

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

ABEL EDUARDO NETTO

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO DE REVESTIMENTOS DEPOSITADOS
EM AÇO BAIXO CARBONO PELO PROCESSO SMAW

JARAGUÁ DO SUL
Setembro 2020

ABEL EDUARDO NETTO

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO DE REVESTIMENTOS DEPOSITADOS
EM AÇO BAIXO CARBONO PELO PROCESSO SMAW

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Campus Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Almir Turazi

JARAGUÁ DO SUL
Setembro 2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Netto, Abel Eduardo

**Análise da resistência à abrasão de revestimentos
depositados em aço baixo carbono pelo processo SMAW / Abel Eduardo
Netto ; orientação de Almir Turazi.** Jaraguá
do Sul, SC, 2020.
71 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -
Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .
Inclui Referências.**

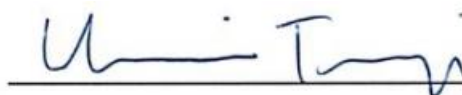
1. Soldagem de revestimento duro. 2. Eletrodo revestido.
3. Desgaste abrasivo. I. Turazi, Almir. II. Instituto
Federal de Santa Catarina. . III. Título.

ABEL EDUARDO NETTO

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO DE REVESTIMENTOS DEPOSITADOS
EM AÇO BAIXO CARBONO PELO PROCESSO SMAW

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo
indicada.

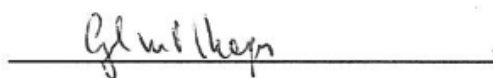
Jaraguá do Sul, 17 de setembro de 2020



Prof. Almir Turazi, Dr. Eng.
Orientador
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Fernando Henrique Gruber Colaço, Me
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



Prof. Dr. Gil Magno Portal Chagas

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelos desafios colocados em meu percurso acadêmico e pelo suporte para superá-los.

Agradeço aos meus familiares e esposa pelo apoio, tempo não presente e paciência durante o período em que me dediquei neste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Almir Turazi, pelo suporte técnico na pesquisa, na realização das atividades práticas e pela orientação recebida.

Agradeço a todos os professores do IFSC pelos ensinamentos durante meu percurso acadêmico.

E por último, agradeço ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) pela formação recebida.

RESUMO

Aços de baixo teor de carbono, como o ABNT 1020 ou o ASTM A36, geralmente tem um custo menor em relação a outras ligas metálicas utilizadas na fabricação mecânica. No entanto, são materiais de baixa dureza e pouca resistência a corrosão ou abrasão, resultando em menor durabilidade. Uma das formas de aumentar a vida útil destes materiais é a aplicação, via deposição por arco elétrico, de revestimentos superficiais com propriedades como resistência à abrasão na região desejada da peça. Por se tratar de um processo de soldagem por fusão, alterações microestruturais ocorrem no material e devem ser consideradas. Este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos da composição química do revestimento e do tipo de corrente elétrica nas propriedades mecânicas de aços baixo carbono após aplicação de revestimentos duros a base de cromo (DIN E10-UM-60GR e E6-UM-60G). Para a aplicação dos revestimentos foi utilizado o processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW), com a deposição de cordões sobrepostos lateralmente. Ensaio de desgaste abrasivo, do tipo “disco de borracha” e de microdureza Vickers foram realizados e, após análise dos resultados, percebeu-se que o eletrodo E10-UM-60GR (com maiores teores de C e Cr) obteve desempenho superior, apresentando menor desgaste abrasivo e obtendo uma dureza média maior. O uso do eletrodo E6-UM-60G gerou cordões com menor grau de diluição e maior influência nas propriedades da ZAC (zona afetada pelo calor).

Palavras-Chave: Soldagem de revestimento duro, eletrodo revestido, desgaste abrasivo.

ABSTRACT

Low-carbon steels, such as ABNT 1020 or ASTM A36, generally have a lower cost compared to other metal alloys used in mechanical manufacturing. However, they are materials of low hardness and little resistance to corrosion or abrasion, resulting in less durability. One of the ways to increase the useful life of these materials is to apply, through deposition by electric arc, of surface coatings with properties such as abrasion resistance in the desired region of the part. As it is a fusion welding process, microstructural changes occur in the material and must be considered. This work aims to evaluate the effects of the chemical composition of the coating and the type of electric current on the mechanical properties of low carbon steels after application of hard chrome-based coatings (DIN E10-UM-60GR and E6-UM-60G). For the application of coatings, the welding process with a coated electrode (SMAW) was used, with the deposition of strands superimposed laterally. Abrasive wear tests, such as “rubber disk” and Vickers microhardness tests were carried out and, after analyzing the results, it was found that the E10-UM-60GR electrode (with higher C and Cr contents) yields superior performance, presenting less abrasive wear and obtaining a higher average hardness. The use of the E6-UM-60G electrode generated strands with a lower degree of dilution and greater influence on the properties of the ZAC (zone affected by heat).

Keywords: Hardfacing welding, coated electrode, abrasive wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rosca transportadora.....	14
Figura 2 – Bomba de sedimentos.....	15
Figura 3 – Válvula para controle de vazão.....	15
Figura 4 – Desgaste abrasivo em elementos de transporte de fluídos: A) Eixo de bomba; B) Rosca transportadora.....	16
Figura 5 – Diagrama de fases aço-carbono.....	19
Figura 6 – Diagrama de fases aços hipoeutetóides e hipereutetóides.....	20
Figura 7 – Desgaste abrasivo por sulcamento.....	25
Figura 8 – Desgaste abrasivo por microcorte.....	26
Figura 9 – Desgaste abrasivo por microtrincamento.....	26
Figura 10 – Desgaste abrasivo entre dois corpos (A) e três corpos (B).....	27
Figura 11 – Microestruturas de revestimentos com alto teor de Cr depositados via soldagem: A- 2 a 3% C e 5 a 30% Cr; B- 4 a 7% C e 15 a 35% Cr.....	35
Figura 12 – Perfil típico de um cordão de solda.....	37
Figura 13 – Soldagem com eletrodo revestido.....	38
Figura 14 – Elementos típicos de soldagem com eletrodo revestido.....	40
Figura 15 – Classificação dos eletrodos norma DIN 8555.....	41
Figura 16 – Influência do tipo de corrente na penetração: A) polaridade inversa (CC+); B) polaridade direta (CC-) e C) corrente alternada (CA).....	44
Figura 17 – Efeito da velocidade de deslocamento na diluição.....	45
Figura 18 – Técnicas de oscilação para soldagem em revestimento.....	47
Figura 19 – Fluxograma da sequência dos procedimentos.....	51
Figura 20 – Dimensões das amostras.....	52
Figura 21 – Equipamento de soldagem utilizado.....	53
Figura 22 – Representação dos cordões de solda e regiões de extração dos corpos de prova para ensaios.....	54
Figura 23 – Equipamento de microdureza modelo FM-800.....	56
Figura 24 – Esquema da obtenção do perfil de dureza da ZAC.....	56
Figura 25 – Esquema de realização do ensaio de microdureza dos corpos de prova do ensaio de desgaste abrasivo.....	57
Figura 26 – Aparato para ensaio de resistência à abrasão.....	57
Figura 27 – Banho Ultrassônico.....	58
Figura 28 – Energia térmica gerada em cada condição de soldagem.....	60
Figura 29 – Resultado do cálculo da taxa de diluição.....	61
Figura 30 – Amostras de perfil de cada condição utilizada para calcular a diluição.....	62
Figura 31 – Perfis de microdureza na ZAC.....	63
Figura 32 – Resultado do desgaste abrasivo das amostras.....	65
Figura 33 – Resultado de microdureza Vickers nos revestimentos.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Microestrutura e propriedades mecânicas para ligas de Ferro-Carbono.	21
Tabela 2 – Categorias dos eletrodos das normas AWS A5.13 e A5.21 e a composição química em (%).	42
Tabela 3 – Valores típicos para rendimento térmico (η).	49
Tabela 4 – Composição química (%) do aço ABNT 1020.	50
Tabela 5 – Composição química (%) e características dos eletrodos revestidos utilizados.	50
Tabela 6 – Valores médios de diluição para cada condição.	61
Tabela 7 – Volume perdido após ensaio de desgaste por abrasão.	64
Tabela 8 – Valores de dureza média na superfície dos revestimentos.	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos aços SAE/AISI.	18
Quadro 2 – Parâmetros de soldagem das amostras.	53
Quadro 3 – Velocidades e tensões medidas em cada amostra.	59
Quadro 4 – Valores de dureza medidos na ZAC com desvio padrão.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing Materials

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

ARBL – Alta Resistência e Baixa Liga

SAE – Society of Automotive Engineers

AISI – American Iron and Steel Institute

CCC – Cúbica de Corpo Centrado

CFC – Cúbica de Face Centrada

SMAW – Shielded Metal Arc Welding

SAW – Submerged Arc Welding

GMAW – Gas Metal Arc Welding

FCAW – Fluxed Cored Arc Welding

ASP – Arc Spraying

PSP – Plasma Arc Spraying

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding

HVOF – High Velocity Oxygen Fuel

DIN – Deutsches Institut für Normung

ISO – International Organization for Standardization

CC – Corrente Contínua

CA – Corrente Alternada

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivo geral.....	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1 Transporte de fluídos e desgaste de componentes.....	14
2.2 Aço-carbono.....	16
2.2.1 Microestrutura dos aços-carbono.....	19
2.3 Propriedades mecânicas dos aços.....	22
2.3.1 Resistência ao desgaste por abrasão.....	24
2.4 Aplicação de revestimento em aços.....	29
2.4.1 Revestimento (<i>Cladding</i>).....	29
2.4.2 Revestimento para acréscimo dimensional (<i>Buildup</i>).....	30
2.4.3 Amanteigamento (<i>Buttering</i>).....	30
2.4.4 Revestimento duro (<i>Hardfacing</i>).....	30
2.5 Ligas para revestimento.....	32
2.6 Deposição de revestimento.....	36
2.6.1 Controle da diluição.....	37
2.6.2 Processo de soldagem com Eletrodo Revestido (SMAW).....	38
2.6.3 Efeito dos principais parâmetros de soldagem para revestimento.....	43
2.6.4 Aporte térmico.....	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1 Materiais.....	50
3.2 Métodos.....	51
3.2.1 Preparação das amostras.....	52
3.2.2 Procedimento de Soldagem.....	52
3.2.3 Cálculo do aporte térmico.....	54
3.2.4 Cálculo da taxa de diluição.....	55
3.2.5 Ensaio de microdureza.....	55
3.2.6 Ensaio de desgaste abrasivo.....	57
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	59
4.1 Aporte térmico.....	59
4.2 Diluição.....	61
4.3 Análise da zona afetada pelo calor (ZAC).....	63
4.4 Análise dos revestimentos.....	64
4.4.1 Resistência ao desgaste por abrasão.....	64
4.4.2 Microdureza dos revestimentos.....	66
5 CONCLUSÃO.....	68
REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

Desde o surgimento do alto-forno para produção de ligas de ferro, as aplicações dos aços-carbono expandiram-se, levando a civilização humana adiante em sua evolução tecnológica. Os aços-carbono são utilizados na fabricação de diversos equipamentos e máquinas atualmente, aplicando-se em situações de altas e baixas temperaturas, cargas extremas e impacto por exemplo. Pode haver também a necessidade de suportar o desgaste abrasivo dos componentes. Tal desgaste pode ser proveniente do atrito com partículas indevidas no sistema, ou ainda por protuberâncias e saliências que entram em contato com as peças.

Dispositivos de controle de fluídos como bombas, rotores e válvulas industriais, principalmente do tipo esféricas, possuem partes diretamente expostas a ambientes corrosivos e também ao desgaste de seus componentes devido aos fluídos carregados com detritos e impurezas, gerando desgaste por abrasão. Outro lugar em que há desgaste abrasivo recorrente é nos equipamentos e maquinários do setor de mineração e perfuração de poços, devido a exposição direta dos componentes a partículas abrasivas como areia, pedras e poeira de minérios.

Nesses casos, ao se optar por materiais de menor custo e durabilidade, por exemplo, uma maior repetição nas manutenções corretivas e preventivas será necessária, podendo ocorrer até mesmo falhas severas no equipamento e maquinário. Aços de baixo teor de carbono como ABNT 1020 ou ASTM A36 geralmente tem um custo menor em relação a outras ligas metálicas utilizadas na fabricação mecânica, porém são materiais de baixa dureza e pouca resistência à abrasão, resultando em menor durabilidade.

Uma das formas de aumentar a vida útil de componentes fabricados com materiais de menor custo e durabilidade, é a utilização de revestimentos superficiais na região desejada da peça com composições químicas específicas para resistir ao desgaste abrasivo. Estes revestimentos possuem propriedades mecânicas e elementos químicos como cromo, molibdênio, manganês, tungstênio e vanádio que diferem da liga utilizada como metal base, aumentando a resistência a corrosão, erosão, impacto e abrasão. Sendo assim, ao depositar revestimentos em aços de baixo teor de carbono ou baixa liga é possível obter peças e componentes a um custo razoável e alta durabilidade.

