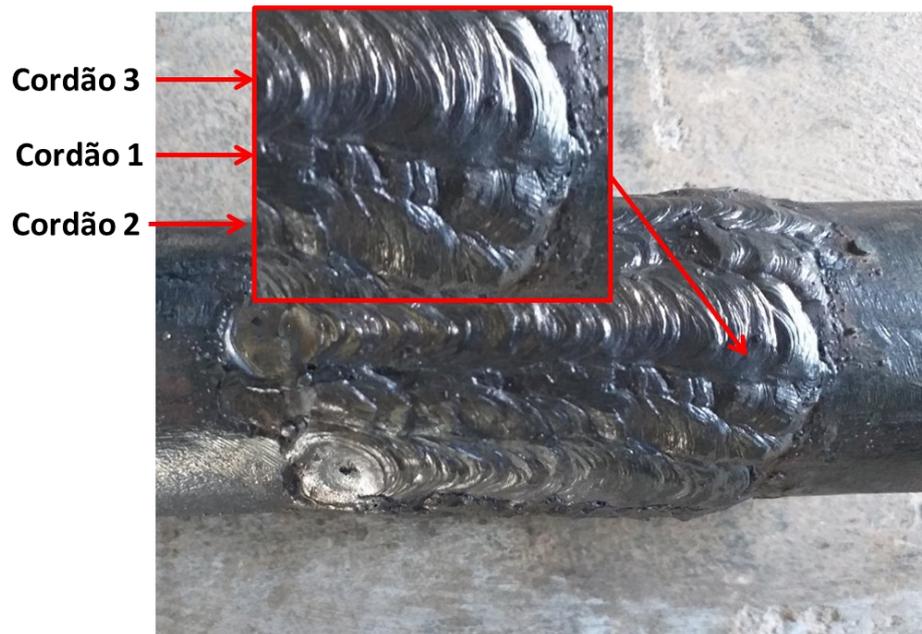
Os cordões de soldas foram realizados alternando a posição do eixo, sendo assim a sequência da soldagem foi de 90° a cada cordão a fim de evitar o empenamento do eixo por sobreaquecimento em uma única região. Outro fator importante é que cada cordão foi limpo sendo removido toda a escória da solda, e por fim os cordões se sobrepõem em 50% para evitar falhas entre os cordões. As Fotografias. 4, 5 e 6 apresentam a sequência dos cordões de solda.

Fotografia 4 - Etapa 1 de enchimento

Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 5 - Etapa 2 de enchimento

Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 6 - Etapa 3 de enchimento

Fonte: Autoria própria (2022)

3.2 ANÁLISE E INSPEÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA

Após o resfriamento em temperatura ambiente das amostras soldadas, uma escova de aço foi utilizada para remover a ferrugem e a oxidação presente no cordão, assim como respingos e impurezas indesejáveis. Para a análise e inspeção os foram realizados ensaios de inspeção visual, dureza, e por fim, uma análise metalográfica da peça com o objetivo de verificar possíveis alterações na microestrutura. A Fotografia 7 apresenta os dois enchimentos realizados no eixo. Item 3.1.

Fotografia 7 - Eixo após enchimento



Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.1 ENSAIO DESTRUTIVO DE DUREZA

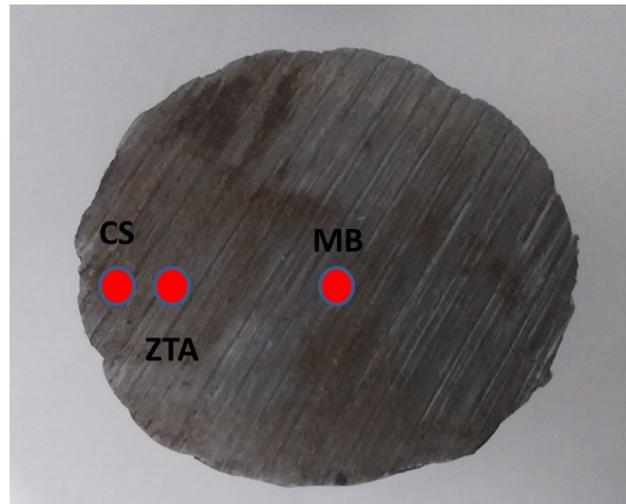
Neste ensaio foi realizado a medição de dureza de cada amostra, obtidas na escala Rockwell B (HRB), através do equipamento Durômetro de Bancada para Dureza Rockwell Normal Digimess com edentador esférico de 1/16" de medida e carga de 100 kgf. A Fotografia 8 apresenta o equipamento utilizado para o ensaio.

