



ANÁLISE DE DESGASTE DOS REVESTIMENTOS POR SOLDAGEM PARA RECUPERAÇÃO DAS GUIAS DO CARRO ALIMENTADOR DA CAIXA MATRIZ FABRICADAS EM AÇO SAE 1045

João Rafael Vendramini¹

Adelor Felipe Costa²

Resumo: O processo de soldagem a arco elétrico é utilizado para inúmeras aplicações dentre elas o revestimento de superfícies onde o material está sujeito a condições de desgastes. O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho de dois tipos de consumíveis depositados sobre o metal base de aço SAE 1045, através dos processos SMAW e FCAW e por fim comparando com o metal base utilizado sem quaisquer tipos de revestimentos submetidos aos respectivos ensaios. O processo SMAW utiliza o eletrodo revestido como consumível já o FCAW utiliza o arame tubular com o auxílio de um gás de proteção no momento da soldagem. Com os dados obtidos nos processos de soldagens foi possível determinar a energia líquida de soldagem para cada processo onde o arame tubular foi superior em relação ao eletrodo revestido, tendo por consequência maior deposição de solda e maior zona termicamente afetada (ZTA), dados obtidos com o auxílio da metalografia feita em laboratório. Através do equipamento abrasômetro roda de borracha foi possível analisar a taxa de desgaste em função do tempo de duração do ensaio para cada corpo de prova, sendo eles com e sem revestimentos.

Palavras-chave: Processo de Soldagem. Aço SAE 1045. Abrasômetro Roda de Borracha.

1 INTRODUÇÃO

Buscando novas técnicas para aperfeiçoar os trabalhos e as ações voltadas para manter os equipamentos em produção, o setor cerâmico vem em busca de inovações de mercado e tecnologia com objetivo de reduzir os custos aumentando a produtividade e prezando a qualidade devido às altas exigências de mercado. Dentre os equipamentos contidos no decorrer do processo até o produto acabado pode se destacar a prensa hidráulica, onde é a partir daquele ponto que a matéria prima começa a ser transformada em produto seja ele piso, azulejo ou telha cerâmica.

Dentre as peças que compõe a prensa hidráulica encontramos o carro alimentador, ele tem a finalidade de fazer o carregamento da matéria prima até a

¹ Acadêmico Faculdade Satc. E-mail: jr-vendramini@bol.com.br;

² Professor Faculdade Satc. E-mail: adelor.costa@satc.edu.br.



cavidade da caixa matriz para posterior prensagem, dando forma ao produto cerâmico.

O carro alimentador é composto por trilhos onde os rolamentos ficam em contato, servindo como guias para que ele possa completar o ciclo de maneira apropriada. Entre o trilho do carro alimentador e os rolamentos não há lubrificação sendo que eles ficam em contato direto, sujeito a partículas sólidas proveniente do ambiente resultando a um desgaste abrasivo.

Desgaste por abrasão é o fenômeno que ocorre quando partículas duras deslizam ou são forçadas contra uma superfície metálica em relação à qual estão em movimento, provocando por deslocamento ou amassamento a remoção do material. De todos os diferentes tipos de desgaste, o desgaste abrasivo é o que ocorre em mais de 50% dos casos, sendo considerado como o mais severo e o mais comumente encontrado na indústria (KOTECKI, 1995).

A soldagem é classificada por um processo de união, porém, muitos processos de soldagem são utilizados para deposição de material sobre uma superfície, visando à recuperação de peças desgastadas ou para formação de um revestimento com características especiais (MARQUES, 2007).

O objetivo deste trabalho é avaliar a resistência ao desgaste abrasivo e a microestrutura de revestimentos duros depositados em camada única. Um com arames tubulares utilizando gás de proteção através do processo FCAW e um com Eletrodo revestido (ER) através do processo SMAW. Foram confeccionados corpos de prova sem quaisquer tipos de revestimentos com a finalidade de fazer uma análise comparativa em relação aos corpos de prova revestidos.

Devido a sua versatilidade os processos de soldagem são muito utilizados nos setores como o de projetos de fabricação e manutenção de máquinas e equipamentos podendo ser submetidos a diferentes ambientes de trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇO SAE 1045

As propriedades mecânicas dos aços-carbono variam quase exclusivamente em função do teor de carbono existente nas respectivas composições, pois, quanto maior o teor deste, menos dúctil e mais resistente a tração, enquanto diminuem em



tenacidade, alongamento e maleabilidade (VEIGA, 2011).

O aço carbono é basicamente uma liga de ferro e carbono, alcançando seus níveis de resistência e de dureza principalmente através da adição de carbono. Os aços carbono são classificados quanto à composição química em três grupos (CHIAVERINI, 2005), dependendo de seus níveis de carbono:

- Aços de baixo carbono, com até 0,2% carbono;
- Aço de médio carbono, variando entre 0,2% carbono até 0,5%;
- Aço de alto carbono, variando entre 0,5 % carbono até 2,0%.

Com 0,45% de carbono em sua composição, conforme Tab. 1, o aço SAE 1045 é classificado como aço de médio teor de carbono com boas propriedades mecânicas, com boa tenacidade e usinabilidade. As suas aplicações compreendem eixos, peças forjadas, engrenagens comuns, componentes estruturais de máquinas e virabrequim (AÇO SAE 1045, 2017).

Tabela 1: Composição Química do Aço SAE/AISI 1045 (Aço SAE 1045, 2017).

Aço Carbono		Composição Química (%)			
SAE/AISI	Carbono	Magnésio	Silício	Fósforo (máx)	Enxofre (máx)
1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,10-0,60	0,04	0,05

O aço SAE 1045 é aplicado na indústria metal mecânica devida suas características construtivas, encontrando uma boa resistência e baixo custo, podendo ser utilizado algumas técnicas de forjamento, com boa resposta a têmpera.

2.2 SOLDAGEM

Um grande número de processos utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas são abrangidos pelo termo "Soldagem", que por sua vez é considerada como um processo de união, porém muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície,



visando à recuperação ou o revestimento com características especiais (WAINER *et al.*, 2004).

A energia de soldagem é definida pela quantidade de energia empregada na soldagem por unidade de comprimento, também conhecida como aporte térmico (SENAI, 2013).

A energia de soldagem pode ser calculada conforme a equação (1) (WAINER *et al.*, 2004):

$$E = (\eta \cdot V \cdot I) / v \quad (1)$$

Onde:

E [J/cm]: Energia de soldagem η [%]: Eficiência térmica

V [V]: Tensão I [A]: Corrente

v [cm/min]: Velocidade de soldagem.

A eficiência térmica, Tab. 2, é uma característica de cada processo de soldagem, sendo que quanto maior for a energia de soldagem maior será a energia calorífica transmitida a peça (SENAI, 2013).

Tabela 2: Eficiência Térmica (SENAI, 2013).

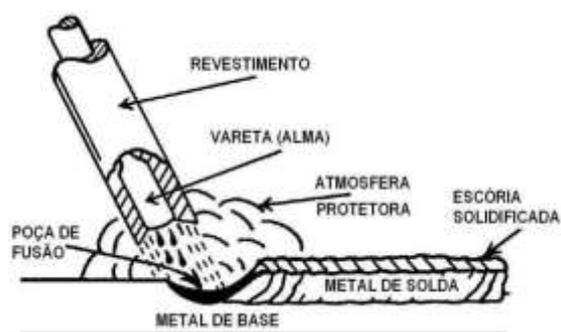
PROCESSO	EFICIÊNCIA
Soldagem TIG	20-50%
Soldagem MIG/MAG	70-85%
Soldagem por eletrodo revestido	70-80%
Soldagem po arame tubular	65-85%
Soldagem por arco submerso	90-99%

2.2.1 Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW)

De acordo com Fortes (2005), a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW – *Shielder Metal Arc Welding*), também conhecido como soldagem manual a arco elétrico (MMA), é um processo manual de soldagem que é realizado com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho, Fig. 1. O calor produzido pelo arco elétrico

funde o metal, a alma do eletrodo e seu revestimento de fluxo. Os gases produzidos durante a decomposição do revestimento e a escória líquida protegem o metal de solda da contaminação atmosférica durante a solidificação.

Figura 1: Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido.



Fonte: Fortes (2005).