Um dos métodos de aplicação de revestimentos em peças metálicas é a utilização de soldagem com arco elétrico, que apresenta alta produtividade e facilidade de processamento. Pesquisas nesta área são necessárias para que a indústria possa continuar sendo beneficiada com melhorias nas características e aplicações dos materiais.

O aço ABNT 1020, por exemplo, é um dos materiais mais consumidos no mundo por apresentar boa soldabilidade e conformabilidade e por possuir um custo baixo se comparado a outros materiais. No entanto, por ser um aço sem elementos de liga e com baixo teor de carbono, algumas propriedades como resistência à abrasão são limitadas. Estas características o tornam um aço adequado para aplicação de revestimento soldado por arco elétrico, especificamente para aumento da resistência ao desgaste por abrasão.

1.1 Objetivo geral

Determinar a microdureza e resistência à abrasão de dois revestimentos com teores de carbono e cromo distintos (DIN E6-UM-60G e E10-UM-60GR), depositados pelo processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido sobre o aço ABNT 1020.

1.2 Objetivos específicos

- Aplicar dois tipos de revestimentos duros, com teores de carbono e cromo diferentes, ao aço ABNT 1020, através do processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW);
- Medir a tensão e a velocidade de soldagem para avaliar o efeito do aporte térmico nas características dos revestimentos;
- Analisar o efeito do tipo de revestimento na resistência ao desgaste abrasivo;
- Estudar o efeito do tipo de corrente nas características do revestimento e propriedades mecânicas da ZAC.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Transporte de fluídos e desgaste de componentes

Em diversos ramos da indústria, como mineração, tratamento de água e efluentes e petroquímico, é realizado bombeamento e transferência de fluidos por tubulações para interligação entre etapas de processamento ou transferência de material de um reservatório para um meio de transporte. Nestes casos, é muito comum a necessidade de um controle preciso da vazão e a possibilidade de bloqueio total do fluxo quando necessário.

Entre os diversos componentes para a realização destes procedimentos estão as roscas transportadoras (Figura 1), as bombas (Figura 2) e as válvulas (Figura 3). De modo geral as bombas são empregadas para a transferência de líquidos em ambientes industriais, no tratamento de água de municípios ou em cenários de emergência. Já as válvulas são aplicadas para o controle de fluxo, nível e pressão, seja de líquidos ou gases. Ambos os equipamentos, bombas e válvulas, possuem modelos para líquidos de diversas viscosidades e fluídos homogêneos e heterogêneos como: água, vapor, esgoto, químicos, hidrocarbonetos, águas residuais provenientes de atividades industriais, de mineração e efluentes. As roscas transportadoras são muito aplicadas na movimentação de sedimentos e fluídos com suspensão de sólidos, mas também podem movimentar diversas substâncias pastosas ou líquidas.

Figura 1 – Rosca transportadora



Fonte: Lippel (2020)

Figura 2 – Bomba de sedimentos



Fonte: Itubombas (2020)

Figura 3 – Válvula para controle de vazão.



Fonte: KSB Brasil (2020)

Na indústria e no tratamento de água de um município é comum bombas e válvulas estarem aplicadas em instalações de grande porte, normalmente interligando dois ou mais sistemas em rede. Como em grande parte estas instalações são fixas, nestes casos o recomendado é que os equipamentos sejam fabricados de materiais robustos, de qualidade e com durabilidade, para evitar problemas de manutenção frequente, de modo que, na maioria dos casos, é necessário uma parada geral no sistema para efetuar reparos ou troca de equipamento. Isso não gera apenas impacto nas operações, mas também acarreta prejuízos à empresa ou órgão público (PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA, 2017).

O maior motivo de paradas para manutenção é o desgaste dos componentes e peças feitos de aço-carbono e aço de baixa liga. De acordo com Rijeza Metalurgia (2019a) o principal tipo de desgaste destes materiais é a abrasão, que consiste em partículas rígidas forçadas contra uma superfície sólida. Essas partículas são

responsáveis pelo desgaste acelerado de eixos nas bombas e nas roscas transportadoras, e geralmente são provenientes do próprio fluido.

Na Figura 4 é possível observar o desgaste abrasivo recorrente em equipamentos utilizados para o transporte de fluidos carregados com partículas abrasivas. Em “A” o desgaste ocorreu em um eixo de uma bomba e em “B” em uma rosca transportadora ambos componentes de equipamentos utilizados para mineração.

Figura 4 – Desgaste abrasivo em elementos de transporte de fluidos: A) Eixo de bomba; B) Rosca transportadora



Fonte: A – Rijeza Metalurgia (2019b), B – Rijeza Metalurgia (2019c)

Sendo assim, devido a grande maioria dos componentes de bombas e válvulas para transporte de fluidos é fabricada utilizando-se ligas de menor custo como os aços-carbono é necessário uma forma de amenizar o desgaste. Uma forma de diminuir os custos e ainda assim aumentar a durabilidade destes equipamentos é a aplicação de revestimentos metálicos a estes materiais para que suportem o desgaste abrasivo (RIJEZA METALURGIA, 2019b).

2.2 Aço-carbono

As ligas de aço-carbono são ligas metálicas em que os principais constituintes são o ferro e o carbono, podendo conter ainda manganês, magnésio, molibdênio, níquel, cobre, cromo, vanádio e tungstênio. A concentração de carbono em um aço pode chegar até 2,11%, porém na maior parte das ligas comerciais e aplicadas na indústria esta concentração é normalmente inferior a 1,00%.

Ao se adicionar mais elementos para modificar a microestrutura e adquirir novas propriedades mecânicas, os aços-carbono se transformam em aços-liga. Os aços-carbono podem ser classificados de acordo com a quantidade de carbono presente na liga em: I) aços com baixo teor de carbono; II) aços com médio teor de carbono e; III) aços com alto teor de carbono.

Aços com baixo teor de carbono são produzidos geralmente com um teor de carbono inferior a 0,25% e não respondem a tratamentos térmicos para formação de martensita, porém é possível aumentar a resistência por trabalho a frio. As microestruturas são compostas por ferrita e perlita, conferindo-lhe baixa dureza e resistência e alta ductilidade e tenacidade. São aços usináveis, soldáveis e de menor custo de produção, com aplicação em carcaça de automóveis e formas estruturais por exemplo. Ainda entre os aços de baixo teor de carbono há os aços de baixa liga e de alta resistência (ARBL) devido aos outros elementos acrescidos na liga. Estes elementos como molibdênio, cobre, vanádio e níquel podem apresentar teores superiores a 10% da liga, e após tratamentos térmicos podem obter resistência a tração superior 480 MPa. Ainda assim podem ser dúcteis, conformáveis e usináveis, aplicando-se situações em que a resistência estrutural é crítica como em pontes, torres e vasos de pressão (CALLISTER JUNIOR; RETWISCH, 2012).

Os aços com médio teor de carbono possuem concentração de carbono entre 0,25% e 0,60% podendo ser tratadas termicamente, no entanto não possuem carbono suficiente para serem temperáveis. Adicionando-se cromo, níquel e molibdênio a capacidade dessas ligas serem tratadas termicamente melhora, criando diversas combinações de resistência e ductilidade. Ao serem tratadas termicamente tornam-se mais resistentes que os aços de baixo teor de carbono mas perdem a tenacidade e ductilidade antes apresentada. Aplicam-se em trilhos de ferrovias, virabrequins, peças de máquina e componentes estruturais de alta resistência a abrasão e tenacidade (CALLISTER JUNIOR; RETWISCH, 2012).

Já os aços com alto teor de carbono apresentam um teor de carbono entre 0,60% e 1,40%. São os mais duros e resistentes porém também os menos dúcteis. Em maioria são utilizados na condição endurecida e revenida, com alta resistência ao desgaste e são capazes de manter a aresta de corte afiada. Matrizas e aços-ferramenta são obtidos ao se adicionar cromo, vanádio, molibdênio e tungstênio a liga, formando um aço de alta liga e carbeto extremamente duros (Cr_{23}C_6 , V_4C_3 , WC) e resistentes a abrasão. Também se aplica aços com alto teor de carbono a

facas, lâminas de corte, molas, lâminas de serra e arames de alta resistência (CALLISTER JUNIOR; RETWISCH, 2012).

A Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE – Society of Automotive Engineers), o Instituto Americano do Ferro e do Aço (AISI – American Iron and Steel Institute) e a Sociedade Americana para Ensaio e Materiais (ASTM – American Society for Testing and Materials) classificam e fazem a especificação dos aços e de outras ligas. Esta especificação denominada SAE/AISI consiste em um número de quatro dígitos, em que os dois primeiros dígitos indicam o tipo da liga e dois últimos dígitos informam a quantidade de carbono. No Quadro 1 a classificação das ligas de acordo com o sistema SAE/AISI e sua composição química (CALLISTER JUNIOR; RETWISCH, 2012).

Quadro 1 – Classificação dos aços SAE/AISI

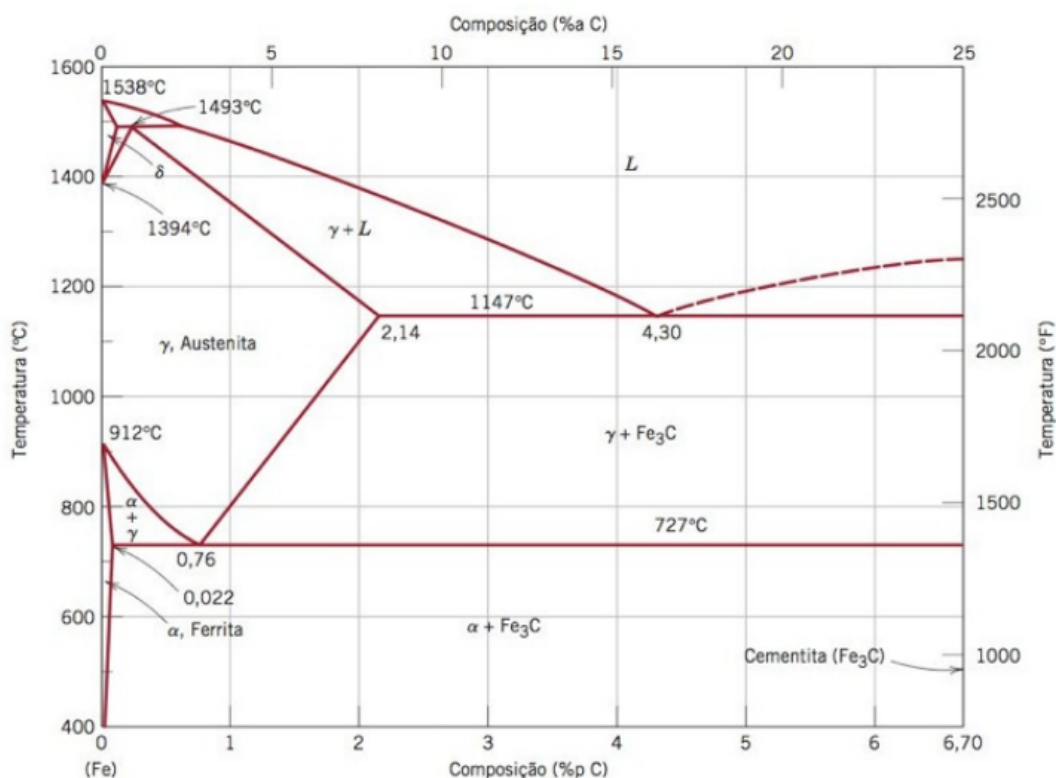
TIPO	CLASSE	DESIGNAÇÃO	TEOR APROXIMADO DOS ELEMENTOS
Aços-carbono	10XX	Carbono	Mn máximo 1,00%
	11XX	Ressulfurado	–
	12XX	Ressulfurado e refosfatado	–
	14XX	Adição de Níobio	Nb 0,10%
	145XX	Carbono	Mn 1,00 a 1,65%
Aços-liga	13XX	Manganês	Mn 1,75%
	23XX	Níquel	Ni 3,5%
	31XX	Níquel e cromo	Ni 1,25% e Cr 0,65%
	41XX	Cromo e molibdênio	Cr 0,50% e Mo 0,80 a 0,95%
	43XX	Cromo, níquel e molibdênio	Ni 1,8%, Cr 0,50 a 0,80% e Mo 0,25%
	50XX	Cromo	Cr de 0,27 a 0,65%
	61XX	Cromo e vanádio	Cr 0,60 a 1,05% e V mínimo 0,15%
	86XX	Cromo, níquel e molibdênio	Cr 0,50%, Ni 0,55% e Mo 0,20%
	92XX	Silício	Si 2,00% e Mn 0,85%
Aços com adições especiais	XXBXX	Adição de Boro	–
	XXLXX	Adição de Chumbo	–

Fonte: Gerdau (2003)

2.2.1 Microestrutura dos aços-carbono

Para compreender melhor as diferenças entre os aços-carbono de baixa, média e alta liga o diagrama de equilíbrio de fases do Fe-C é utilizado como uma ferramenta. Considerando que o percentual de carbono que pode ser de até 2,11% e a temperatura na qual se encontra a liga de aço-carbono é possível determinar a microestrutura do material. O diagrama (Figura 4) mostra diversas informações fundamentais para o entendimento dos aços-carbono e também dos aços ligados (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011; CALLISTER JUNIOR; RETWISCH, 2012).