Fotografia 8 - Durômetro de Bancada



Fonte: Autoria própria (2022)

As medidas foram realizadas em 18 (dezoito) pontos diferentes seguindo uma linha horizontal com 9 (nove) pontos e outra vertical com outros 9 (nove) sendo possível obter uma média de 3 (três) pontos a cada gradiente, como apresentado na Fotografia 9. Sendo CS (Cordão de solda), ZTA (Zona termicamente afetada), MB (Material de base)

Fotografia 9 - Pontos de análise de dureza

Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.2 ENSAIOS METALOGRAFICOS

Para o ensaio metalográfico foi utilizado, uma cortadora metalográfica CM40/60 da marca Teclago, para realizar o corte das amostras, como podemos ver na Fotografia 10.

Fotografia 10 - Cortadora metalográfica CM40/60

Fonte: Autoria própria (2022)

Na sequência foi realizado o lixamento manual em que foram utilizadas as lixas de granulometrias: 220, 320, 400, e 600 (Fotografia 11). O lixamento automático foi feito pela poltriz automática com lixa 1200 e 2000 da marca Teclago.

Fotografia 11- Lixadeira Metalográfica manual de 4 pistas LM04

Fonte: Autoria própria (2022)

O polimento foi realizado através da Politriz Lixadeira Metalográfica – PL02E, junto com uso de uma flanela (pano de polimento) com pasta de alumina, esta que iniciou com 3 microns até a faixa de 0,5 microns, conforme Fotografia 12.

Fotografia 12- Lixadeira Politriz Metalográfica PL02E

Fonte: Autoria própria (2022)

Por fim, foi realizado um ataque químico utilizando o reagente Nital a 5% (95 ml de álcool etílico e 5ml de ácido nítrico concentrado) por um período de 40 segundos e posterior limpeza da peça com água e álcool etílico.

Após esse processo de preparação foram realizadas capturas de imagem no microscópio óptico da marca Olympus BX51 (Fotografia 13) para realização da análise da micrografia, na qual foram utilizadas lentes de ampliação de 5x, 10x, 20x, 50x e 100x.

Fotografia 13 - Microscópio Olympus BX51



Fonte: Autoria própria (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

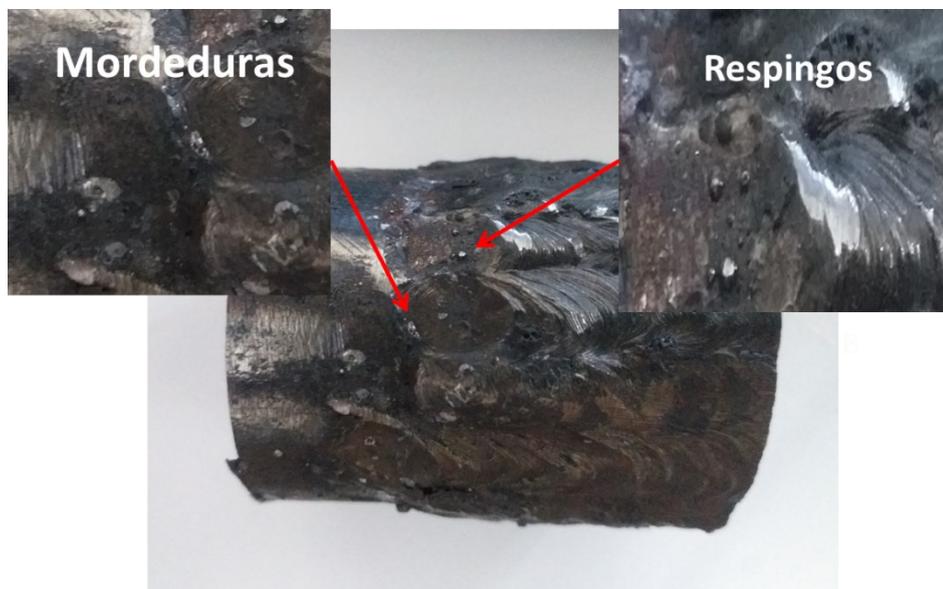
4.1 ANÁLISE VISUAL

Nesta análise é possível indentificar pontos importantes e que diferenciam os eletrodos vizualizando seus aspectos.