A corrente de soldagem é o principal parâmetro que controla o volume da poça de fusão e a penetração da solda no metal base assim como o largura do cordão. Correntes muito elevadas produzem poças de fusão de grandes dimensões e difícil controle, além de poderem causar a degradação do revestimento, respingos excessivos, perda de resistência mecânica e tenacidade da solda (MARQUES, *et al.* 2007).

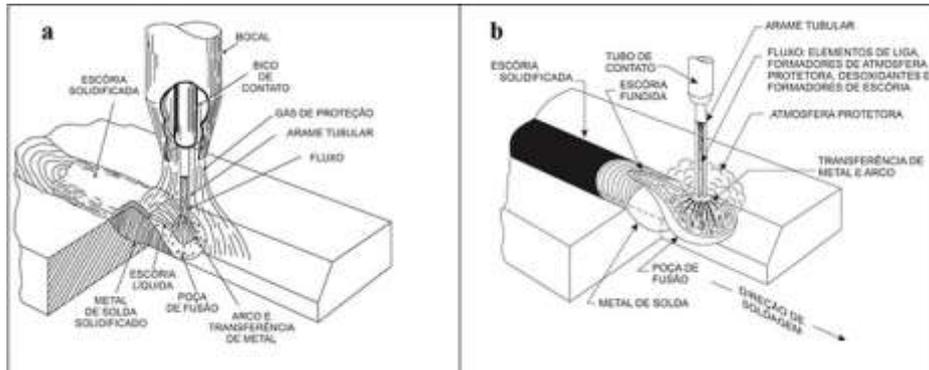
Devido à sua versatilidade de processo e da simplicidade de seu equipamento e operação, a soldagem com eletrodo revestido é um dos mais populares processos de soldagem, podendo ser utilizado em todas as posições (plana, vertical, horizontal, sobre cabeça). Pode ser utilizado para revestimentos, corte e goivagem, e principalmente utilizado para soldar ferro e aço (incluindo o aço inoxidável), podendo ser soldadas com esse método ligas de níquel, alumínio e cobre (FORTES, 2005).

2.2.2 Soldagem a Arco Elétrico com Arame Tubular (FCAW)

A soldagem a arco elétrico com arames tubulares (FCAW – *Flux Cored Arc Welding*), é um processo que promove a união de metais pelo aquecimento destes através de um arco elétrico estabelecido entre a ponta do arame e a peça de trabalho. A proteção da poça de fusão e do arco elétrico pode ser feita pelo fluxo contido no

interior do arame, Fig. 2 b, ou por uma fonte gasosa externa, Fig. 2 a (FORTES, 2004).

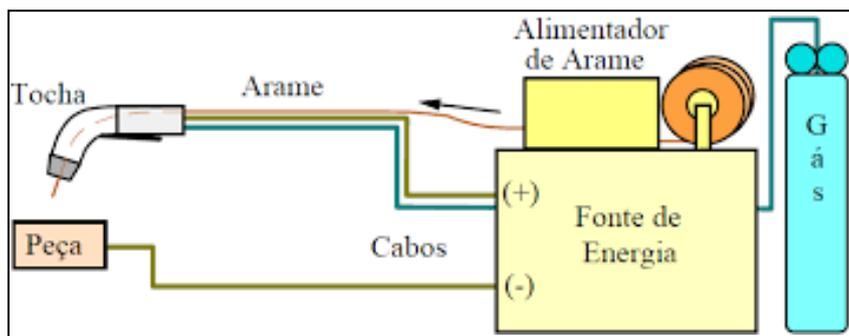
Figura 2: Processo de soldagem com arame tubular: a - soldagem com arames tubulares utilizando gases de proteção; b - soldagem com arames tubulares autoprotetidos.



Fonte: Fortes (2004)

Segundo Marques *et al.* (2007) os equipamentos básicos para a soldagem FCAW são compostos por uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem e um cilindro de gás de proteção, caso necessário, além de cabos e mangueiras, conforme a Fig. 3.

Figura 3: Equipamentos Básicos para soldagem FCAW.



Fonte: Marques *et al.* (2007)

Os equipamentos utilizados na soldagem com arames tubulares são praticamente os mesmos da soldagem MIG/MAG, onde se diferencia no sistema de alimentação de arame, sendo necessária a substituição das roldanas lisas utilizadas com arames sólidos, por roldanas recartilhadas, especialmente desenvolvidas para alimentação de arames tubulares (FORTES, 2004).

Para Fogagnolo (2011), os gases de proteção utilizados para o processo de



soldagem com arame tubular é o gás carbônico (CO₂) e misturas contendo argônio. De acordo com Fortes (2004), esta proteção gasosa é realizada na maioria das vezes utilizando 100% CO₂ como gás de proteção e em alguns casos utilizando misturas 75%Ar/25% CO₂.

A qualidade do cordão de solda é influenciada por alguns parâmetros, como intensidade de corrente, tensão e comprimento do arco, velocidade de soldagem, extensão do eletrodo, gases de proteção, diâmetro do eletrodo, posição da tocha e técnicas de manipulação. Já a escolha para a corrente de soldagem é feita a partir da espessura das peças a serem soldadas, do diâmetro do eletrodo e das características do cordão (SENAI, 2013).

Tabela 3: Faixas de correntes utilizáveis com arames de diferentes diâmetros e diferentes materiais.

Material	Diâmetro do eletrodo (mm)	Faixa de Corrente (A)
Aço Carbono e Baixa Liga	0,8	70 – 180
	1,0	90 – 220
	1,2	100 – 270
	1,6	190 – 360
	2,4	280 – 490
	3,2	270 – 580

Fonte: Marques *et al* (2007)

Esse processo de soldagem é amplamente aplicado na indústria, pode ser utilizado nos modos automático, semiautomático e mecanizado. Utilizado em metais tais como aço carbono e de baixa liga e aço inoxidável podendo ser soldados em todas as posições de soldagem através da escolha apropriada do gás de proteção se for necessário, o consumível e as variáveis de soldagem (MARQUES *et al.*, 2007).

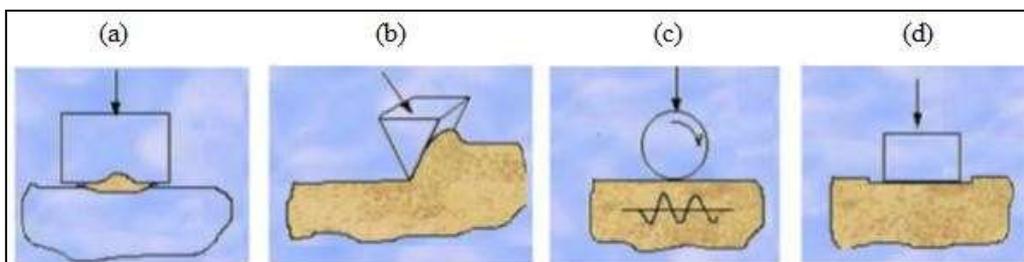
2.3 TRIBOLOGIA

A tribologia é um campo da ciência que estuda os fenômenos de atrito, desgaste e lubrificação que incide sobre a interação das superfícies em movimento relativo de sólidos contra sólidos, líquidos ou gases.

Segundo a norma DIN 50320 (1979), o desgaste é definido como sendo a perda progressiva de material de um corpo sólido devido à ação mecânica, ou seja, devido ao contato e ao movimento relativo de um corpo sólido contra outro corpo sólido, líquido ou gasoso. Para König (2007) consiste em um somatório de fenômenos complexos, ocorrendo principalmente devido ao escorregamento e impacto de partículas duras contra a superfície, mesmo na presença de lubrificantes.

Segundo Yamagushi (1990), o estudo da Tribologia bem como dos mecanismos de desgaste que ocorrem em diversos setores industriais, é fundamental para aperfeiçoar a seleção dos materiais envolvidos no sistema tribológico, preverem a durabilidade do sistema, e minimizar as perdas e paradas no processo produtivo devido ao desgaste, reduzindo assim os custos de manutenção. Este tipo de estudo pode ser realizado de forma experimental, com equipamentos que simulam as condições tribológicas existentes no sistema, aproximando a situações reais. Sendo assim, os equipamentos que se destinam à simulação de sistemas tribológicos devem ser específicos para o tipo ou mecanismo de desgaste que se pretende estudar.