Figura 5 – Diagrama de fases aço-carbono



Fonte: Callister Junior; Retwisch (2012)

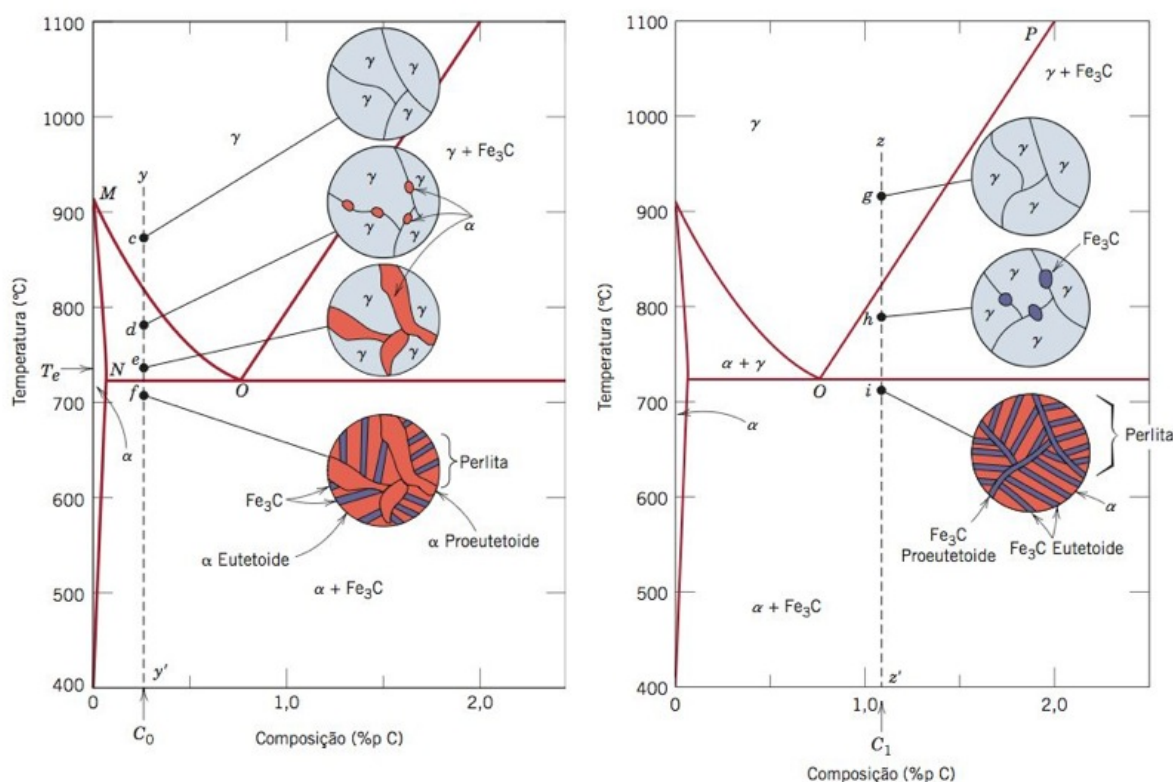
As fases apresentadas no diagrama da Figura 5 são: líquido, austenita (γ), ferrita (α e δ) e cementita (Fe₃C). A cementita é um carboneto de ferro de estrutura ortorrômbica. A ferrita é uma estrutura CCC com alguns traços de carbono em solução sólida sendo majoritariamente ferro puro. Estas duas seriam as fases existentes no aço-carbono abaixo de 727 °C, porém ao atingir temperaturas mais elevadas há a ocorrência da fase austenita, capaz de dissolver mais carbono e com

uma estrutura CFC.

Enquanto ocorre o resfriamento a fase austenítica começa a se transformar em duas microestruturas predominantes. Abaixo de 0,8% no teor de carbono os aços adquirem uma microestrutura composta por ferrita e acima de 0,8% uma microestrutura composta por cementita. Após resfriar até 727 °C a austenita restante transforma-se diretamente em uma mistura de ferrita e cementita em ambos os casos. Esta transformação é conhecida reação eutetóide.

Quando o resfriamento do aço é lento a mistura formada pelas microestruturas têm um arranjo de lamelas alternadas de ferrita e cementita, formando um típico constituinte denominado perlita. Dessa forma, se resfriados lentamente aços hipoeutetóides com um teor de carbono inferior a 0,8% terão uma microestrutura de ferrita e perlita (conforme mostrado na Figura 6). Já os aços hipereutetóides com um teor de carbono superior a 0,8% terão uma microestrutura de cementita e perlita. E um aço eutetóide que possui um teor de carbono de exatos 0,8% terá somente perlita em sua composição (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011; CALLISTER JUNIOR; RETWISCH, 2012).

Figura 6 – Diagrama de fases aços hipoeutetóides e hipereutetóides



Fonte: Callister Junior; Retwisch (2012)

Contudo, o aço-carbono pode obter diferentes propriedades dependendo do tamanho de grão e de como a microestrutura está arranjada. Na Tabela 1 encontra-se os principais microconstituintes presentes nos aços-carbono, bem como as propriedades mecânicas que estes apresentam.

Tabela 1 – Microestrutura e propriedades mecânicas para ligas de Ferro-Carbono

Microconstituente	Fases presentes	Arranjo das fases	Propriedades mecânicas
Cementita globulizada	Ferrita α + Fe_3C	Partículas relativamente pequenas de Fe_3C com formato próximo ao esférico em uma matriz de ferrita α	Baixa dureza e dúctil
Perlita grosseira	Ferrita α + Fe_3C	Camadas alternadas de Ferrita α e Fe_3C que são relativamente grossas	Resistência e dureza maiores que a cementita globulizada, porém menos dúctil
Perlita fina	Ferrita α + Fe_3C	Camadas alternadas de Ferrita α e Fe_3C que são relativamente finas	Resistência e dureza maiores que a perlita grosseira porém menos dúctil
Bainita	Ferrita α + Fe_3C	Partículas muito finas e alongadas de Fe_3C em uma matriz de ferrita α	Resistência e dureza maiores que a perlita fina porém mais dúctil que a martensita
Martensita revenida	Ferrita α + Fe_3C	Partículas muito pequenas de Fe_3C com formato próximo ao esférico em uma matriz de ferrita α	Resistente, dureza e fragilidade menores que a martensita
Martensita	TCC (Tetragonal de Corpo Centrado) monofásica	Grãos com formato de agulha	Extremamente dura e frágil

Fonte: Callister Junior; Retwisch (2012)

A formação destes microconstituintes está relacionada a temperatura do aço tanto no aquecimento como no resfriamento. Essas transformações de microestrutura pelo aumento de temperatura do aço e pelo tempo de resfriamento são chamados de tratamentos térmicos. Para formar martensita, por exemplo, é necessário que o aço seja aquecido até a temperatura de austenitização e depois seja resfriado abruptamente, processo conhecido como têmpera. Já para formar bainita o resfriamento a perda de calor deve ser branda, processo conhecido como martêmpera (CALLISTER JUNIOR; RETWISCH, 2012; CIMM, 2019).

O tamanho dos sólidos cristalinos ou grãos nos aços têm grande influência nas propriedades mecânicas e nos tratamentos térmicos. Aços com um tamanho de grão maior terão mais ductibilidade e maior deformação plástica. Aços com um tamanho de grão menor terão maior dureza e resistência mecânica. Isso ocorre devido ao movimento das discordâncias no aço quando este está recebendo uma carga. Contornos de grão maiores facilitam o movimento das discordâncias pelo material, e contornos de grão menores dificultam o movimento, de modo que a discordância ao encontrar um contorno de grão tem que mudar direção (CALLISTER JUNIOR; RETWISCH, 2012).

Além da têmpera, existem os tratamentos térmicos de normalização, recozimento e revenimento. Na normalização ocorre o aquecimento do aço 60 °C acima da temperatura de austenitização até que toda a microestrutura esteja homogenizada, depois é resfriado em temperatura ambiente. Nesse caso ocorre uma diminuição do tamanho do grão, o que aumenta a área de contorno de grão e assim aumentando a resistência mecânica. Muitas vezes o tratamento de normalização é utilizado antes da têmpera a fim de preparar as peças para que estas não se deformem ou rachem após a têmpera (CALLISTER JUNIOR; RETWISCH, 2012).

No recozimento o aço é aquecido entre 600 e 650 °C mantendo-se nessa faixa de temperatura por uma hora ou mais e então é resfriado dentro do forno. Já o revenimento geralmente é um processo executado após a têmpera, reaquecendo o aço para diminuir a fragilidade da martensita, formando martensita revenida (CALLISTER JUNIOR; RETWISCH, 2012; CIMM, 2019).

2.3 Propriedades mecânicas dos aços

Pode-se dizer que o elemento que tem maior influência para os aços-carbono e aços-liga é o próprio carbono, devido ser o principal agente formador de microestruturas e propriedades. Já para o aço inoxidável o principal agente é o cromo seguido pelo níquel, devido a uma característica eletroquímica destes metais que ao oxidarem formam uma película protetora que aumenta a resistência a corrosão (CALLISTER JUNIOR; RETWISCH, 2012; INFOMET, 2019a; INFOMET, 2019b).

As propriedades mecânicas atribuídas aos aços derivam da análise de seu comportamento ao receber energia. As mais observadas são:

- Elasticidade: Pode se dizer que o comportamento elástico de um dado material é a capacidade que este tem em retornar sua forma e dimensões originais quando a carga de tensão ou compressão for removida.

- Plasticidade: O comportamento plástico de um material se dá quando este não pode recuperar a forma e dimensões originais após de ser submetido a tensões que ultrapassam o limite do regime elástico, sofrendo deformação permanente.

- Alongamento: É o aumento do comprimento de um material submetido a um esforço de tração, é correlacionado com a ductibilidade.

- Resiliência: É a capacidade que o material tem em absorver energia durante o regime elástico, ou seja, quando a deformação ocorre dentro do regime elástico. Pode se dizer que um material de difícil deformação elástica é um material rígido.

- Tenacidade: É a capacidade que um material tem em absorver energia até romper-se. A energia máxima ocorre na ruptura do material e é a soma da energia do regime elástico com a do regime plástico.

- Ductibilidade: É a capacidade que um material possui deformando-se plasticamente até a sua ruptura, quanto maior for a deformação sofrida no regime plástico mais dúctil este material será. Geralmente a ductilidade é relacionada às cargas de tração e maleabilidade às cargas de compressão. Um material que se rompe sem sofrer uma quantidade significativa de carga no regime plástico é denominado de frágil.

Existem ainda propriedades relacionadas ao processo de fabricação como usinabilidade, forjabilidade e soldabilidade, e também quanto a tratamentos térmicos como a temperabilidade. Quanto a soldabilidade, pode ser descrita como a facilidade relativa com que uma solda satisfatória é realizada mantendo-se as propriedades do metal base após a soldagem, sem sofrer alterações prejudiciais na microestrutura. Um material com boa soldabilidade deve apresentar, após ser soldado, tensões internas não excessivas e propriedades mecânicas similares ao material base soldado, como ductilidade, tenacidade, resistência mecânica (MODENESI, 2011; CIMM, 2019).

Outra forma de avaliar a soldabilidade de um aço é pelo teor de elementos de liga em sua composição química. Ferramentas de corte, moldes e matrizes embora apresentem propriedades mecânicas superiores, geralmente são materiais de difícil

soldabilidade por causa do alto teor de elementos de liga, com tendência a formar trincas e rachaduras. De acordo com a classificação AISI, para aços ferramenta, geralmente há uma relação inversa entre o teor de elementos de liga e soldabilidade. O elemento de maior influência é o próprio carbono, a medida que o teor de carbono aumenta a soldagem se torna mais difícil. Outro elemento que dificulta a soldagem é o enxofre. Portanto o carbono equivalente de uma liga é um bom indicador de soldabilidade, e os aços de baixo carbono e aços de baixa liga são os mais indicados para a construção mecânica que envolva processos de soldagem (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b; CIMM, 2019).

Outra propriedade mecânica muito avaliada em materiais metálicos é a dureza. Ela caracteriza a resistência à deformação permanente gerada por penetração ou riscos de determinado material com dureza superior como o diamante por exemplo. Pode ser correlacionada com o desgaste abrasivo, que será abordado a seguir.

2.3.1 Resistência ao desgaste por abrasão

De acordo com Gregolin (1990) o desgaste é tido como um fenômeno de essência superficial com remoção gradual e indesejada de material da superfície desgastada. No entanto, a grande quantidade de termos usados para descrever os processos de desgaste frequentemente dificulta a discussão dos problemas gerados pelo desgaste (ZUM GAHR, 1987).