4.1.1 Analise visual de enchimento com o eletrodo E6013

A primeira análise realizada nas soldas indentifica os pontos característicos de cada eletrodo, e o resultado do padrão de enchimento abordado, a Fotografia 14 apresenta a imagem do enchimento realizado com eletrodo E6013.

Fotografia 13 - Análise visual E6013



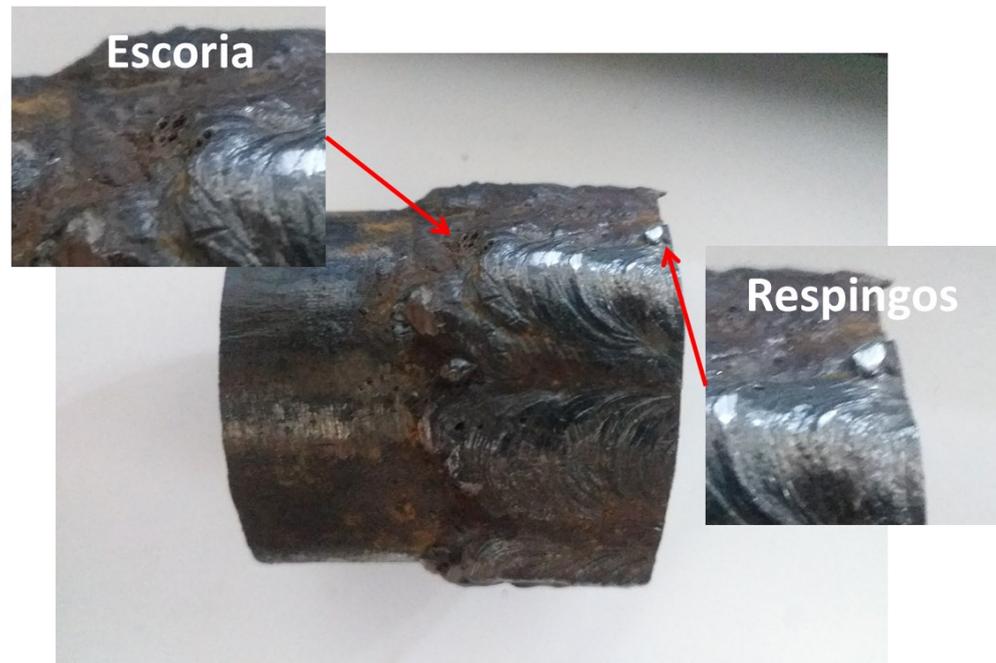
Fonte: Autoria própria (2022)

Os respingos são característicos dos eletrodos E6013 como descrito no item 2.1.1.2, as marcas de depressão entorno dos cordões também chamadas de mordeduras podem ter sido causadas pelos fatores: arco elétrico com comprimento excessivo, sendo que as mordeduras estão localizadas ao final do cordão; velocidade alta de soldagem ou corrente elevada (SANTOS, 2015), o fato de utilizar o método de sobrepor os cordões evitou falhas entre as soldas.

4.1.2 Análise de enchimento com eletrodo E7018

A primeira análise realizada nas soldas identifica os pontos característicos de cada eletrodo, e o resultado do padrão de enchimento abordado, na Fotografia 15 temos a imagem do enchimento realizado com eletrodo E7018.

Fotografia 15 - Análise visual E7018



Fonte: Autoria própria (2022)

Assim como no enchimento anterior a solda com Eletrodo E7018 também apresentou pontos consequentes de suas características, a solda produziu menos respingos que a anterior, não apresentou mordeduras, porém apresentou maior formação de escória, sendo necessário, durante a soldagem, maior cuidado com a limpeza dos cordões.