Figura 4: Mecanismos de desgastes conforme DIN 50320: a - desgaste adesivo; b - desgaste abrasivo; c - fadiga de contato; d – reação triboquímica.



Fonte: König (2007).

Os diferentes tipos de desgastes, Fig. 4, ocorrem em peças em movimentos utilizadas em máquinas e equipamentos. Em ambientes industriais, o desgaste em respectiva porcentagem de ocorrência podem-se apresentar como: abrasão 50%, adesão 15%, erosão 8%, fricção 8% e corrosão 5% (SENAI, 2013).

2.4 DESGASTE ABRASIVO

De acordo com König (2007), o desgaste abrasivo consiste no deslocamento

e perda de material causado pela presença de partículas entre duas superfícies em movimento relativo.

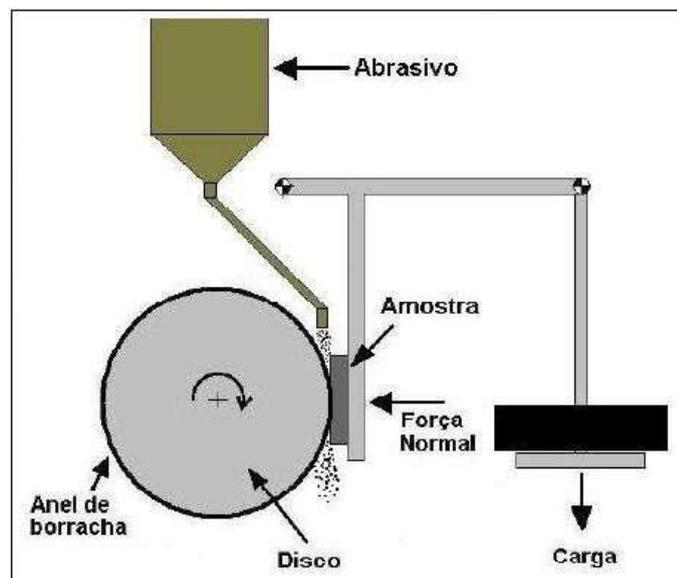
Estas partículas podem estar livres ou engastadas em uma ou nas duas superfícies, sendo que sua origem está geralmente associada a uma das situações abaixo:

- Entrada de impurezas oriundas do meio no qual o tribosistema está inserido;
- Produtos de algum processo químico, como a oxidação;
- Fragmentos de desgaste de materiais de dureza elevada;
- Partículas com alta resistência presentes nos materiais, como carbonetos.

2.5 ABRASÔMETRO RODA DE BORRACHA (*RUBBER WHEEL TESTING*)

O equipamento Abrasômetro Roda de Borracha, Fig. 5, é utilizado para ensaios de desgaste por abrasão à baixa tensão, onde o material a ser ensaiado é submetido às condições reais de trabalho, o procedimento é estabelecido pela norma ASTM G 65.

Figura 5: Abrasômetro Roda de Borracha.



Fonte: Lima (2008)

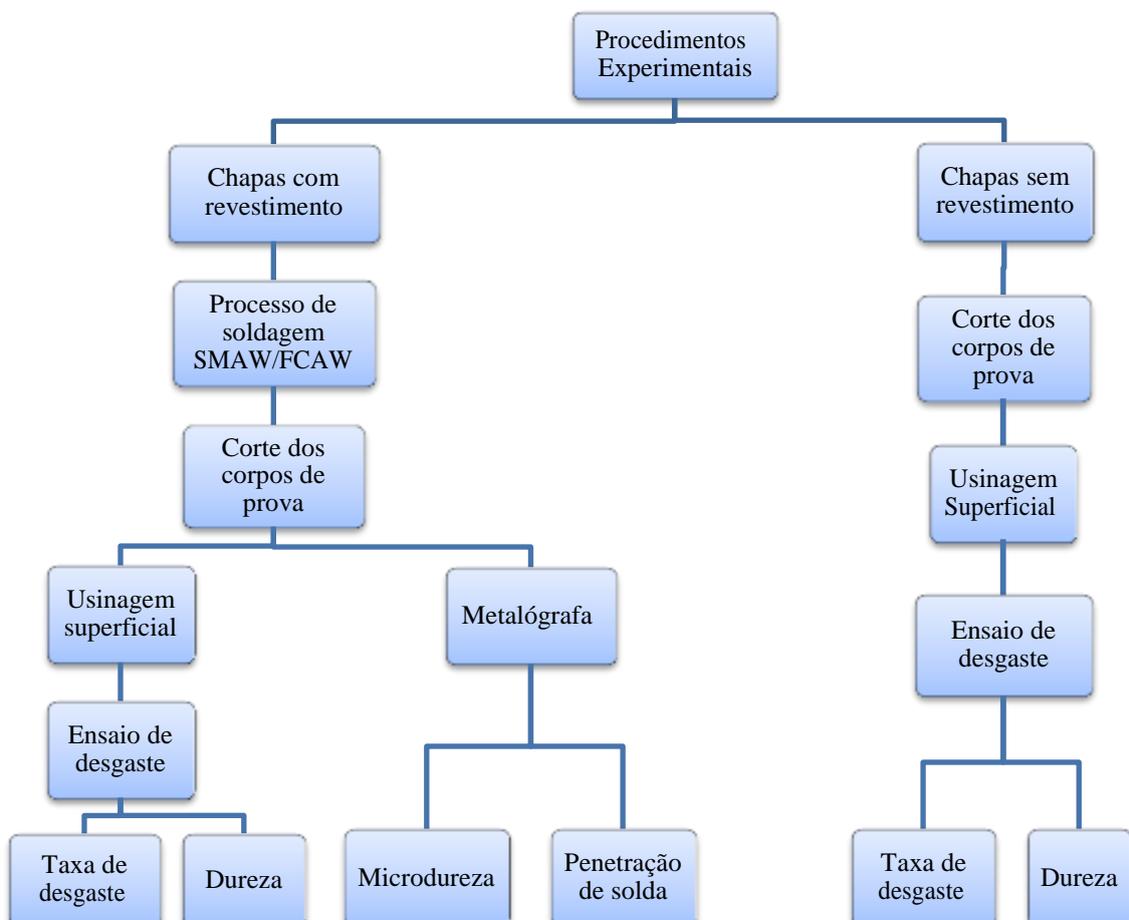
O princípio de funcionamento é esmerilhar o corpo de prova padronizado através de um abrasivo (areia com tamanho de grão e composição controlados). Ele é

introduzido entre a amostra (corpo de prova) e a roda de borracha com uma dureza específica, provocando assim o riscamento superficial (LIMA, 2008).

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A metodologia deste trabalho se baseia em um estudo do aço SAE 1045 submetido ao desgaste abrasivo. O fluxograma da Fig. 6 nos permite visualizar a sequência dos procedimentos experimentais do referente trabalho bem como os materiais e métodos utilizados.

Figura 6: Fluxograma dos procedimentos metodológicos.



Foram utilizadas nove chapas testes para retirada dos copos de prova de



aço SAE 1045 submetidos a diferentes tipos de análises sendo que foram divididos em três grupos (A, B e C) resultando em três corpos de prova para cada. O grupo A foi revestido através do processo SMAW que utiliza eletrodo revestido como consumível, já o grupo B foi revestido através do processo FCAW que utiliza arame tubular como consumível e o grupo C compreende apenas o metal de base utilizado sem quaisquer tipos de revestimento.

3.1 PARÂMETROS DE SOLDAGEM DAS AMOSTRAS

Nos procedimentos de soldagem foi adotado o método manual de soldagem na posição 1G (plana) em CC+, compreendendo que o negativo da máquina está ligado na mesa de soldagem e o positivo no consumível. O processo de revestimento por soldagem foi efetuado com dois tipos de consumíveis (eletrodo revestido e arames tubulares).

Para o processo SMAW, foi utilizada uma fonte de potência (transformador retificador) da marca ESAB modelo Origo Arc 406. O eletrodo revestido é da marca ESAB com 4 mm de diâmetro e constituído por uma liga de C-Cr-Mo aplicado para revestimentos anti-desgaste por atrito, compressão, impacto e abrasão.