Os mecanismos de desgaste podem ser brevemente classificados como desgaste térmico, desgaste químico e desgaste mecânico. O desgaste térmico é descrito como fusão local da superfície causada pela fricção, podendo ser também o desgaste em materiais frágeis quando há fraturas causadas por choques térmicos. No desgaste químico ocorre principalmente o crescimento de um filme de reações químicas, sendo acelerado mecanicamente pelo atrito e as vezes é chamado de desgaste triboquímico (KATO, 2005).

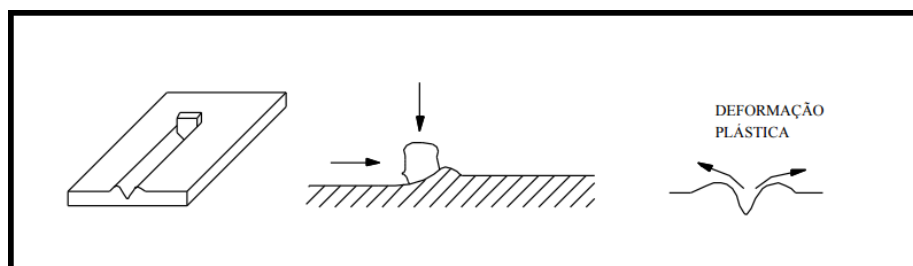
O desgaste mecânico é causado principalmente pelos processos de deformação e fraturamento. O processo de deformação tem um papel substancial no desgaste geral de materiais dúcteis e o processo de fraturamento é mais relevante no desgaste de materiais frágeis. O desgaste mecânico pode ser dividido de acordo com o processo ou mecanismo: cavitação, fadiga, erosão, adesão e abrasão.

O desgaste por cavitação ocorre devido a explosão de bolhas gasosas na interação entre superfície e líquido, são formadas por variações súbitas de pressão. O desgaste por fadiga ocorre devido a tensões intermitentes e cíclicas entre o contato mútuo de superfícies. O desgaste erosivo é a remoção de material de uma superfície que pode ser causado pelo impacto de partículas sólidas, gotículas de um líquido, cavitação e por centelhas elétricas. Já o desgaste por adesão é resultante do contato deslizante entre duas superfícies rugosas, ásperas que ao entrarem em contato ocorre transferência de partículas sólidas de uma superfície para outra.

Com relação ao desgaste abrasivo, este é ocasionado pelo deslocamento de partículas abrasivas sob tensão em uma superfície. Existem basicamente três micromecanismos de ação abrasiva, o sulcamento, o microcorte e o microtrincamento, sendo os dois primeiros recorrentes em materiais dúcteis e o último em materiais frágeis (GREGOLIN, 1990; RIBEIRO, 2004; KATO, 2005).

Quanto ao sulcamento, ele é o resultado da ação de partículas abrasivas deformando plasticamente a superfície de um material, formando um sulco. O material acumulado à frente da partícula escoar para as duas bordas laterais do sulco mas não causa perda de massa durante a formação do sulco. Porém, após a interação de diversas partículas abrasivas com a superfície ocorre então a remoção de material. Na Figura 7 tem-se um esquema ilustrativo do desgaste abrasivo por sulcamento (RIBEIRO, 2004).

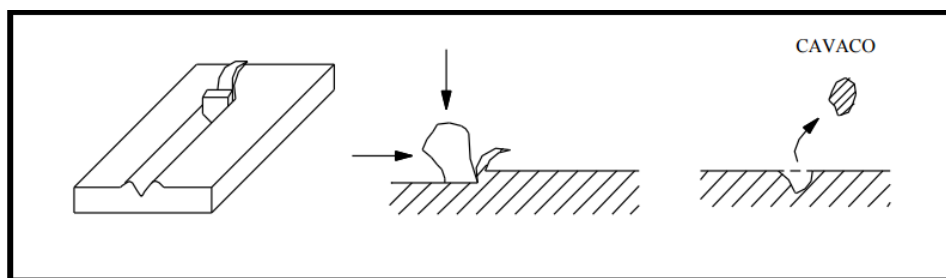
Figura 7 – Desgaste abrasivo por sulcamento



Fonte: Gregolin (1990)

O microcorte consiste na formação de pequenos cavacos no deslocamento de partículas abrasivas sobre uma superfície quando as tensões de cisalhamento impostas são elevadas o suficiente para causar ruptura. Na Figura 8 tem-se um esquema ilustrando o desgaste abrasivo por microcorte (RIBEIRO, 2004).

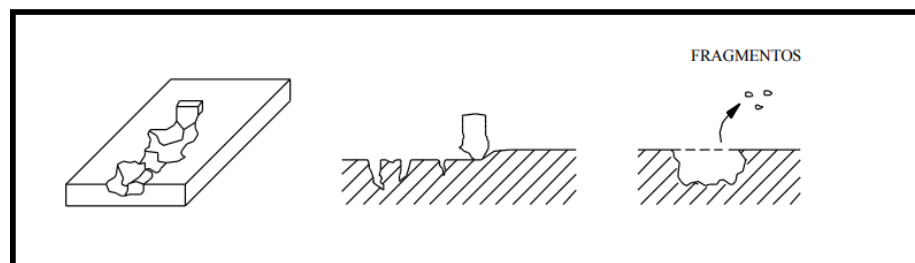
Figura 8 – Desgaste abrasivo por microcorte



Fonte: Gregolin (1990)

Já o microtrincamento, é o processo de fragmentação de superfícies frágeis pela formação e crescimento de trincas, devida à ação de partículas abrasivas. É um processo complexo e os vários mecanismos de desgaste podem ocorrer de forma combinada com remoção de material em menor escala que o microcorte. Na Figura 9 um esquema ilustrativo do desgaste abrasivo por lascamento (GREGOLIN, 1990; RIBEIRO, 2004).

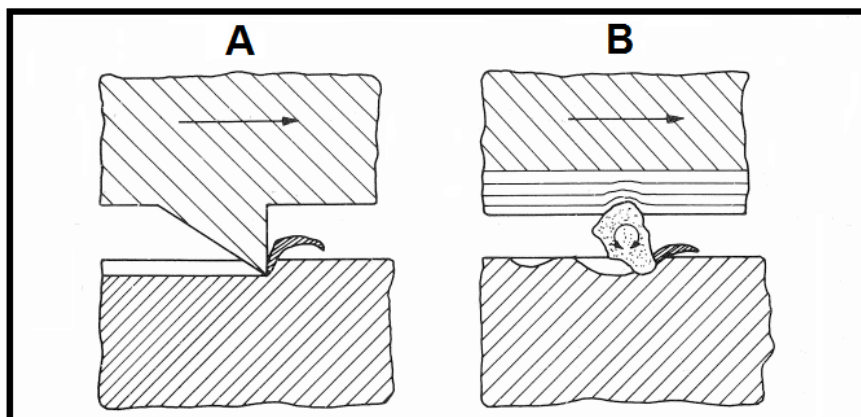
Figura 9 – Desgaste abrasivo por microtrincamento



Fonte: Gregolin (1990)

Outra forma de classificação do desgaste abrasivo pode ser dada pela interação entre corpos durante a abrasão, no caso duas subdivisões: abrasão entre dois corpos e abrasão entre três corpos. A Figura 10 demonstra a abrasão entre 2 corpos (A) e a abrasão entre 3 corpos (B).

Figura 10 – Desgaste abrasivo entre dois corpos (A) e três corpos (B)



Fonte: Zum Gahr (1987)

O desgaste por abrasão entre dois corpos (Figura 10A) ocorre quando uma superfície áspera, ou seja, contendo saliências ou partículas abrasivas fixada a um corpo deslizam sobre a superfície que sofre o desgaste, não havendo portanto movimento relativo entre as partículas em si. Pode-se dizer que os processos de usinagem como lixamento ou retífica é o contato abrasivo entre dois corpos, porém intencional.

Quanto ao desgaste por abrasão entre três corpos (Figura 10B), este ocorre pela ação de abrasivos livres interpostos entre as superfícies de contato havendo movimento relativo entre si além de sofrerem rotação enquanto deslizam sobre a superfície desgastada. No entanto, deve-se considerar dois casos para a abrasão de três corpos: o primeiro em que a distância entre as superfícies é da mesma ordem de grandeza que a dimensão do grão abrasivo; o segundo a distância entre as duas superfícies é de grande maior que a dimensão do grão abrasivo, podendo haver várias camadas de partículas abrasivas entre as superfícies (ZUM GAHR, 1987; GREGOLIN, 1990).

Mesmo para o segundo caso em que há partículas soltas deslizando sobre uma única superfície, considera-se um caso de abrasão a três corpos. No geral o desgaste a três corpos ocorre com frequência em situações em que o lubrificante apresenta poeira, em processos de trituração de rochas, equipamentos industriais e agrícolas.

Como a abrasão a três corpos compreende a maioria dos casos de desgaste abrasivo ainda é possível subdividir em outros três tipos: I) Abrasão sob baixas tensões; II) abrasão sob altas tensões e III) abrasão por goivagem (ZUM GAHR, 1987; GREGOLIN, 1990). A seguir estão descritos cada um dos tipos:

I. Abrasão sob baixas tensões: A superfície desgastada é riscada pelo material abrasivo de tal forma que ao penetrar na superfície promove a remoção de material. As tensões impostas sobre as partículas são inferiores à tensão necessária para realizar a fragmentação do abrasivo. Areia, terra e minérios em contato direto ou indireto com equipamentos de escavação, maquinário agrícola, transporte, mineração são exemplos de abrasão sob baixa tensão (GREGOLIN, 1990; AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

II. Abrasão sob altas tensões: Neste caso devido a tensão ser superior, além de ocorrer a fragmentação das partículas a penetração do material abrasivo é maior, causando uma maior deformação plástica em materiais dúcteis e maiores fraturas em materiais frágeis. Esse tipo de abrasão também é conhecido como abrasão por moagem por ser comum na moagem de minérios e em partes de moinhos (GREGOLIN, 1990; AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

III. Abrasão por goivagem: Envolve a ação de materiais abrasivos geralmente de dimensões grosseiras, sob altas tensões e envolvendo impacto. Este é o caso mais severo, em que as partículas abrasivas formam sulcos profundos devido a maior penetração na superfície. Um caso clássico são as esteiras transportadoras de minérios (GREGOLIN, 1990; AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Uma das formas de reduzir e amenizar o desgaste abrasivo em metais é com a aplicação de revestimentos por soldagem. Os revestimentos podem ter diversas propriedades dependendo do material do qual o revestimento é composto, e desse modo os revestimentos soldados não se aplicam somente para o desgaste abrasivo mas para outros tipos de desgaste também. O revestimento duro é aplicado por possuir elevada dureza e resistência ao desgaste por abrasão, geralmente devido a formação de carbonetos.

2.4 Aplicação de revestimento em aços

Revestimento é definido como a aplicação de uma camada ou camadas de metal a uma superfície por soldagem, brasagem ou pulverização térmica para obter propriedades ou dimensões desejadas. O processo é usado em aços para atender a requisitos como resistência à corrosão, resistência ao desgaste e controle dimensional, ou para fornecer propriedades metalúrgicas necessárias que o material a ser revestido não possuía (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Os diferentes tipos de revestimento superficiais são classificados como revestimento (*cladding*), revestimento duro (*hardfacing*), revestimento para acréscimo dimensional (*buildup*) e amanteigamento (*buttering*). Quando aplicado por soldagem, os materiais utilizados para a aplicação dessas superfícies são geralmente obtidos de ligas consumíveis na forma de arame, tubo, tira ou pó. As ligas são selecionadas para depósito com base nas propriedades, que serão adicionadas à superfície revestida requerida para uma aplicação específica (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

2.4.1 Revestimento (*Cladding*)

O processo de revestimento *cladding* é normalmente utilizado para depositar ou aplicar material superficialmente a um substrato. É aplicado geralmente uma camada espessa em aços-carbono e de baixa liga para aumentar a resistência a temperatura e a corrosão. Neste caso a resistência mecânica do revestimento não é considerada na fabricação do componente (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Usualmente a deposição do revestimento é realizada por soldagem com eletrodo revestido (SMAW) ou arco submerso (SAW). Ainda pode ser soldado por arco elétrico com gás de proteção (GMAW) ou ainda por arame tubular (FCAW) que também utiliza gás de proteção. Os metais para revestimento estão disponíveis como eletrodos revestidos, varetas, eletrodo em fita, arames sólido e tubular (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

2.4.2 Revestimento para acréscimo dimensional (*Buildup*)

É um método de revestimento em que o material de revestimento é depositado para alterar ou restaurar as dimensões ou forma de uma peça, em vez de aumentar a resistência ao desgaste ou à corrosão. A composição e propriedades do metal revestido geralmente são semelhantes ao metal base. Isto é importante principalmente em peças que terão um tratamento térmico após a soldagem, como a têmpera, é de extrema importância que a composição do revestimento seja a mais próxima do metal base (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

2.4.3 Amanteigamento (*Buttering*)

Em muitas aplicações, o objetivo do amanteigamento é satisfazer uma consideração metalúrgica, como depositar um revestimento em um componente para torná-lo menos suscetível a fratura. Um exemplo, é a aplicação de um aço com baixo teor de carbono em um aço de alto carbono para reduzir o teor total. O amanteigamento também pode ser usado para criar uma transição entre metais com coeficientes de expansão diferentes que estarão expostos as mesmas temperaturas de ciclagem em serviço (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011).