4.2 ENSAIO DE DUREZA

Neste ensaio foram coletados diferentes valores de dureza, resultando em um valor de média amostral conforme Tabelas 3 e 4 com seus respectivos desvios padrões.

Tabela 3 - Resultado do ensaio de dureza amostra E6013

Ensaio	Metal base HRB	Zona termicamente afetada HRB	Cordão de solda HRB
1	71	71	71
2	73	72	79
3	70	71	74
4	70,5	69,5	73
5	70,5	82,5	79,5
6	68,5	68	73,5
Média	70,5	72,3	75
Desvio padrão amostral	1,5	5,2	3,4

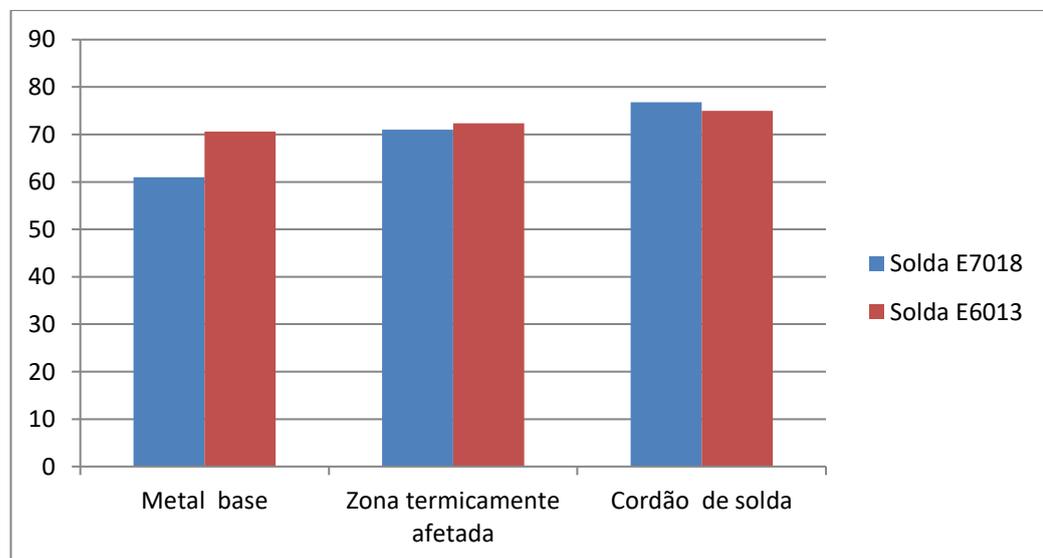
Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 4 - Resultado do ensaio de dureza amostra E7018

Ensaio	Metal base HRB	Zona termicamente afetada HRB	Cordão de solda HRB
1	53	66	75
2	63	71	73
3	61	81	81
4	65	72	74
5	69	77	75
6	55	59	83
Média	61	71	76,8
Desvio padrão amostral	6,1	7,8	4,1

Fonte: Autoria própria (2022)

Podemos observar possíveis variações de dureza no metal base, com uma variação de 14% entre as duas amostras. Já no cordão de solda e zona termicamente afetada as durezas entre as amostras estão praticamente equivalentes. Com os resultados obtidos neste ensaio foi possível gerar o Gráfico 1 de comparação utilizando a escala Rockwell B.

Gráfico 1 – Dureza média das amostras

Fonte: Autoria própria (2022)

Entre os fatores que afetam a dureza temos a amplitude térmica do cordão e a taxa de deposição, os eletrodos E6013 tem menor taxa de deposição (0,7) comparado com o eletrodo E7018 (0,8), ou seja, a massa do material de adição depositado por unidade de tempo é menor (FORTES 2005). A Tabela 7 apresenta os valores das taxas de deposição e corrente indicada.