Para o processo FCAW, foi utilizada uma fonte de potência (transformador retificador) da marca ESAB modelo LAI 407, um carretel para alimentação do arame da marca ESAB modelo MEF 44N e um cilindro de gás para proteção no processo de soldagem constituído de 75 % Argônio (Ar) e 25 % de Gás Carbônico (CO₂). O arame tubular utilizado foi da marca Solenge, com 1,2mm de diâmetro e constituído de uma liga martensítica resistente à fricção, a abrasão e impactos moderados.

Os parâmetros de soldagem estão alocados na Tab. 5, as faixas de dureza a ser obtida pelo metal de solda em primeira camada e a composição dos consumíveis estão expostas na Tab. 4, onde os dados foram obtidos através do fabricante conforme a norma AWS A 5.18.

Tabela 4: Dados dos consumíveis fornecidos pelo fabricante.

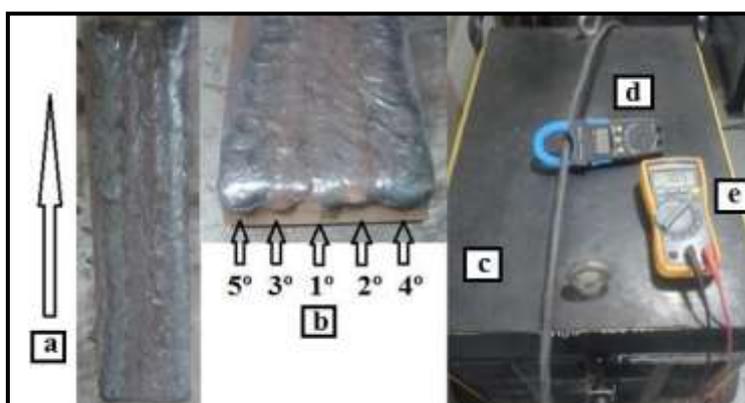
Consumível	Tipo	Dureza (HRc)	Composição Química (%)					
			C	Mn	Si	Cr	Mo	Ti
Arame Tubular	SK 600 G	59	0,52	1,50	1,20	5,90	0,80	0,10
Eletrodo Revestido	E 83.58	60	0,60	0,70	0,60	6,80	0,5	-

Tabela 5: Parâmetros dos consumíveis fornecidos pelo fabricante para o processo de soldagem: V.s. - tensão de soldagem; I.s. - corrente de soldagem.

Tipo de Consumível	Diâmetro (mm)	V.s. (V)	I.s. (A)	Tipo de Corrente
Arame Tubular	1,2	25 – 34	150 - 300	CC
Eletrodo Revestido	4,0	20 – 27	145 - 190	CA

A soldagem foi efetuada em camada única, com cordões de 200 mm de comprimento, constituindo cinco cordões para o revestimento em sentido longitudinal sendo que a seqüência de soldagem foi intercalada do centro para extremidades, utilizando substrato, metal base, chapas de aço SAE 1045 de 12,7 x 50,8 x 200 mm, conforme a Fig. 7 e Fig. 8.

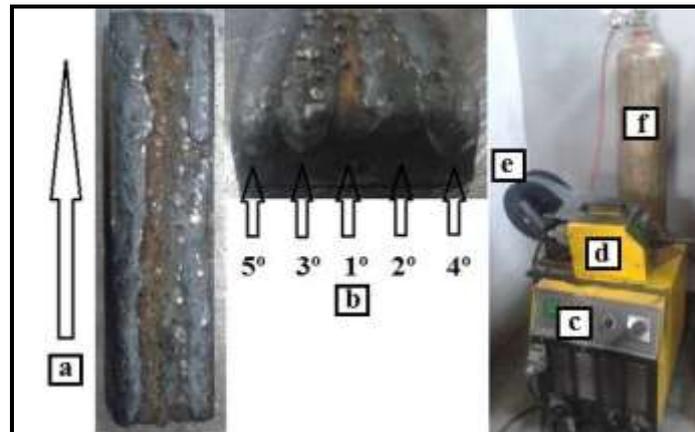
Figura 7: Soldagem das chapas pelo processo SMAW: a - sentido de soldagem; b - seqüência de soldagem; c - fonte de soldagem; d - amperímetro digital; e - multímetro digital.



No processo por soldagem a arco elétrico os dados experimentais, como corrente e tensão de soldagem foram adquiridos com o auxílio de um multímetro e um

amperímetro digital da marca Minipa, com o objetivo de obter os valores reais no momento da soldagem.

Figura 8 - Soldagem das chapas pelo processo FCAW: a - sentido de soldagem; b - sequencia de soldagem; c - fonte de soldagem; d - carretel de alimentação; e - consumível; f - gás de proteção.



Para medição da largura dos cordões de solda foi utilizado um paquímetro de 0 – 150 mm da marca Mitutoyo com precisão de 0,05 mm, a altura do cordão foi utilizado um calibre de solda de 0 – 40 mm da marca Carbografite, a temperatura superficial antes e após soldagem foi utilizado um pirômetro da marca Minipa modelo MT-350 e o tempo de soldagem de cada cordão foi mensurado através de um cronômetro digital. Esse procedimento foi utilizado para ambos revestimentos, Fig. 9.

Figura 9: Equipamentos utilizados para aquisição dos dados nos procedimentos de soldagem: a - cronômetro digital; b - calibre de solda; c - paquímetro; d - pirômetro.

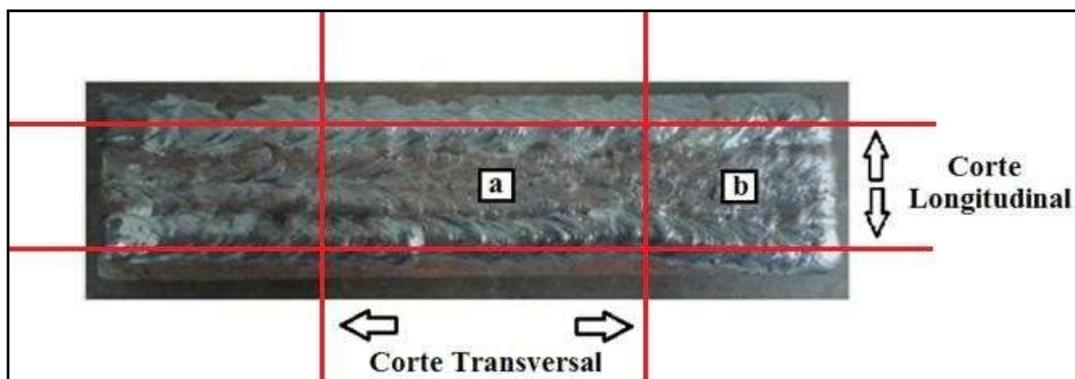


A sobreposição dos cordões de solda foi efetuada em média 20 % uns sobre o outro para garantir o completo revestimento do metal base.

3.2 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram retirados da parte central das chapas com e sem revestimento. Conforme a norma ASTM G 65, os corpos de prova para o ensaio de desgaste e durezas superficiais serão retangulares e deverão ter as dimensões finais de 12x26x75mm de acordo com a região “a” da Fig. 10 e para metalografia foi analisado a extremidade da chapa no corte transversal, conforme a região “b” da Fig. 10, resultando em uma amostra para cada processo.

Figura 10: Corte dos corpos de prova das chapas revestidas: a - CP para ensaio de desgaste; b - CP para Metalografia.



Os corpos de prova extraídos das chapas testes foram numerados em relação a suas respectivas características conforme a Tab. 6.

Tabela 6: Identificação dos corpos de prova utilizados nos procedimentos.

Nº	Quant.	Formato (ExLxC)	Tipo de Revestimento	Ensaio	Medições
1					Taxa de desgaste
2					Microdureza
3	3	12x26x75	Eletrodo Revestido	Desgaste ASTM G 65 Metalografia	Dureza Penetração de solda
4					Taxa de desgaste
5					Microdureza
6	3	12x26x75	Arame Tubular	Desgaste ASTM G 65 Metalografia	Dureza Penetração de solda
7					Taxa de
8	3	12x26x75	Sem Revestimento	Desgaste ASTM G 65	Desgaste
9					Dureza

3.3 AVALIAÇÃO de Desgaste

Para o ensaio de desgaste abrasivo foi utilizado o equipamento abrasômetro Roda de Borracha, Fig. 11, com a finalidade de medirmos a resistência ao desgaste superficial dos corpos de prova, de acordo com a norma ASTM G 65.