Pode ser usado ainda para criar uma barreira que retardará a difusão de elementos indesejáveis do metal base ao metal de solda do revestimento durante algum tratamento térmico após a soldagem ou em temperaturas elevadas de serviço. Um exemplo recorrente é a aplicação de uma camada de “amortecimento” entre um aço de baixa liga e um revestimento em aço inoxidável (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

2.4.4 Revestimento duro (*Hardfacing*)

O revestimento duro pode ser aplicado de forma manual, semiautomática, mecanizada e automática incorporando processos de soldagem como eletrodo revestido (SMAW), arco elétrico com gás de proteção (GMAW), arco submerso (SAW), por arame tubular (FCAW) e processos de pulverização térmica como arco spray (ASP) e plasma spray (PSP). Também pode-se aplicar revestimentos duros pelo processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo de tungstênio não

consumível (GTAW) e pelo processo de metalização por chama em alta velocidade (HVOF). Os metais para revestimento duro estão disponíveis como eletrodos revestidos, varetas, eletrodo em fita, pastas, pó, arames sólido e tubular (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

As propriedades mais importantes dos revestimentos duros são a dureza, resistência à abrasão, resistência ao impacto, resistência a erosão, resistência a temperaturas elevadas e resistência à corrosão, geralmente obtidas com a formação de carbetos de tungstênio e de cromo na microestrutura do material (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

A resistência à abrasão é a razão mais frequente para aplicação de revestimento duro. Existe uma correlação aproximada entre dureza e resistência à abrasão, porém nem sempre a dureza e o teor de liga (às vezes usado erroneamente como critério) é um índice confiável de resistência à abrasão. A melhor abordagem na seleção do revestimento adequado é identificar os fatores prioritários de desgaste e depois compará-los com as várias ligas de revestimentos, sendo testados esses fatores em ambientes e condições controladas. Abaixo encontram-se os fatores a serem identificados:

- Tipo e características dos elementos abrasivos encontrados (dureza, geometria cortante, tamanho da partícula e resistência);
- A quantidade de impacto;
- A quantia de apoio fornecida ao depósito;
- Os níveis de carga envolvidos;
- A natureza das cargas (tração, compressão ou cisalhamento);
- A temperatura de operação e condições significantes do ambiente.

Os dados usados para avaliação, sejam em serviço, em testes de desempenho ou no laboratório, devem ser examinados criticamente. Os próprios testes devem fornecer resultados reprodutíveis correlacionados com o desempenho do serviço (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Depósitos de solda contendo carboneto de tungstênio, carboneto de vanádio-tungstênio ou carboneto de cromo, normalmente são usados para resistir ao desgaste causado pela abrasão sob baixa tensão, devido a dureza proporcionada pelos carbetos. No caso da abrasão por moagem, materiais tenazes podem superar materiais de dureza elevada visto que é comum encontrar abrasão sob alta tensão e impactos ocorrendo simultaneamente. Para resolver estas combinações de desgaste

e impacto, um grupo de ligas que variam de manganês austenítico, ferros martensíticos e aços endurecíveis ao ar são comumente usados (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Devido à presença de cargas de alta tensão e altas cargas de impacto, a escolha de materiais resistentes à abrasão por goivagem pode valorizar também a tenacidade do que extrema dureza. Os componentes a serem revestidos devem ser massivos, robustos e tenazes o suficiente para resistir as fraturas quebradiças dos revestimentos frágeis porém resistentes ao desgaste abrasivo. Nesses casos os revestimentos duros podem fornecer diminuição de custos significativas (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Entretanto às vezes as condições são tão severas que uma grande tenacidade é imperativa, mesmo no material de revestimento. Nesses casos, ligas de manganês austenítico é recomendado para o metal base e revestimento, sendo uma questão de substituir as áreas desgastadas com um aço manganês adequado. Ainda assim esses reparos são complementados com barras, chapas e outras formas da mesma liga (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

2.5 Ligas para revestimento

Não existe uma liga universal para soldagem de revestimento duro, contudo as ligas destinadas a materiais à base de ferro, como o aço, representam a maior parte das aplicações. Estas ligas podem ser subdivididas de acordo com a sua microestrutura. Cada tipo de microestrutura possui uma resistência a uma certa forma de desgaste melhor que outra ou ainda mais viabilidade econômica. O teor de carbono das ligas de revestimento duro de ferro é o elemento que mais afeta as suas propriedades.

Quando o teor de carbono é limitado a cerca de 0,3% e o teor total dos elementos de liga como cromo, manganês, e molibdênio é limitado a cerca de 5%, as propriedades metalúrgicas das ligas de revestimento duro comportam-se de modo similar aos aços de alta resistência e baixa liga. As microestruturas formadas nesses casos são ferríticas quando resfriado lentamente, contudo se resfriado de forma abrupta após a soldagem ocorre a formação de microestruturas bainítica e martensítica.

Estas ligas são frequentemente usadas para acréscimo dimensional em componentes desgastados fornecendo um substrato com tenacidade e resistência à compressão relativamente altas e resistência ao desgaste deslizante metal-metal razoável. É possível evitar rachaduras após a soldagem realizando um preaquecimento à temperatura ambiente a cerca de 150°C dependendo da quantidade de carbono presente (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Quando o teor de carbono está entre cerca de 0,35% e 0,8% e o teor total de liga (geralmente cromo, manganês, molibdênio e níquel) é limitado até cerca de 5%, o depósito de solda é majoritariamente martensítico. Se forem aplicadas temperaturas muito altas no preaquecimento e pós-soldagem entre 260°C e 430°C a microestrutura pode não se tornar martensítica. Essas ligas geralmente requerem preaquecimento de 120°C ou acima para obter uma deposição por soldagem sem rachaduras. Possuem melhor resistência ao desgaste deslizante metal-metal que as ligas de baixo carbono usadas para acréscimo dimensional, no entanto a tenacidade é menor após soldado. Depósitos martensíticos deste tipo são frequentemente, mas nem sempre, temperados entre 425°C e 650°C melhorando a tenacidade, mas com perda de dureza e resistência à abrasão (MELLOR, 2006; AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Aumentando-se o teor de elementos de liga tem-se os aços ferramenta. Este grupo também possui microestrutura martensítica e contém cerca de 0,25% a 0,6% de carbono e 6% a 12% de metais de liga (Cr principalmente). Além do cromo, eles também podem incluir quantidades significativas de tungstênio, molibdênio ou vanádio, ou alguma combinação destes. Estes últimos elementos conferem características de endurecimento secundário ao revestimento depósito.

Depósitos de aço ferramenta geralmente requerem preaquecimento de 200°C a 315°C para evitar a formação de rachaduras. Antes da têmpera, eles devem ser resfriados lentamente a cerca de 120°C para que a transformação de austenita a martensita seja completa. Durante o processo de têmpera os carbonetos de liga enriquecidos em tungstênio, molibdênio ou vanádio precipitarão para manter a dureza ou até aumentá-la. Essas composições retêm a dureza a temperaturas próximas a temperatura em que a têmpera foi feita. Isso se mostra útil para resistência ao desgaste e deformação em matrizes de forjamento e aplicações similares (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

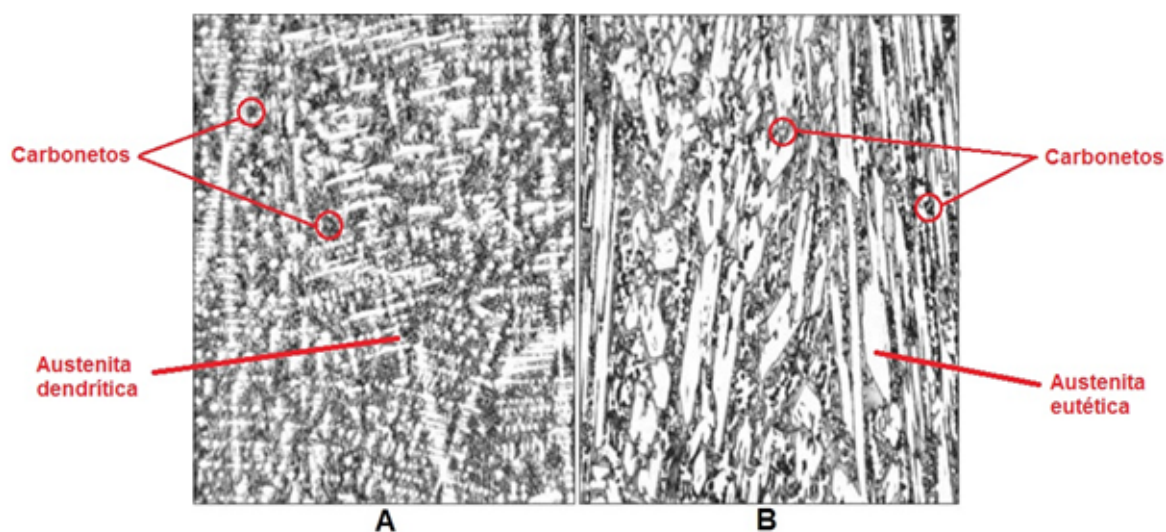
Nas ligas com altos teores de C e Cr, para composições de cerca de 2% a 3% de carbono e 5% a 30% ou mais de metais de liga (contendo majoritariamente cromo), a microestrutura formada consiste em matriz de austenita dendrítica com carbonetos dispersos (Figura 11A). Os carbonetos são mais duros que a martensita e fornecem resistência à abrasão enquanto a austenita fornece tenacidade. Essas composições são mais úteis quando o desgaste consiste em uma combinação de abrasão e impacto.

Em composições acima de 3% e até cerca de 4% de carbono com cerca de 13% a 30% ou mais de metais de liga (contendo majoritariamente cromo), formam-se depósitos com dureza limitada, mas boa resistência à abrasão. Eles são usados em revestimentos aplicados no manuseio de equipamentos para polpas, cinzas ou materiais secos e arenosos (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Composições com teor acima de 4% até quase 7% de carbono e com 15% a 35% de metais de liga, também contendo majoritariamente cromo, são constituídos por carbonetos primários maciços em uma matriz eutética de austenita, como é possível ver na Figura 11B. Os carbonetos primários geralmente são encontrados em partículas do tipo M_7C_3 nas regiões ricas em cromo e aparecem como hastes hexagonais grandes na microestrutura. Contudo, em certas ligas de ferro de alto teor de cromo é possível encontrar também carbonetos do tipo M_6C e M_3C .

Os depósitos primários de carbonetos têm alta resistência à abrasão, porém baixa tenacidade podendo resistir a abrasão a temperaturas de 650°C ou superiores. São aplicados em sinos de alto-forno, equipamentos de manuseio de cimento e quaisquer outros equipamentos com situações de desgaste abrasivo severo (MELLOR, 2006; AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Figura 11 – Microestruturas de revestimentos com alto teor de Cr depositados via soldagem: A- 2 a 3% C e 5 a 30% Cr; B- 4 a 7% C e 15 a 35% Cr.