Tabela 7 - Parâmetros de soldagem

Eletrodo	AWS	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Valor ótimo (A)	TX. dep. (kg/h)	Ef. dep. (%)
OK 46.00	E6013	2,0	50 – 70	50	0,6	73
OK 46.13		2,5	60 – 100	85	0,7	73
OK 43.32		3,2	80 – 150	125	1,0	73
		4,0	105 – 205	140 / 160 / 180	1,2 / 1,4 / 1,6	76 / 74 / 71
		5,0	155 – 300	180 / 200 / 220	1,5 / 1,7 / 1,9	74 / 71 / 73
OK 48.04	E7018	2,5	65 – 105	90	0,8	66
OK 48.06	E7018	3,2	100 – 150	120 / 140	1,2 / 1,2	72 / 71
OK 48.07	E7018-1	4,0	130 – 200	140 / 170	1,4 / 1,7	75 / 74
OK 55.00	E7018-1	5,0	185 – 270	200 / 250	2,2 / 2,4	76 / 75

Fonte: Adaptado de FORTES (2005)

4.3 ENSAIO METALÓGRAFICO

Neste ensaio é possível visualizar a micrografia das fases do material, demonstrando com maior clareza a microestrutura do cordão de solda, a zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de base. Para a visualização microscópica das amostras ambas passaram pelo processo de embutimento, lixamento, polimento e ataque químico com nital 5% como apresenta a Fotografia 16.

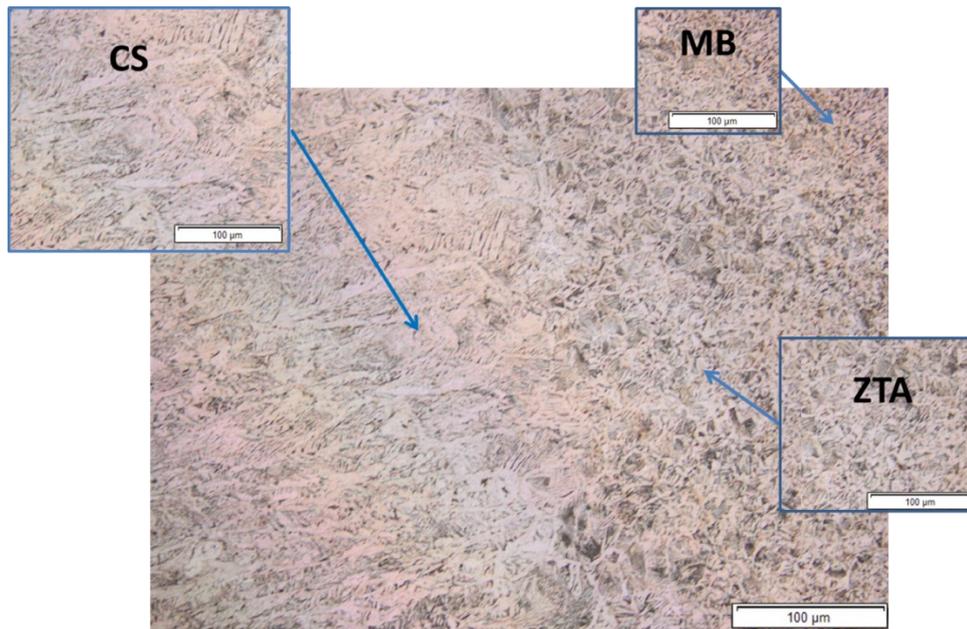
Fotografia 16: Amostras embutidas



Fonte: Autoria própria (2022)

A microestrutura na amostra de enchimento com E 6013 com a ampliação de 5x apresentada na Fig.3 abaixo possibilita a visualização da mudança no formato dos grãos em cada região. Vemos a formação de dendritas equiaxiais devido ao aporte térmico gerado em torno do cordão de solda (CS), o qual se encontra no estado bruto de fusão. Na zona termicamente afetada (ZTA) temos um aumento no tamanho de grãos devido ao aumento de temperatura seguido de um resfriamento lento ao ar, o qual leva a uma diminuição da dureza em relação ao cordão de solda e um aumento no tamanho de grãos. Por fim temos o metal base (MB) com uma estrutura típica de um aço 1020 formado por ferrita e perlita (ferrita + cementita).