Figura 11: Equipamento abrasômetro Roda de Borracha: FN - força normal atuante no corpo de prova; P - célula de carga; a: motor e redutor.



De acordo com a norma vigente do processo de desgaste o revestimento no material de base utilizado nos corpos de prova se caracteriza no procedimento A onde, a vazão da areia que servirá como material abrasivo entre o disco e o corpo de prova foi de 400 g/min, com uma célula de carga de 5 Kg tendo uma força atuante no corpo de prova em contato com o disco de 130 N. O disco é revestido de borracha com uma dureza de 60 shore e trabalha com uma rotação de 200 rpm.

O ensaio teve duração total de 30 min subdivididos em cinco tempos de 6 min para cada corpo de prova, com objetivo de avaliar a taxa de desgaste do material em função do tempo.

A areia utilizada como abrasivo no ensaio foi submetido a uma temperatura de 200 °C durante 15 min através de um forno, com a finalidade de retirarmos toda sua umidade e com auxílio de peneiras chegamos a uma granulometria final de 0,35 mm.

Antes de serem utilizados no respectivo ensaio, os corpos de prova foram encaminhados para o serviço de usinagem sendo retificado o lado do revestimento e fresando o lado oposto dos corpos de prova com a finalidade de adequação das medidas em relação à norma, conforme a Fig. 12, devido a sobreposição do metal de adição.

Figura 12: Corpos de prova para ensaio de desgaste.



Foram utilizados alguns equipamentos para coleta dos dados durante o processo tais como um tacômetro da marca Instrutherm modelo TDR-100 com precisão de 0,1 rpm, uma balança de precisão da marca Marte modelo AD 500 com capacidade mínima de 0,02 g e máxima de 510 g de pesagem com precisão de 0,001 g, um limpador ultrasônico da marca Panambra modelo USC 700 com uma potência

ultra-sônica de 45 watts e frequência ultra- sônica de 55 KHz, um secador automotivo da marca DWT modelo HLP 20-550 com 2000 watts de potência, álcool etílico hidratado 46° e algodão para limpeza dos corpos de prova, conforme a Fig. 13.

Figura 13: Equipamentos utilizados para coleta de dados de análise de desgaste: a - limpador ultrassônico; b - balança de precisão; c - álcool; d - algodão; e - tacômetro; f - secador automotivo.



3.3.1 Dureza

Para mensurar a dureza superficial dos corpos de prova, utilizado no ensaio de desgaste, foi utilizado o equipamento Durômetro da marca Mitutoyo modelo HR-400, Fig. 14.

Foi adotado o método Rockwell Superficial, onde se utilizou um penetrador de ponta cônica com 120° de conicidade e aplicando uma força na ponta do endentador de 15 N na superfície desejada.

Figura 14: Equipamento utilizado para medição da dureza superficial do CP.

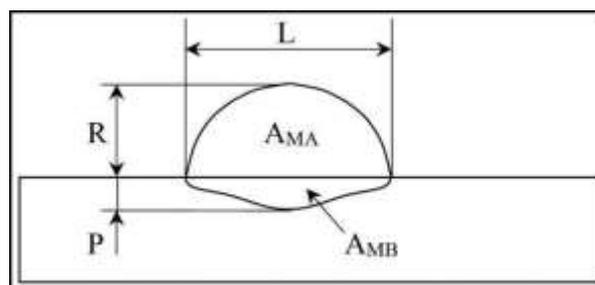


Esse equipamento consiste em uma pequena marca de endentação na superfície da peça permitindo comparar a dureza superficial dos revestimentos dos corpos de prova tendo como base a especificada pelo fabricante de cada consumível, e assim ter um controle maior de qualidade dos processos.

3.4 METALOGRAFIA

Com uma câmera da marca Olympus integrada ao microscópio óptico e através do software analySIS getIT foi possível analisar cada corpo de prova referente a cada processo de soldagem, realizando medições quanto à penetração (P), largura (L), reforço do cordão de solda (R) e dureza das camadas, conforme Fig. 15.

Figura 15 - Modelo das dimensões retiradas dos corpos de prova (Modenesi, 2012).



Foram retirados amostras das chapas revestidas para a análise do material de adição no metal base, conforme a Fig. 16. Elas passaram por um processo de lixamento onde foram utilizada lixa de grana 80 a 1200 e polidas posteriormente com alumina nº 04 com granulometria de 1 μm . Logo, foram atacadas com reagente Nital 2% por 5 segundos para revelar os microconstituintes e levadas ao microscópio óptico para a observação da microestrutura.

Figura 16: Amostra do metal base revestido para análise metalográfica.

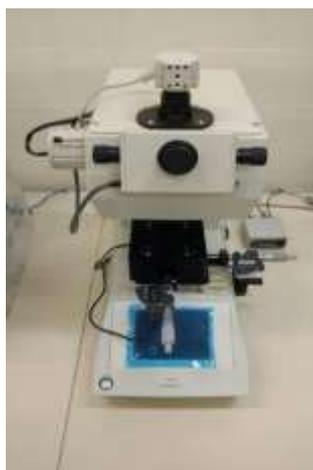


Com a metalografia da amostra da Fig. 16, foi possível mensurar e analisar sua microestrutura, sendo analisada uma amostra para cada processo.

3.4.1 Microdureza

Para análise das camadas de dureza das amostras retiradas dos corpos de prova foi utilizado o equipamento da marca Shimadzu HMV-2TADW, Fig. 17. O ensaio de microdureza Vickers (HV) utiliza um penetrador piramidal de base quadrada. Após a penetração, são medidas as diagonais da região endentada e o valor médio dessas medições, são utilizados para calcular a microdureza Vickers de acordo com a norma ASTM E384-11e1.

Figura 17: Microdurômetro



Com a endentação feita nas camadas desejada no corpo de prova, foi possível retirar as medidas de forma eletrônica das camadas de dureza dos consumíveis depositados até o metal de base utilizado.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 SOLDAGEM

Para a soldagem das chapas testes foram utilizados alguns parâmetro para execução do revestimento duro, onde alguns desses foram coletados com auxílio de



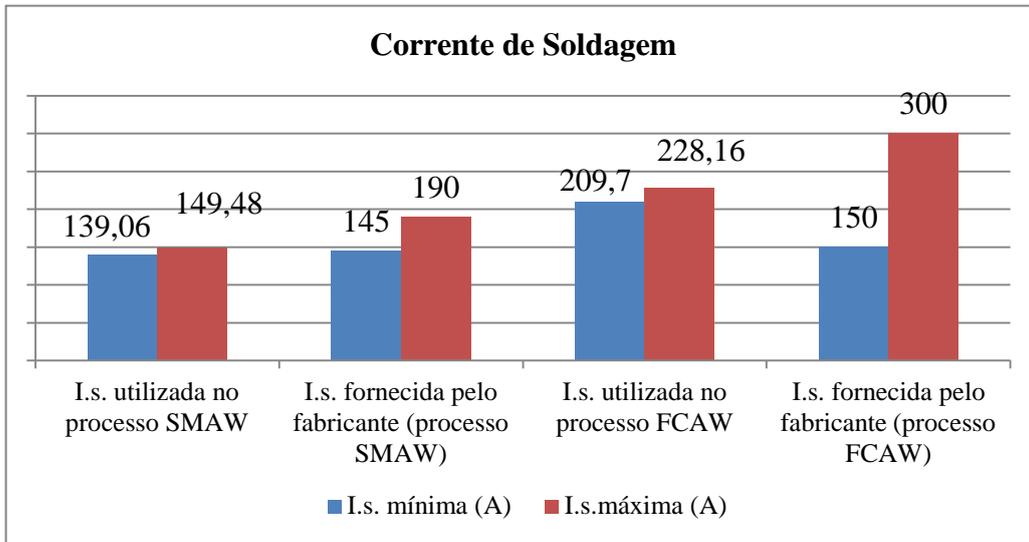
equipamentos nos dando uma maior exatidão dos processos. A média dos valores com o seu respectivo desvio padrão estão na Tab. 7.

Tabela 7: Parâmetros utilizados para o processo SMAW e FCAW nas chapas revestidas.