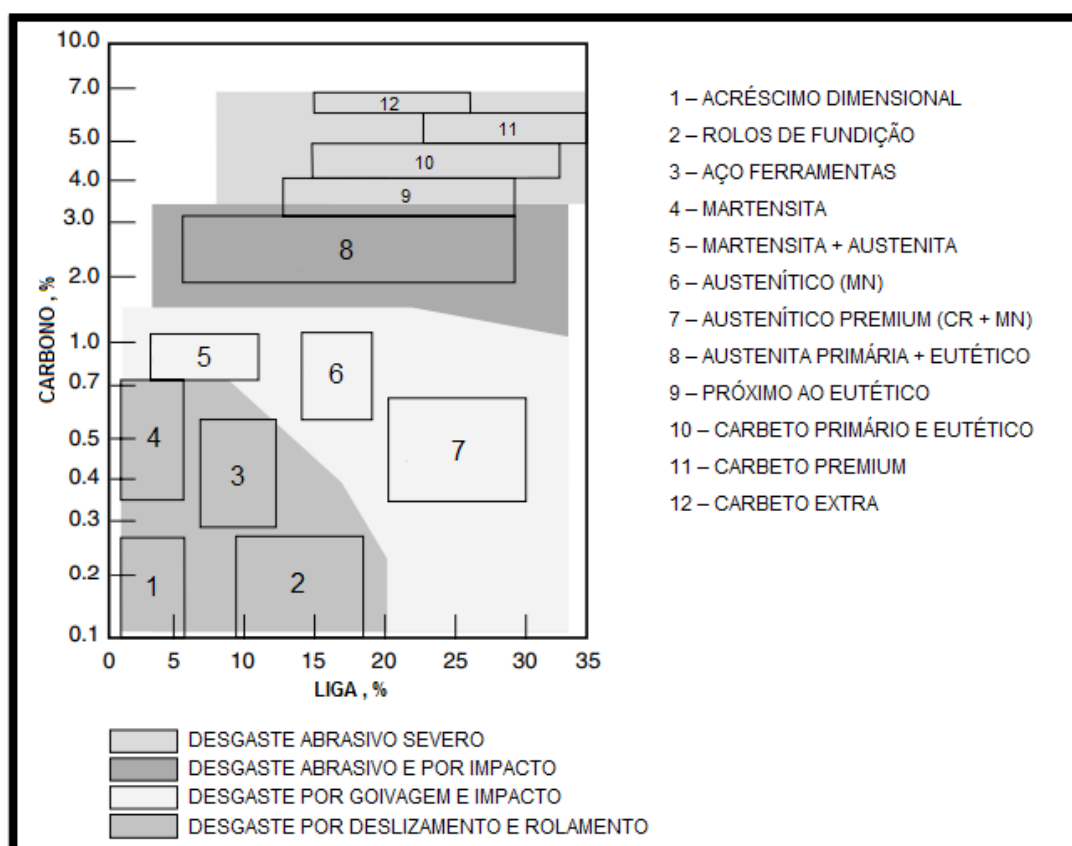


Fonte: Adaptado de AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b

De acordo com o percentual de carbono e de metais liga presentes na composição do depósito é possível estabelecer um diagrama resumindo o desenvolvimento das microestruturas em aplicações de revestimento duro. Na Figura 12 encontra-se o diagrama que ilustra as aplicações de revestimentos duros das ligas de ferro, porém também é possível visualizar os efeitos da diluição.

Por exemplo, uma liga com 4,5% de carbono e 25% de cromo produziria carbonetos primários em um metal de solda de baixa diluição. Mas em uma taxa de 40% de diluição sobre aço-carbono, que pode ser obtido através da soldagem por arco submerso, a primeira camada consistiria de apenas cerca de 2,7% de carbono e 15% de cromo. Como resultado haveria a formação de uma microestrutura de austenita, similar a Figura 11 “A”. A resistência à abrasão dessa primeira camada sobre o aço-carbono seria consideravelmente mais baixa que de uma solda com menor diluição utilizando-se o mesmo material, embora que a tenacidade seria aumentada (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Figura 12 – Diagrama das aplicações de revestimento duro de acordo com a composição



Fonte: Adaptado de American Welding Society (2011b)

No gráfico da Figura 12 fica evidente o efeito do percentual de carbono na composição da liga, de modo que o percentual influencia na aplicação. Por exemplo, as ligas de revestimento aplicadas em desgaste abrasivo, tanto severo como moderado, são ligas com teores de carbono elevados.

2.6 Deposição de revestimento

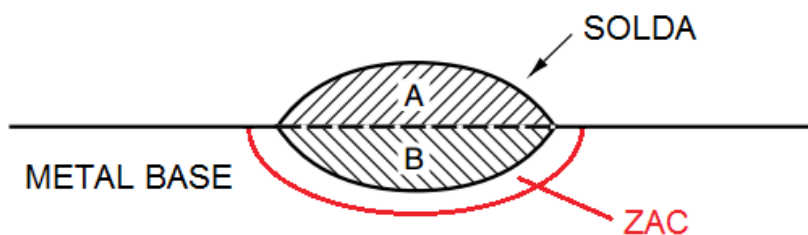
De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2011) a soldagem é um “processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atenuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos.” A soldagem pode ser realizada por fusão ou pressão, sendo fusão o método mais utilizado nos processos de soldagem.

No caso da deposição de revestimentos através de um processo de soldagem, não há existência de juntas ou chanfros no processo. O metal de adição, neste caso, é depositado em uma superfície da peça. Por este motivo, este tipo de procedimento requer considerações especiais que não são requeridas na soldagem de união. A composição química e as propriedades mecânicas do revestimento, por exemplo, geralmente são muito diferentes do metal base. Além disso uma área relativamente grande do metal base é coberta pelo revestimento afetando mais intensamente a microestrutura do metal base. Outra característica inerente ao processo de deposição de revestimentos é que a menor quantidade possível de metal de solda é desejada para o revestimento e a diluição entre o metal base e metal depositado deve ser mínima, evitando penetração excessiva (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

2.6.1 Controle da diluição

Provavelmente a grande e principal diferença entre a soldagem de revestimento e de união seja que a diluição é mais preocupante para os revestimentos. A Figura 12 demonstra o perfil típico de um cordão de solda e a equação 1 representa o cálculo da diluição.

Figura 12 – Perfil típico de um cordão de solda.



Fonte: Adaptado de American Welding Society (2011b)

$$\%DILUIÇÃO = \frac{B}{A+B} \times 100 \quad (1)$$

A composição e propriedades dos metais de revestimento são fortemente influenciadas pela diluição e por causa disso a quantidade de diluição que será obtida após cada processo de soldagem deve ser levado em consideração para

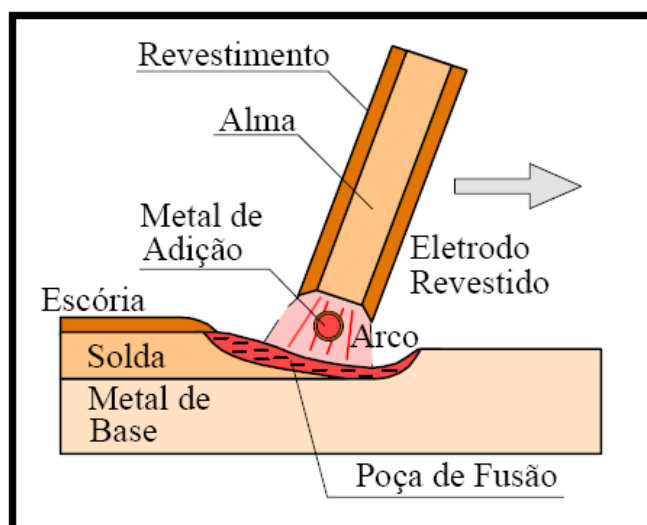
selecionar adequadamente a combinação entre material para o revestimento e o processo de soldagem necessário (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Isso pode ser demonstrado em um processo de revestimento inoxidável por SMAW em um aço de baixa liga. Esse processo pode apresentar uma taxa de diluição de 15 a 50% após as duas ou três primeiras camadas. Portanto, se um eletrodo E308 (19% de cromo e 9% de níquel) fosse usado em aço de baixa liga ou aço-carbono com diluição de 30%, um depósito de primeira camada consistiria em apenas 70% de revestimento inoxidável, cerca de 13% de cromo e 6% níquel. Por outro lado, se um eletrodo E309 (25% de cromo e 12% de níquel) sob as mesmas condições de soldagem, o depósito final conterá cerca de 17% de cromo e 8% de níquel. Esse depósito teria melhor resistência à corrosão e melhores propriedades mecânicas como ductilidade (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

2.6.2 Processo de soldagem com Eletrodo Revestido (SMAW)

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2011) a soldagem a arco com eletrodos revestidos (SMAW) é um processo que produz a coalescência entre metais através do aquecimento com um marco elétrico estabelecido entre o eletrodo revestido e a peça que está sendo soldada. A Figura 13 ilustra o processo esquematicamente.

Figura 13 – Soldagem com eletrodo revestido



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2011)

O eletrodo revestido é feito de uma vareta metálica chamada “alma” que conduz a corrente elétrica e fornece material de adição para o processo de soldagem. Esta alma é recoberta por uma mistura de diferentes materiais em uma camada que “reveste” o eletrodo. O revestimento possui funções como:

- Estabilizar o arco elétrico;
- Ajustar a composição química do cordão de solda pela adição de elementos de liga e eliminação de impurezas;
- Proteger contra a contaminação da atmosfera através da geração e gases e uma camada de escória;
- Conferir certas características de operação, mecânicas e metalúrgicas ao eletrodo e a solda.

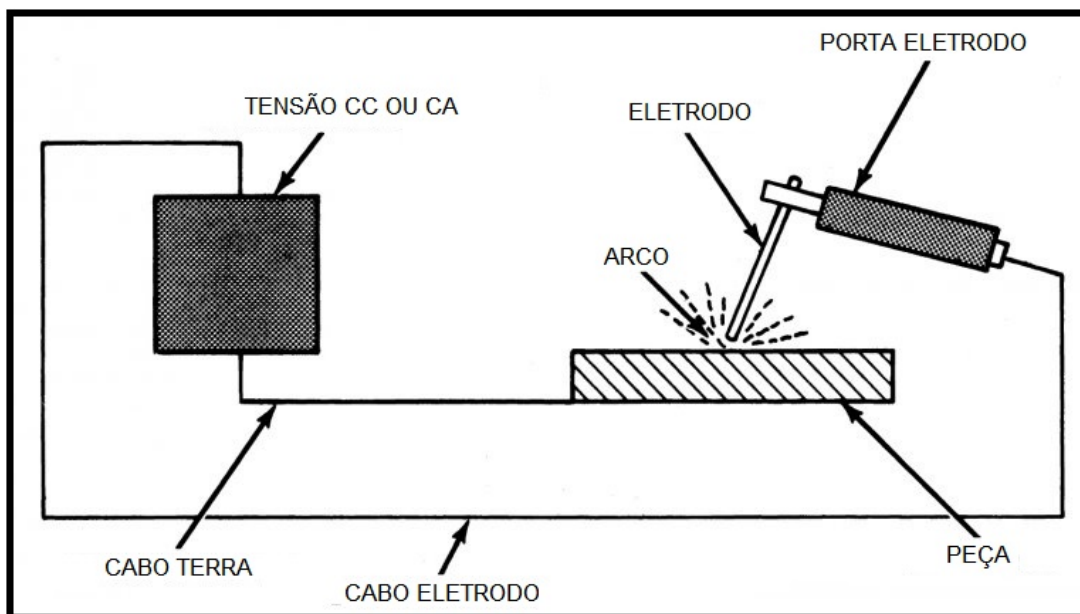
Devido à possibilidade de formular inúmeras composições químicas este processo se torna ideal para aplicação de revestimentos, apresentando grande versatilidade quanto aos metais que podem ser soldados. Além disso, o custo deste processo é baixo considerando o equipamento necessário se comparado a outros processos e também é possível aplicá-lo em locais de difícil acesso ou espaços abertos sujeitos a correntes de ar (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Contudo, uma desvantagem desse processo seria sua baixa produtividade em relação a outros processos de soldagem como arco submerso (SAW) ou arco elétrico com gás de proteção (GMAW). Outra limitação é a exigência maior de habilidade do soldador sendo necessário um treinamento específico, longo e oneroso. A soldagem com eletrodo revestido é muito utilizada em soldagem de campo ou em altura, como em estaleiros navais e montagem de estruturas de aço (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

É um processo de soldagem manual permitindo ser aplicado em um grande número de metais como aços-carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, ferros fundidos, alumínio, cobre e níquel. Metais de baixo ponto de fusão como o chumbo, estanho e zinco e metais refratários ou demasiadamente reativos como nióbio, molibdênio, titânio e zircônio não são soldáveis com eletrodo revestido (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011; DALLOS, 2018).

Os elementos e componentes de soldagem manual com eletrodos revestidos são em geral fonte de energia, cabos para o eletrodo e a peça, porta-eletrodos e outras ferramentas, como escovas e picadeiras para remoção da escória. Na Figura 12 uma representação de soldagem com eletrodo revestido.

Figura 14 – Elementos típicos de soldagem com eletrodo revestido



Fonte: Dallos (2018)

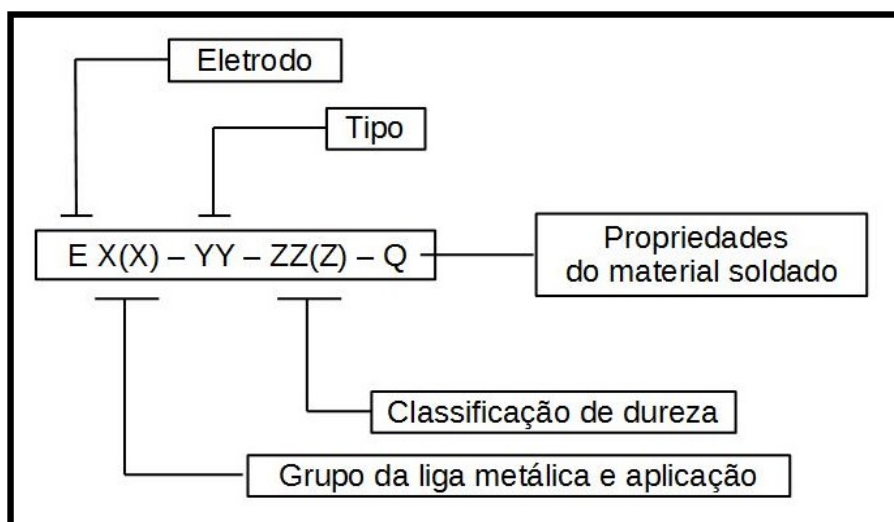
Os eletrodos revestidos são compostos duas partes: por um revestimento e por uma alma metálica. São comercializados em bitolas de 1,5 até 8mm (alma) e também pelo comprimento variando entre 23 e 45 cm. Apresentam diversos tipos de revestimentos que determinam as características operacionais influenciando ainda a composição química e propriedades mecânicas da solda. As principais finalidades do revestimento são:

- Formação de uma camada de escória protetora;
- Dissolver óxidos e contaminantes na superfície a ser soldada;
- Reduzir a quantidade de fumos e respingos;
- Reduzir a velocidade de resfriamento da solda;
- Possibilitar o uso de diferentes tipos de polaridade;
- Aumentar a taxa de deposição;
- Facilitar a soldagem em diversas posições.