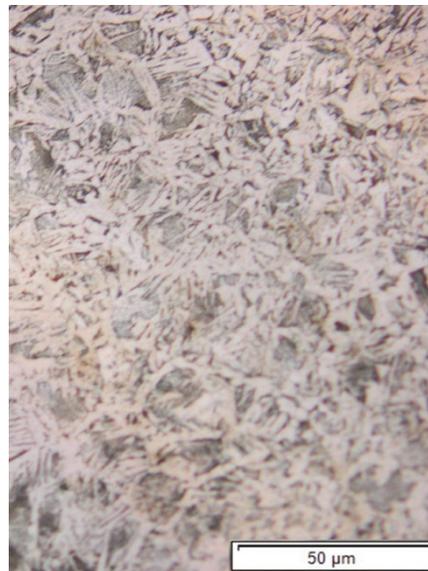
Figura 3 - Solda E 6013



Fonte: Aatoria própria (2022)

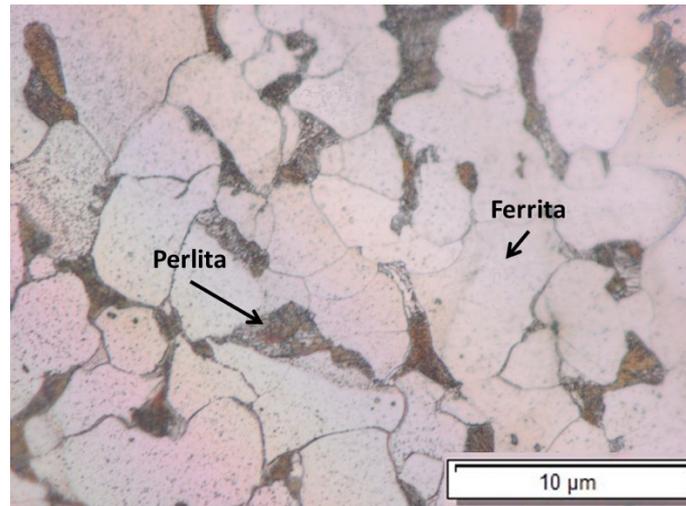
Na Figura 4 com ampliação de 20X percebe-se a presença de dendritas equiaxiais formadas na ZTA, comuns de acontecerem em amostras soldadas.

Figura 4 - ZTA solda E6013



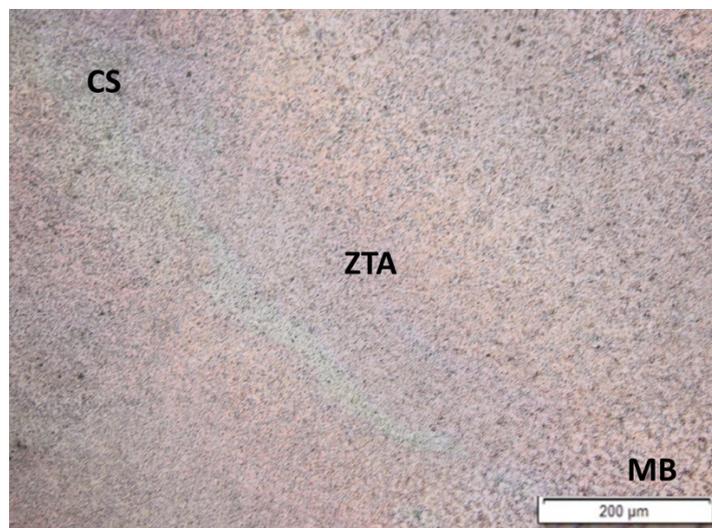
Fonte: Aatoria própria (2022)

A medida que os grãos se distanciam dos cordões de solda apresentam maior quantidade de ferrita+perlita como no material de base o metal base apresenta sua forma característica formada por ferrita e perlita, estrutura comum ao aço SAE 1020. Como podemos observar na Fig. 5.