Parâmetros	Valores Nominais	
Identificação	1; 2; 3	4; 5; 6
Tipo de Revestimento	SMAW	FCAW
Consumível	Eletrodo Revestido	Arame Tubular
Tipo do Consumível	E 83.58	SK 600 G
Diâmetro do Consumível (mm)	4	1,2
Tensão de Soldagem V.s. (V)	20,57	23,78
Desvio Padrão V.s.	1,32	2,03
Corrente de Soldagem I.s. (A)	144,27	218,93
Desvio Padrão I.s.	5,21	9,23
Temp. Inicial do Substrato pré Sold. (°C)	25	25
Temp. Final do Substrato pós Sold. (°C)	306	369
Tempo de Soldagem (s)	56	45
Velocidade de Soldagem (cm/s)	0,357	0,444
Altura do Cordão de Solda (mm)	2,5	3
Lagura do Cordão de Solda (mm)	10	10
Quantidade de Cordão de Solda	5	5
Gás de Proteção	-	75% (Ar) 25% (CO ₂)
Vazão de Gás de Proteção (L/min)	-	12
Velocidade do Arame (m/min)	-	10
Distância da Tocha no C.P. (mm)	-	10
Eficiência Térmica (η)	0,7	0,65
Energia Líquida de Soldagem (KJ/cm)	5,88	7,97

Com os dados adquiridos durante o processo de soldagem foi possível encontrar a energia líquida de soldagem pertinente a cada revestimento do respectivo processo.

Figura 18: Gráfico comparativo da corrente de soldagem utilizada nos dois processos.

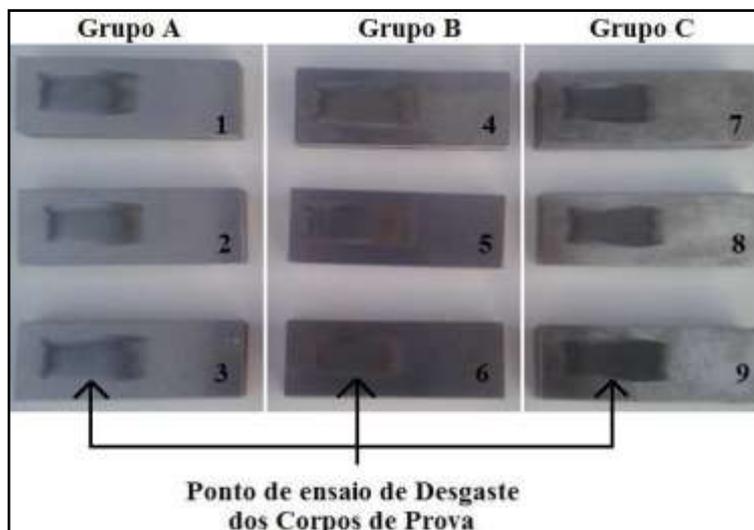


O gráfico da Fig. 18 nos mostra a faixa de corrente aplicado para execução das soldagens nas chapas testes, onde o processo SMAW ficou na faixa mínima e o FCAW ficou na faixa intermediária estabelecida pelo fabricante de cada consumível.

4.2 ENSAIO DE DESGASTE

Foram realizados ensaios de desgaste no metal base e nos corpos de prova revestidos superficialmente pelo processo SMAW e FCAW, conforme a Fig. 19, a fim de comparar a taxa de desgaste abrasivo em função do tempo através do equipamento abrasômetro Roda de Borracha.

Figura 19: Corpos de prova submetidos aos ensaios de desgaste.





A Tab. 8 apresenta os resultados da avaliação da taxa de desgaste dos corpos de prova utilizado no ensaio, sendo que as medições foram feitas em cinco intervalo de 6 min totalizando 30 min de ensaio. Para melhor entendimento os corpos de prova foram separados em grupos denominados A, B, C.

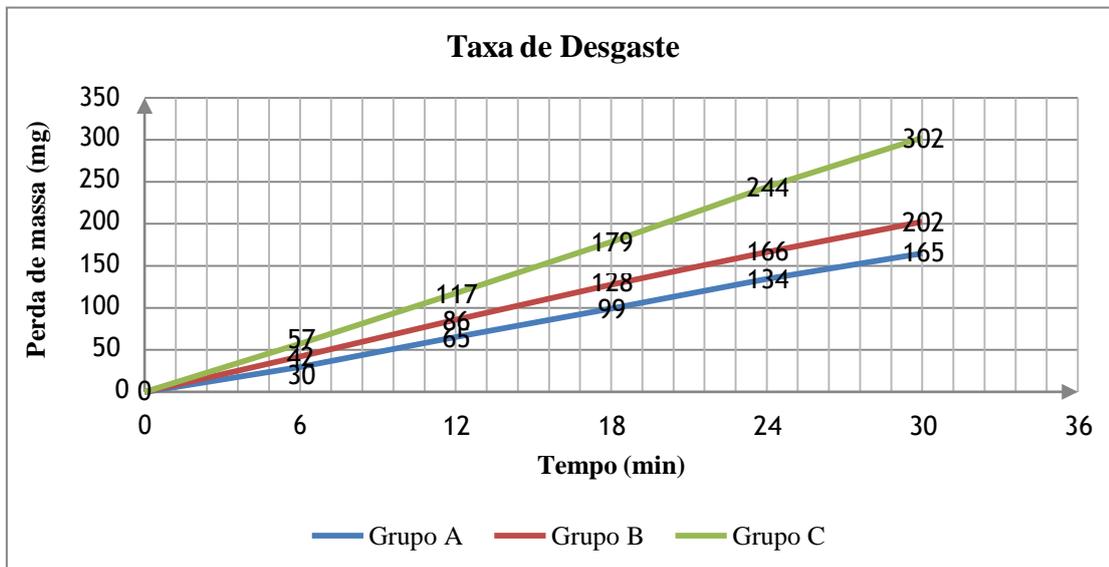
Tabela 8: Média de valores obtidos durante o ensaio no equipamento Abrasômetro Roda de Borracha.

Parâmetros	Valores Nominais		
	A	B	C
Grupo	A	B	C
Identificação	1; 2; 3	4; 5; 6	7; 8; 9
Tipo de Revestimento	SMAW	FCAW	metal base
Dureza Superficial (HRn)	88	88,16	65,67
Desvio Padrão de Dureza	0,85	0,35	0,55
Dureza Superficial (HRc)	55,2	55,2	-
Peso inicial (g)	182,163	181,336	177,937
Peso em 6 min (g)	182,133	181,294	177,880
Peso em 12 min (g)	182,098	181,250	177,820
Peso em 18 min (g)	182,064	181,208	177,758
Peso em 24 min (g)	182,029	181,170	177,693
Peso em 30 min (g)	181,198	181,134	177,635

O método utilizado para mensurar a dureza superficial dos corpos de prova foi o Rockwell nos dando valores em HRn e assim convertermos através de tabelas para HRc. O método de escolha teve como base a relação dos revestimentos duro depositado sobre a superfície do corpo de prova.

O grupo C por sua vez não foi possível fazer a conversão da medição da dureza superficial, devido não ter sido aplicado revestimento sobre os corpos de prova. Pelo fato do material ter uma dureza baixa o método apropriado para essa medição seria o Brinell, que utiliza um penetrador esférico de 10 mm de diâmetro.

Figura 20: Gráfico Taxa de Desgaste x Tempo

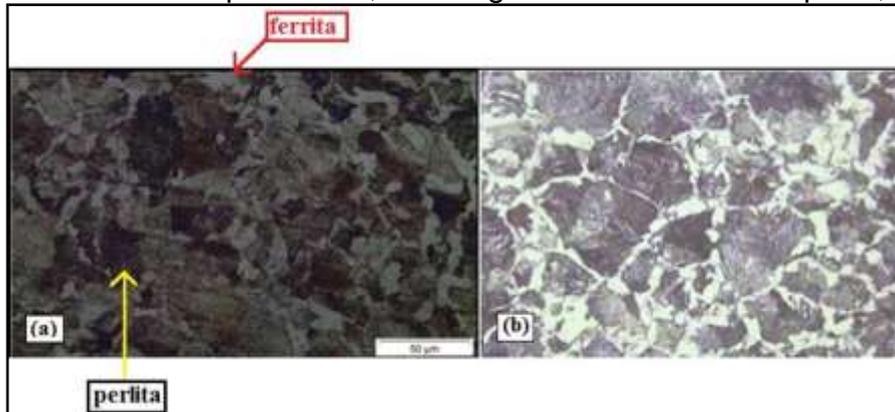


Para uma melhor visualização dos resultados o gráfico da Fig. 20 mostra a taxa de desgaste dos corpos de prova no decorrer dos ensaios. Dentre os corpos de prova submetidos ao ensaio podemos destacar o corpo de prova revestido através do processo SMAW com menor taxa de desgaste entre eles, em seguida o processo FCAW e por fim o corpo de prova sem revestimento com maior taxa de desgaste.