A *American Welding Society* é a principal entidade na classificação e normatização de eletrodos revestidos. No Brasil as normas mais utilizadas são da AWS, embora muitos fabricantes de eletrodos também baseiam-se em outras normas como DIN (*Deutsches Institut für Normung*) ou ISO (*International Organization for Standardization*) dependendo da aplicação do eletrodo revestido. A norma AWS A5.1 é a mais utilizada para classificar os eletrodos revestidos para soldagem em aços-carbono. Os eletrodos para aço inoxidável e outras ligas ferrosas com teores altos de cromo são agrupados pela norma AWS A 5.4. Já para os eletrodos para soldagem de revestimentos são classificados nas normas AWS A 5.13 e AWS A5.21, sendo a primeira para soldagem com eletrodo revestido (SMAW).

No entanto, os eletrodos revestidos para revestimento duro são classificados pela norma DIN 8555 de metais de adição usados para revestimentos. De acordo com esta norma os eletrodos são classificados e identificados pela liga que formam, a aplicação destinada, tipo de eletrodo, dureza após aplicação e propriedades do revestimento gerado, conforme a representação na Figura 15 (DIN,1983; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Figura 15 – Classificação dos eletrodos norma DIN 8555



Fonte: O autor

De acordo com a American Welding Society (2010) e American Welding Society (2011a) nas normas A5.13 e A5.21 a classificação dos eletrodos para revestimentos é feita com base na composição do depósito não diluído, com exceção dos eletrodos de carboneto de tungstênio. Algumas das classificações e composições de eletrodos à base de ferro extraídas destas normas podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Categorias dos eletrodos das normas AWS A5.13 e A5.21 e a composição química em (%)

Classificação AWS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Fe	Outros
EFe3	0,50-0,80	0,5-1,5	1	4,0-8,0	–	1	Restante	1
EFe5	0,30-0,80	1,5-2,5	0,9	1,5-3,0	–	–	Restante	1
EFeCrA5	1,5-2,5	0,5-1,5	2	24-32	4	4	Restante	1
EFeCrA6	2,5-3,5	0,5-1,5	1,0-2,5	24-30	–	0,5-2,0	Restante	1
ERFeCrA9	3,5-5,0	0,5-1,5	2,5	24-30	–	–	Restante	1
ERFeCrA10	5,0-7,0	0,5-2,5	1,5	20-25	–	–	Restante	1

Fonte: American Welding Society (2010, 2011a)

Os eletrodos da categoria EFe3 são do tipo aço ferramenta, martensíticos com formação de carbonetos e endurecíveis ao ar, podendo atingir uma dureza entre 55 e 60 HRC. Geralmente estas ligas de eletrodo são usadas em aplicações em que ocorre abrasão metal-metal, como forjas, matrizes, punções. Também podem ser aplicados em situações de desgaste abrasivo com areia e terra e de impacto moderado (MELLOR, 2006; AWS, 2010).

Os eletrodos da categoria EFeCrA5 produzirão depósitos com carboneto de cromo em uma matriz austenítica. Os depósitos que não apresentam magnetismo dessa categoria possuem usinabilidade razoável e deve-se limitar a aplicação até 3 camadas para evitar rachaduras de alívio. Revestimentos desse material são usados para situação de desgaste metal-metal ou areia e terra e abrasão sob baixa tensão.

A categoria EFeCrA6 é similar a categoria EFeCrA5 com um percentual de carbono superior. O depósito de solda formará carbonetos de cromo hexagonais em uma matriz de carbonetos austeníticos com uma dureza entre 50 e 60 HRC. O depósito desenvolve trincas de alívio e o metal base do revestimento pode ser aço-carbono, aço-liga ou aço austenítico ao manganês. A adição de molibdênio aumenta a resistência ao desgaste por abrasão sob alta tensão.

Revestimentos da categoria EFeCrA9 também produzirão carbonetos de cromo hexagonais em uma matriz austenítica com mesma faixa de dureza da categoria EFeCrA6 e também desenvolve trincas de alívio. Pode ser aplicado em aços de baixa liga, aços-carbono, aço austenítico ao manganês e aço inoxidável austenítico em situações com desgaste abrasivo e impacto moderado (MELLOR, 2006; AMERICAN WELDING SOCIETY, 2010; AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011a).

Na norma DIN 8555 as categorias E6-UM-60G e E10-UM-60GR são similares as EFe3 e EFeCrA6 respectivamente, podendo ser comparadas. A categoria E6-UM-60G possui um teor acima de 5% de Cr e teor de C entre 0,2 e 2,0% aproximadamente, sendo indicado para ferramentas de corte, lâminas de cisalhamento, rolos para laminadores a frio.

A categoria E10-UM-60GR possui alto teor de C e de ligas de Cr com ou sem formação de carboneto adicional. É aplicado em reparos em equipamentos de mineração e siderurgia, revestimento de peças de máquinas na indústria de construção e agricultura, escavadeiras de revestimento, britadores de sinterização. Ambas as categorias são indicadas para desgaste abrasivo, sendo a categoria E10-UM-60GR também indicada para situações em que a liga formada após a soldagem seja inoxidável.

2.6.3 Efeito dos principais parâmetros de soldagem para revestimento

A maioria dos revestimentos são aplicados por soldagem com arco elétrico utilizando eletrodos consumíveis. A diluição tem grande importância nesse processo de fabricação, sendo necessário considerar cada variável existente no processo de soldagem. Muitas dessas variáveis exigem um controle mais rigoroso na aplicação de revestimentos (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Na soldagem manual com eletrodos revestidos as principais variáveis operatórias para revestimentos são: Corrente, tipo de corrente (polaridade), tensão, velocidade de soldagem, tipo e diâmetro do eletrodo, técnica de soldagem do soldador e posição. A seguir está descrito como estas variáveis afetam a diluição para a soldagem de revestimentos:

- Corrente: A faixa de corrente aplicada depende do diâmetro e do material da alma do eletrodo, do tipo e espessura do revestimento formador de escória e da deposição de soldagem. Para cada tipo e diâmetro de eletrodo revestido existe uma

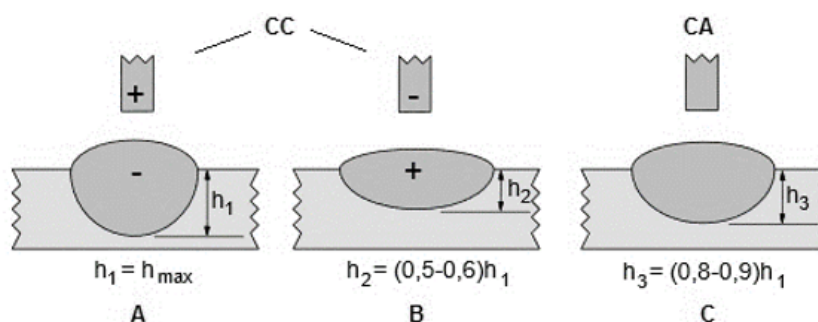
faixa de corrente de soldagem recomendada pelo fabricante. Correntes inferiores a corrente mínima podem causar instabilidade no arco e aquecimento e fusão insuficientes. Correntes superiores a máxima recomendada podem prejudicar o revestimento devido ao excessivo aquecimento.

A corrente de soldagem é o parâmetro que estabelece maior controle a poça de fusão, largura e penetração da solda no metal base, que tendem a aumentar conforme a corrente aumenta. Correntes muito elevadas produzem grandes poças de fusão dificultando o controle, além de poderem causar a deterioração do revestimento, respingos excessivos, perda de resistência mecânica e tenacidade.

A corrente de soldagem aumenta conforme o comprimento do eletrodo diminui durante o processo. A polaridade e o tipo de corrente afetam as dimensões e a forma da poça de fusão, transferência de metal de adição e a estabilidade do arco. Ambas polaridade e tipo de corrente são também indicados pelo fabricante do eletrodo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

- Tipo de corrente e polaridade: Corrente contínua direta (CC-), onde a polaridade negativa fica no eletrodo, resulta em menor penetração e portanto menor diluição que corrente contínua reversa (CC+) (positivo no eletrodo). Já a corrente alternada (CA) produz uma diluição intermediária. Estes efeitos são ilustrados na Figura 16 (MELLOR, 2006; AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Figura 16 – Influência do tipo de corrente na penetração: A) polaridade inversa (CC+); B) polaridade direta (CC-) e C) corrente alternada (CA)



Fonte: Adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2011)

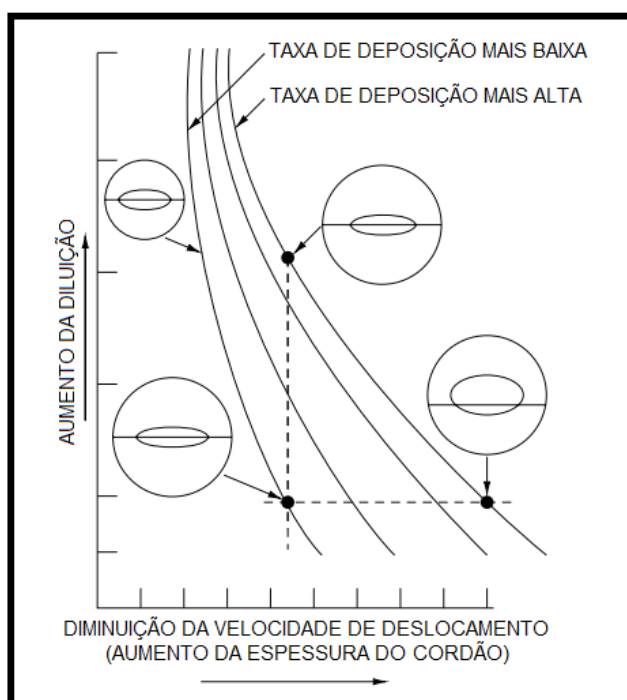
- Tensão: A tensão no arco varia entre 17 e 36 V dependendo do diâmetro do eletrodo, comprimento do arco, da corrente utilizada e do revestimento. A tensão de soldagem tende a aumentar se houver um aumento da corrente, diâmetro do

eletrodo e comprimento do arco. Como a soldagem é manual, este último parâmetro é controlado pelo soldador dependendo de sua habilidade e experiência.

A manutenção do comprimento do arco em uma faixa adequada é importante para se obter uma solda aceitável. Um comprimento muito pequeno causa um arco intermitente, tendendo a criar cordões estreitos e côncavos. Já um arco de grande comprimento causa um arco sem direção e concentração, mais respingos e proteção deficiente favorecendo a formação de porosidades indesejadas. Uma recomendação é de que o comprimento do arco deve ser de 0,5 a 1,1 vezes o diâmetro da alma do eletrodo revestido (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

- Velocidade de soldagem(deslocamento): Deve ser escolhida de forma que o arco fique ligeiramente à frente da poça de fusão, velocidades muito altas resultam em um cordão estreito, com pouca penetração, mordeduras, aspecto ruim e escória de remoção difícil. Já uma velocidade muito baixa cria um cordão muito largo com penetração e reforço excessivo. A Figura 17 mostra os efeitos da velocidade de deslocamento na taxa de diluição, mantendo-se os outros parâmetros de soldagem constantes.