Figura 5 - Material de base amostra 6013 100x

Fonte: Autoria própria (2022)

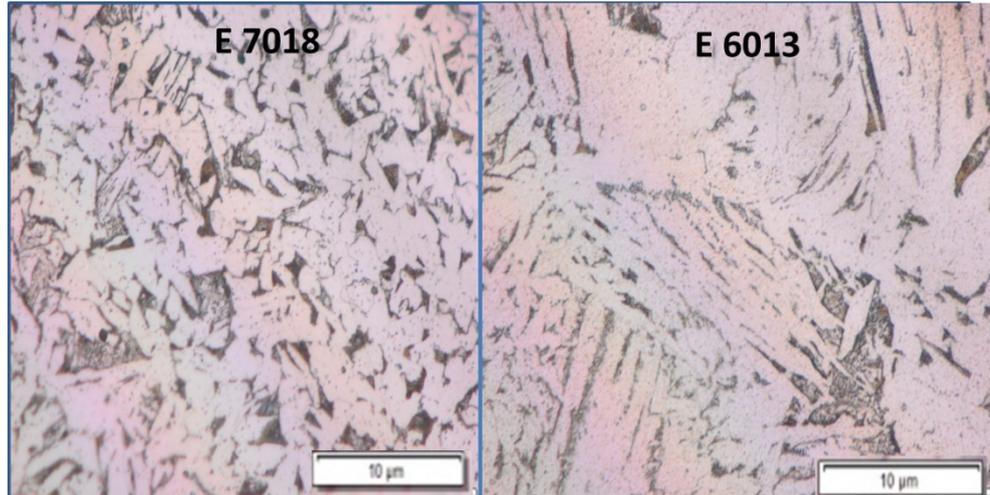
No enchimento com E7018 é possível verificar uma estrutura com grãos mais homogêneos no metal base, novamente comum ao aço SAE 1020, este fator está relacionado a elevada amplitude de temperatura seguida de um resfriamento lento. A Fig. 6 apresenta as 3 regiões da amostra na ampliação de 5x.

Figura 6 - CS, ZTA e MB amostra E7018

Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com a Fig.8 temos uma diferença na composição química dos eletrodos, o que leva a uma diferença na microestrutura, como podemos observar na Fig.7. A amostra do E 7018 tem mais elementos de liga e com isso uma maior nucleação de grãos.

Figura 7 - Comparação das microestruturas das amostras E6013 e E7018 na região do cordão de solda



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 8 - Composição química dos eletrodos segundo a Norma AWS

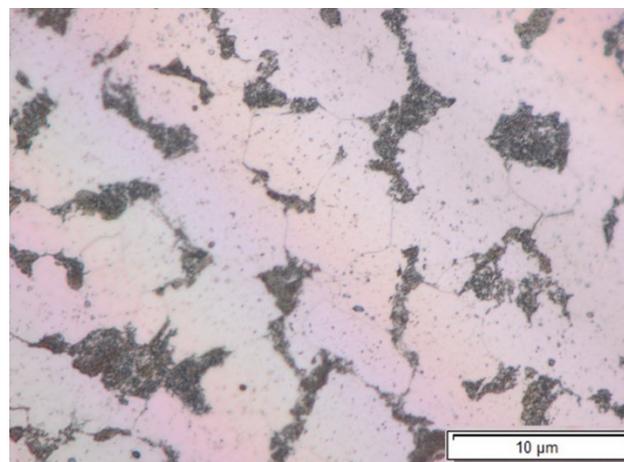
Requisitos de composição química para Eletrodos

Eletrodo	Percentual								
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V
E6013	0.20	1.20	1.00	N.S.	N.S.	0.30	0.20	0.30	0.08
E7018	0.15	1.60	0.75	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08

Fonte: Adaptado de AMERICAN WELDING SOCIETY (2004)

A microestrutura no material de base da amostra do enchimento com E7018 apresenta grãos de ferrita e perlita unidos e bem conformados como vemos na Fig.9 com ampliação de 100X.

Figura 9 - Material de base amostra E7018



Fonte: Autoria própria (2022)

Se compararmos as Figuras 6 e 9 podemos observar variações na microestrutura do metal base. Como comentado anteriormente, temos uma grande

variação de dureza entre as amostras no metal base, afetando assim o tamanho e homogeneidade dos grãos no metal base. Considerando que a solda foi manual podemos esperar alguma variação nos valores dos desvios.