4.3 METALOGRAFIA

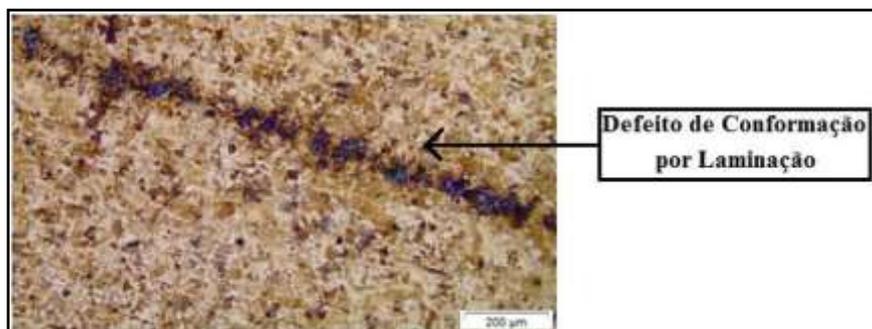
A extração de uma parte da chapa teste antes do processo de soldagem se faz necessária para compararmos suas características construtivas através da metalografia.

Figura 21: Metalografia do material base aço SAE 1045 aumentado em 500x. a - metal base utilizado no experimento; b - Imagem de referência Colpaert, 2008.



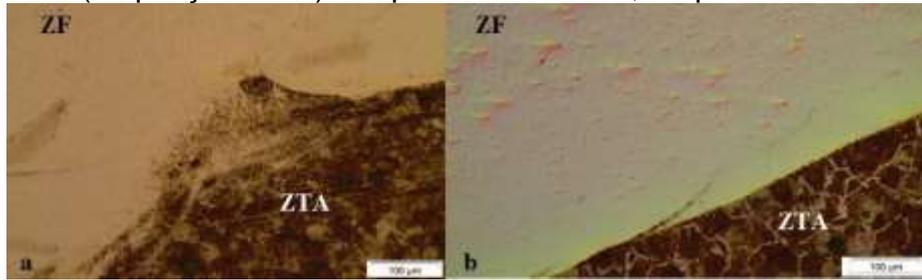
A estrutura da amostra em análise é composto de ferrita (localizado na parte esbranquiçada) e perlita (localizada na parte escura), onde o número de perlita faz-se predominante característica essa dos aços de médio carbono. Comparando o metal base (Fig. 21 a) utilizado em relação ao da literatura (Fig. 21 b) houve uma grande semelhança com a do aço SAE 1045 de acordo com a quantidade, o formato e o contorno dos grãos.

Figura 22: Defeito de conformação por laminação da chapa de aço SAE 1045 utilizado no experimento (ampliação 100x).



No decorrer da metalografia foi encontrado uma falha no material de base utilizado nos distintos processos conforme a Fig. 22, caracterizada por um defeito de conformação por laminação.

Figura 23: Metalografia dos revestimentos utilizados e a zona de transição para o metal base (ampliação 200x). a - processo SMAW; b - processo FCAW.



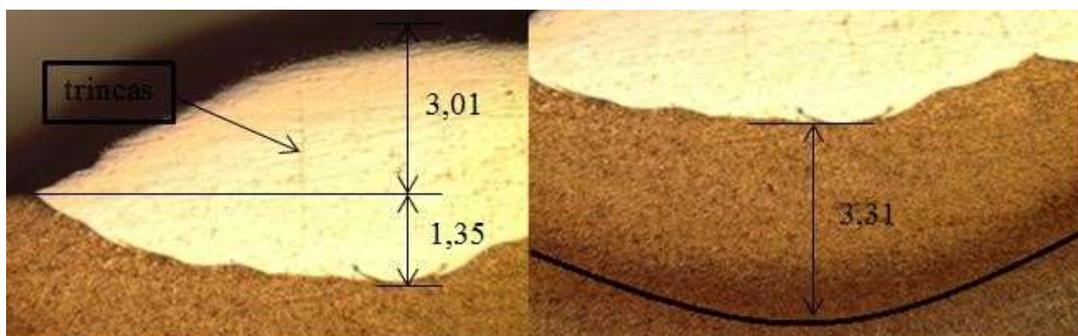
Nos dois processos de soldagem o resfriamento pós soldagem foi através da temperatura ambiente fazendo com que haja um índice de martensita predominante no revestimento depositado devido à velocidade de resfriamento resultando em uma tempera do material. Sua dureza se dá através do teor de carbono e seus elementos de liga que o compõe.

Devido à energia líquida de soldagem ter sido maior no processo FCAW tendo por consequência a formação de grãos maiores em primeira camada da ZTA e assim por consequência tendo uma área do material menos dúctil.

4.3.1 Macrografia

A Fig. 24 e Fig. 25 mostra a macrografia com ampliação de 12,5 x do perfil de revestimento duro depositado sobre as chapas de aço SAE 1045, tendo por finalidade obtermos a penetração de solda, a altura do cordão e a zona termicamente afetada (ZTA).

Figura 24: Macrografia (ampliação 12,5 x) do Processo SMAW.



Com o revestimento duro através do processo SMAW, Fig. 24, foi adquirido

um sobre metal de 3,01 mm e uma penetração do revestimento de 1,35 mm no metal de base. O processo de soldagem gera aquecimentos durante a deposição do consumível alterando o tamanho e organização dos grãos nos dando a um ZTA de 3,31 mm abaixo da penetração de solda.

Com a análise da região onde está depositado o revestimento duro foi encontrado trincas no revestimento podendo acarretar em problemas futuros.

Figura 25: Macrografia (ampliação 12,5 x) do Processo FCAW.



Com o revestimento duro através do processo FCAW, Fig. 25, foi adquirido um sobre metal de 3,44 mm e uma penetração de 1,35 mm no metal de base. A zona termicamente afetada (ZTA) foi de 4,75 mm sendo superior ao processo SMAW da Fig. 24. Devido à energia líquida de soldagem ter sido superior tendo resultado uma temperatura de pós- soldagem mais alta. Com a análise do revestimento duro depositado foi encontrado inclusões na zona fundida (ZF) devido a impurezas proveniente do próprio substrato ou adquiridas durante o processo de soldagem como respingos.

4.4 MICRODUREZA

Para verificar o perfil de dureza ao longo da seção, os corpos de prova foram submetidos à dureza Vickers (HV), realizando o ensaio em todas as camadas dos corpos de prova. As endentações possuem espaçamento de 0,5 mm de cada medida partindo da superfície, onde o consumível foi depositado, em sentido ao material de base.

Figura 26: Gráfico do perfil de dureza (HV) das camadas do material revestido pelo processo SMAW: MA - material de adição; ZTA - zona termicamente afetada; MB - metal base.

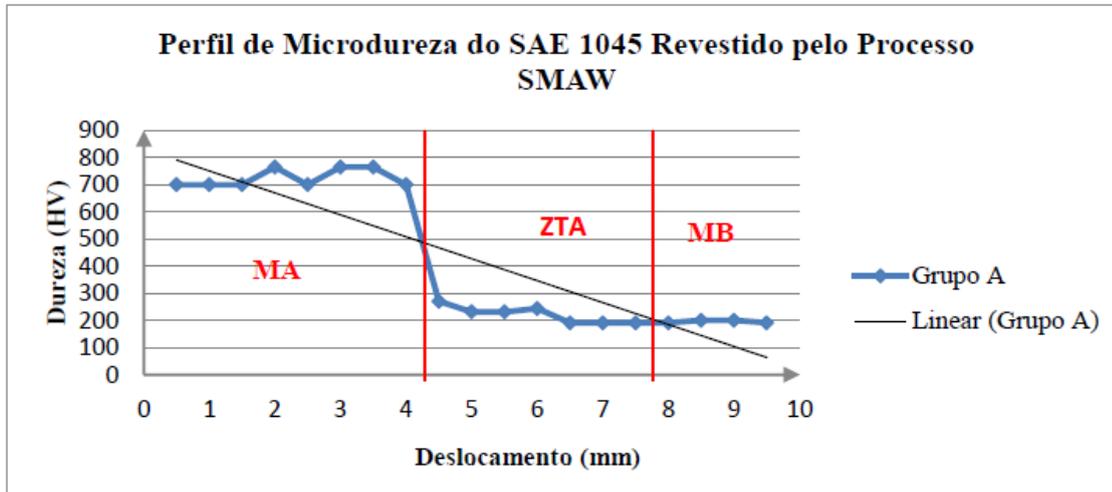
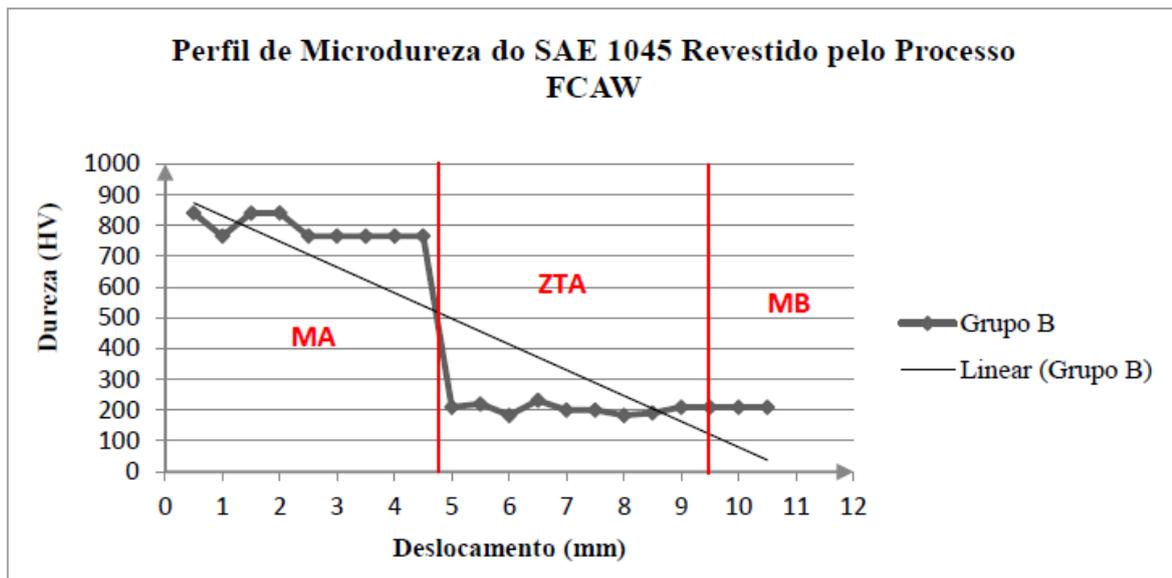


Figura 27: Gráfico do perfil de dureza (HV) das camadas do material revestido pelo processo FCAW.



As regiões citadas nas Fig. 26 e 27 foram baseadas nas medições feitas em análise macrográfica dos materiais. Dependendo o ponto onde o penetrador faz endentação no revestimento seus picos de dureza podem variar devido à formação de martensitas localizada na zona MA (material de adição = altura do cordão + penetração) do gráfico. A microdureza das camadas do ZTA não teve diferença em relação à do material de base.



CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste trabalho, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- A taxa de deposição do metal de adição foi maior no processo FCAW devido sua alimentação ser contínua, mas no decorrer do processo de soldagem observou-se um índice excessivo de respingos, gerando impurezas indevidas na região da solda;
- O corpo de prova revestido através do processo SMAW teve o melhor índice na análise em resistência ao desgaste em relação aos demais;
- A dureza superficial dos revestimentos depositados se mostrou inferior ao fornecido pelo fabricante em ambos os consumíveis;
- O revestimento dos corpos de prova através do processo SMAW apresentou trincas visíveis perpendiculares no cordão já o arame tubular não apresentou trincas;
- O uso de uma energia muito elevada na primeira camada tende para um elevado crescimento de grão da ZTA, prejudicando a tenacidade da mesma;
- O corpo de prova sem revestimento teve uma dureza inferior aos demais tendo em vista que estava apenas em seu material normalizado e como consequência pior índice de resistência ao desgaste.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Um estudo de tratamento térmico no aço SAE 1045, tendo em consideração que o material utilizado na régua do carro alimentador não é tratado termicamente.
- Realizar um estudo utilizando a mesma vazão de gás para a soldagem com diferentes diâmetros de arames e calcular o custo para o processo, fazer uso do líquido penetrante ou radiografia a fim de avaliar a qualidade da solda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo apoio e incentivo no estudo, ao Prof. Adelor



Felipe da Costa (Faculdade SATC) pela valorosa contribuição neste trabalho e aos bolsistas do LACAMI que auxiliaram na realização dos ensaios.

REFERENCIAS

ASTM E 384-11e1, Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. 2011.

ASTM G 65-91, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, maio de 2001.

Aço SAE 1045. Disponível em: <<http://www.acosporte.com.br/aco-sae-1045>>. Acesso em 14 de agosto de 2017.

Aços Resistentes ao Desgaste. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=99>>. Acesso em 14 de agosto de 2017.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**: Características gerais, tratamentos térmicos principais tipos”. Volume I. 7ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005, 576 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**: Estrutura e propriedades das ligas metálicas”. Volume I. 2. ed. São Paulo, McGraw-Hill, 1986.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo, Edgard Blücher, 2008.

DIN 50320: Verschleiß - Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Beuth Verlag, Berlin 1979.

FOGAGNOLO, J. B., 2011, Introdução a Processos e Metalurgia da Soldagem. Apostila de Graduação, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Departamento de Engenharia Mecânica, Campinas-SP, 99 p.

FORTES, C. Apostila de Eletrodos Revestidos-ESAB. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf>. Acesso em 14 de agosto de 2017. FORTES, C. Apostila de Arames Tubulares-ESAB. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901098rev1_apostilaaramestubulares_ok.pdf>. Acesso em 2 de setembro de 2017.

Gerdau, Aços especiais ao Carbono. Disponível em: <http://www.comercialgerdau.com.br/produtos/acos_especiais_acarbono>. Acesso em 14 de agosto de 2017.



ISHI, R. Y. Influência do Pré-Aquecimento na Perda de Massa de Revestimentos Duros Aplicados pelo Processo de Soldagem com Arame Tubular”, Monografia de graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba/PR, Brasil, 2012, 79 p.

KOTECKI, D.J., Ogborn, J.S., Abrasion Resistance of Iron-Based Hardfacing Alloys. Welding Journal, EUA, 74(8), pp. 269-s-278-s, August, 1995.

KÖNIG, R. G., Estudo do Desgaste de Revestimentos em Matrizes de Recorte a Frio de Cabeças de Parafusos”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC, Brasil, 2007, 143p.

LIMA, A. C., Estudo da Aplicação de Revestimento Duro por Soldagem com Arames Tubulares quanto à Resistência ao Desgaste de Facas Picadoras de Cana-De-Açúcar. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia/MG, Brasil, 2008, 232p.

MARQUES, P. V., Modenesi, P. J., BRACARENSE, A. Q. **Soldagem**: Fundamentos e Tecnologias. 2. ed. UFMG: Belo Horizonte, 2007, 363 p.

SENAI - SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Soldagem**: área metalurgia. São Paulo: SENAI-SP. 2013, 720 p.

SILVA, M. L. N. Otimização do Processo de Laminação Transversal com Cunha para Produção de Eixos com Aço SAE 1045. Tese de Doutorado, Universidade de Campinas, Campinas/SP, Brasil, 2008. 127 p.

VEIGA, E., **Soldagem de Manutenção**. 21 ed. Globus: São Paulo, 2011, 218p.

WAINER, E., Brandi, S.D., de Mello, F.D.H. **Soldagem**: processos e metalurgia. Edgard Blücher: São Paulo, 2004, 494 p.

YAMAGUSHI, Y.; Tribology of plastic materials. Tribology, vol. 16, 1990.