5 CONCLUSÕES

Com a análise visual das amostras foi possível constatar as características próprias de cada eletrodo, como por exemplo, a maior formação de respingos nos eletrodos E6013, e as mordeduras causadas pelo aumento do arco elétrico no fim do cordão e amperagem de solda mais alta para o tipo de eletrodo, o que pode ser evitado com outra metodologia de soldagem, alterando a corrente no início e fim do cordão.

Podemos observar possíveis variações de dureza no metal base, com uma variação de 14% entre as duas amostras, afetando assim o tamanho e homogeneidade dos grãos no metal base. Já no cordão de solda e zona termicamente afetada as durezas entre as amostras estão praticamente equivalentes.

Devido a uma diferença na composição química dos eletrodos, foi observada uma diferença na microestrutura dos cordões de solda, a amostra do E7018 tem mais elementos de liga e com isso uma maior nucleação de grãos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. A5.1: **Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding**. Miami: Editora, 2004.

ALMEIDA, Paulo Samuel D. **Manutenção Mecânica Industrial - Princípios Técnicos e Operações**. 2016. 153f. Disponível em: Minha Biblioteca, Editora Saraiva 2016.

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.

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

DANTAS, C. M., LIMA II, E. J. BRACARENSE, A. Q., **Análise da Viabilidade de Utilização de um Mandril Instrumentado com Termopares para a Soldagem Robotizada com Eletrodo Revestido**, XXXI CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, São Paulo – SP, 2005.

FORTES, **Apostila de Eletrodos Revestidos**. 32f, Tecnologia da Soldagem, 2005.

LOUREIRO Amanda T. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos de pead reforçados por resíduos de eletrodos revestidos**. 2017.84f. Dissertação. Fundação Oswaldo Aranha Centro Universitário de Volta Redonda, (Mestrado profissional em materiais). Volta Redonda, 2017.

KOSINSKI, Guilherme. **Análise do cordão de solda no processo de soldagem MAG utilizando os aços SAE 1020 e SAE 1045**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

MELCONIAN, Sarkis. **Elementos de máquinas**. (11th edição). 2019. 384f. Disponível em: Minha Biblioteca, Editora Saraiva 2019.

MODENESI, Paulo j.; MARQUES Paulo V. **Soldagem I, introdução aos processos desoldagem**. 52f. Belo Horizonte, 2000.

MODENESI, Paulo J; MARQUES, Paulo V; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte, 2012.

OLIVEIRA, Claudia S; DENTI Guilherme B. **Avaliação da tenacidade ao impacto da região revenida pelo passe duplo em soldagem SMAW do aço AISI 1045**. 2007. 48f. TCC. Universidade Federal do Espírito Santo Centro Tecnológico (Departamento De Engenharia Mecânica Projeto De Graduação). Vitoria, 2007.

PEREIRA, Leonardo D. **Avaliação do teor de fumos em processos de soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido**. 2002. 103f. Dissertação. Universidade Federal da Paraíba Centro de Ciências e Tecnologia, (Pós-graduação em engenharia mecânica) Campina Grande. 2002.

SAMPAIO, Heretiano D; MORAIS Willy A.: **Produtos metálicos ferrosos: análise técnico-gerencial da produção de eixos motrizes recuperados por soldagem**. In: 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas. 12 * Anais. São Paulo, SP, Brasil, 2014.

SANTOS, Carlos Eduardo Figueiredo D. **Processos de Soldagem - Conceitos, Equipamentos e Normas de Segurança**. 2015. 153f. Disponível em: Minha Biblioteca, Editora Saraiva 2015.

SANTOS, Givanildo A. **Tecnologia dos Materiais Metálicos - Propriedades, Estruturas e Processos de Obtenção**. Editora Saraiva 2015. 9788536532523. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536532523/>. Acesso em: 25 jun. 2022.

SILVA, AMANDA DE O. **Influência de diversos tratamentos térmicos na microestrutura e dureza do aço 1045**. 2021. 41f. TCC. Universidade Federal do Ceará Centro de Tecnologia (Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Fortaleza, 2021.

UNITOR SHIPS SERVICE AS. **The Welding Handbook - Marine products: welding and related process for repair and maintenance onboard**. Oslo: 14th edition, 2nd revision, Wilhelmsen Ships Service, 1968.