Figura 17 – Efeito da velocidade de deslocamento na diluição



Fonte: American Welding Society (2011b)

Uma diminuição na velocidade de soldagem diminuirá a quantidade de metal base que será fundida, o que aumenta a quantidade de metal adicionado no revestimento, por unidade de tempo ou distância. Dessa forma a diluição será menor. A redução na diluição é provocada pela mudança na forma e espessura do cordão e pelo fato de que a força do arco é gasta na poça de fusão e não no metal base. (MELLOR, 2006; AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

- Técnica de soldagem: Durante a execução da solda existem três movimentos principais executados pelo soldador, sendo estes:

- I. Movimento de mergulho, avanço do eletrodo em direção à poça de fusão mantendo o comprimento do arco constante, ou seja, a velocidade de mergulho deve ser igual à velocidade de fusão do eletrodo;
- II. Movimento de translação, que é o deslocamento do eletrodo e do arco mantendo-se uma velocidade uniforme;
- III. Movimento de tecimento, é o deslocamento lateral em relação ao eixo da solda utilizado para se obter um cordão mais largo, fazer a escória flutuar e controlar a poça de fusão. Este movimento não deve ser muito amplo, não excedendo mais que três vezes o diâmetro da alma do eletrodo para não aumentar demasiadamente a energia de soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

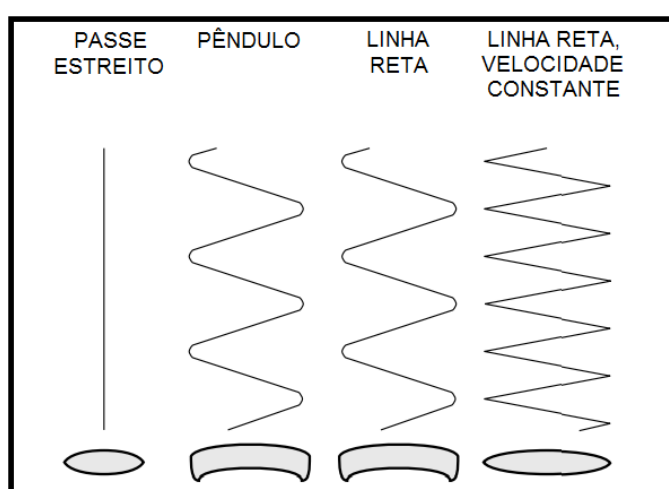
- Diâmetro do eletrodo: Diâmetros de eletrodo menores estão associados a correntes mais baixas, o que geralmente causa uma taxa de diluição menor. Já numa dada corrente em um processo de soldagem GMAW eletrodos maiores (e de menor densidade de corrente) produzem menor diluição se estes são usados no modo de transferência globular. Eletrodos menores são usados no modo de transferência por spray no processo GMAW.

- Comprimento do eletrodo: Ao usar eletrodos consumíveis, eletrodos longos diminuem a diluição aumentando a taxa de fusão do eletrodo, difundindo a energia do arco à medida que ele se encontra com o metal base. Todavia, um eletrodo curto aumenta a diluição, dentro dos limites.

- Espaçamento ou sobreposição: Diminuindo o espaçamento entre os cordões de revestimento ou havendo sobreposição dos mesmos a diluição será menor, por que o metal já depositado é refundido e adicionado a poça de fusão e menos metal base é fundido e adicionado a poça de fusão (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

- Oscilação do eletrodo: Quanto maior for a largura no padrão de oscilação do eletrodo a diluição será reduzida. A frequência da oscilação também afeta a diluição, de modo que quanto maior a frequência de oscilação, menor é a diluição. O cordão de passe estreito (sem oscilação) e os três padrões básicos de oscilação, pêndulo, linha reta e velocidade constante em linha reta, são mostrados na Figura 18 (MELLOR, 2006; AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

Figura 18 – Técnicas de oscilação para soldagem em revestimento



Fonte: American Welding Society (2011b)

A oscilação por pêndulo é caracterizada por uma ligeira hesitação (tempo de permanência) em ambos os lados do cordão, que produz uma penetração ligeiramente maior e uma diluição um pouco maior. O comprimento do arco muda constantemente de acordo com a oscilação, resultando em características variáveis do arco. A oscilação em linha reta fornece praticamente os mesmos resultados que a oscilação pendular, mas a vantagem é que o arco permanece com as características, porque o comprimento do arco é constante.

A oscilação de velocidade constante e linear produz o menor nível de diluição e proporciona ao movimento um caminho horizontal, mantendo o comprimento do arco constante. O movimento ideal é programado para não ter tempo de espera final, eliminando a penetração mais profunda resultante da hesitação em ambos os lados.

Às vezes, é desejada uma penetração ligeiramente maior no lado de amarração do cordão. Alguns equipamentos de oscilação têm provisões para controlar o tempo de permanência em um ou nos dois lados da oscilação (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

- Posição de soldagem ou inclinação do metal base: A posição de soldagem na qual o material de revestimento é aplicado tem uma influência importante na quantidade de diluição produzida. Dependendo da posição de soldagem ou inclinação da peça, a gravidade fará com que a poça de fusão se desloque à frente do arco, atrás do arco ou permaneça embaixo.

Quanto mais a poça de fusão fica à frente do arco ou sob ela, menos ela penetra no metal base, diminuindo a diluição. A poça de fusão atua como um amortecedor, absorvendo parte da energia do arco antes que ela possa fundir mais metal base. Esta absorção de energia do arco achata e espalha a poça e, conseqüentemente, cria um cordão de solda mais largo. Se a poça de fusão estiver muito à frente do arco ou for muito espessa, haverá derretimento insuficiente da superfície do metal base e a fusão não ocorrerá.

Dessa forma, a situação em um processo de soldagem de revestimento em que a diluição será menor, por conta da posição de soldagem será em uma superfície plana porém inclinada com um movimento descendente. A posição horizontal plana apresentará diluição bem maior que a posição plana inclinada (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011b).

2.6.4 Aporte térmico

A maior parte dos processos de soldagem por fusão se caracteriza pela utilização de uma fonte de calor intensa e localizada. Esta energia concentrada pode causar variações na microestrutura e propriedades em um pequeno volume de material devido as variações bruscas de temperatura, altos gradientes térmicos e temperatura elevada em pequenas regiões. Na soldagem a arco elétrico o aporte térmico é definido como o calor cedido à junta soldada por unidade de comprimento e é calculado pela equação 2 (ESAB; 2005).

$$E = \frac{V \cdot I}{v} \cdot \eta \quad (2)$$

Na equação “ E ” corresponde ao aporte térmico (J/mm), “ V ” é a tensão média do arco (V), “ I ” é a corrente utilizada no processo (A), “ v ” é a velocidade média de soldagem (mm/s) e “ η ” representa a eficiência térmica (%).

Dependendo do processo utilizado a eficiência térmica será diferente sendo que quanto mais próximo de “1” o valor da eficiência for mais eficiente o processo será. Na Tabela 3 valores típicos para o rendimento térmico dos principais processos de soldagem estão ilustrados.

Tabela 3 – Valores típicos para rendimento térmico (η)

Processo	η
SMAW	0,65 – 0,85
GMAW	0,65 – 0,85
GTAW (CC+)	0,50 – 0,80
GTAW (CC-)	0,20 – 0,50
SAW	0,80 – 0,99
Oxi-gás	0,25 – 0,80

Fonte: Adaptado de KOU (2003)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os eletrodos utilizados na deposição dos revestimentos sobre o metal base e a preparação das amostras para o processo de soldagem com eletrodo revestido. Serão demonstrados os métodos de cálculo da taxa de diluição e aporte térmico e também os procedimentos para os ensaios de microdureza e de desgaste abrasivo.

3.1 Materiais

Para a deposição dos revestimentos duros utilizou-se como metal base o aço ABNT 1020. Na Tabela 4 encontra-se a composição química do material utilizado.

Tabela 4 – Composição química (%) do aço ABNT 1020

Composição química (%)				
SAE/AISI	C	Mn	P (Máx)	S (Máx)
1020	0,18-0,23	0,3-0,6	0,03	0,05

Fonte: Gerdau (2003)

O depósito dos revestimentos foi feito com dois tipos diferentes de eletrodo revestido designados para desgaste abrasivo. A Tabela 5 mostra a identificação e características de cada eletrodo baseadas na norma DIN8555.

Tabela 5 – Composição química (%) e características dos eletrodos revestidos utilizados

Eletrodo	DIN E6-UM-60G	DIN E10-UM-60GR
Diâmetro	2,50mm	2,50mm
Comprimento	45cm	45cm
Dureza (Estimada)	56 a 58 HRC (613 e 653HV)	57 a 62 HRC (633 e 746HV)
C	0,55%	4,50%
Si	0,70%	4,50%
Mn	0,20%	0,75%
Cr	5,50%	24,00%
Mo	0,40%	–

Fonte: Hsoldas (2016) E DIN8555 (1983)

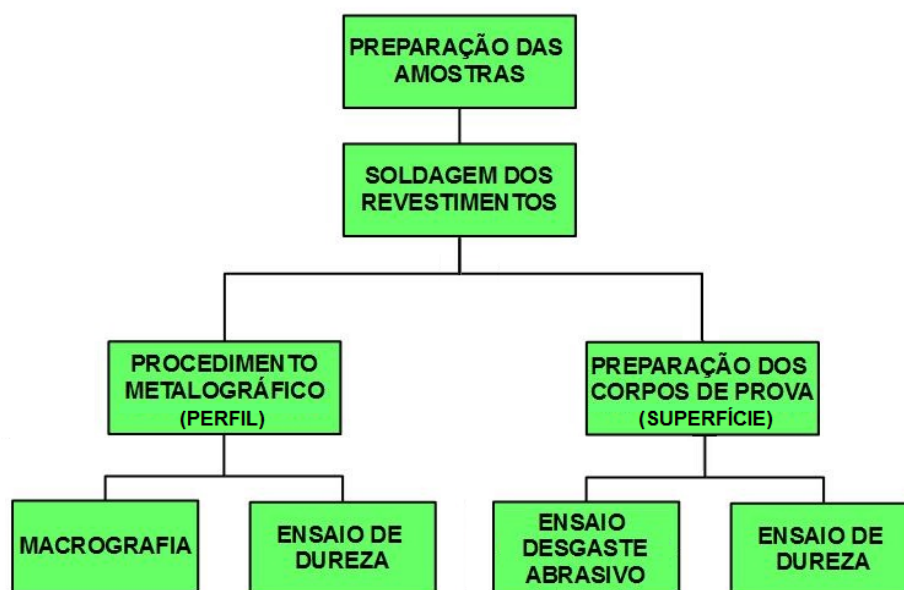
De acordo com a Hsoldas (2016) ambos eletrodos são aplicados em situações em que ocorre desgaste por abrasão, sendo o eletrodo E6-UM-60G destinado a situações com mais impacto e o E10-UM-60GR em situações de desgaste abrasivo severo porém sem impacto.

Aplicações mais comuns para o primeiro são lábios de caçamba, dentes de escavadeira, rosca transportadora, virabrequins, anéis e rolos de moagem. Já o segundo é recomendado para aplicação em bombas de areia, roscas sem fim, guias de atrito, marombas (máquinas usadas na fabricação de blocos cerâmicos) e superfícies deslizantes em geral.

3.2 Métodos

De início foram estabelecidos os parâmetros de soldagem conforme as recomendações do fornecedor dos eletrodos revestidos. Após serem submetidas aos procedimentos de soldagem de revestimento, as peças foram analisadas via macroscopia óptica, microdureza e ensaios de desgaste abrasivo. A Figura 19 apresenta a sequência de procedimentos para a realização da pesquisa.

Figura 19 – Fluxograma da sequência dos procedimentos

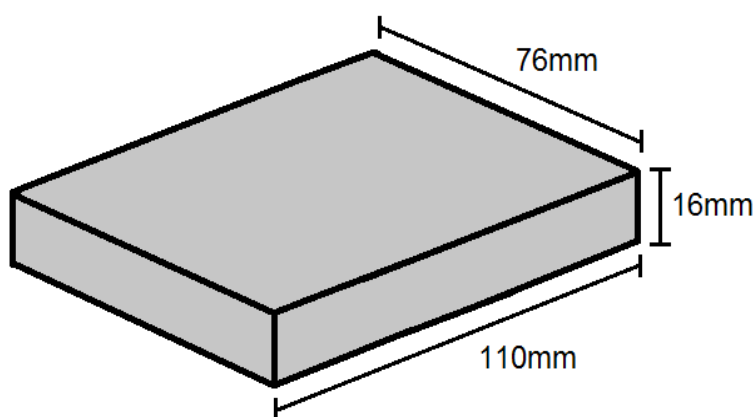


Fonte: O autor

3.2.1 Preparação das amostras

Primeiramente uma barra laminada de aço ABNT 1020 foi seccionada. As dimensões das amostras para posterior soldagem foram de 110x76x16 mm. A superfície a ser revestida foi lixada para remoção de óxidos e impurezas que poderiam contaminar o processo e prejudicar os resultados dos ensaios. A Figura 20 representa a forma e dimensão das amostras. Também foram riscadas linhas de orientação com uma distância de 6 mm entre cada uma a fim de propiciar repetibilidade dimensional na execução dos revestimentos.

Figura 20 – Dimensões das amostras



Fonte: O autor

3.2.2 Procedimento de Soldagem

Foi utilizado o processo SMAW, ou processo de soldagem a arco com eletrodo revestido. A máquina utilizada (Transformador-Retificador) para o procedimento de soldagem foi a Eutectic Castolin Master NT2000 AC/DC (Figura 21), do tipo corrente constante, presente no laboratório de soldagem do IFSC – Rau.

Figura 21 – Equipamento de soldagem utilizado.



Fonte: O autor

As variáveis analisadas foram: I) o material depositado (tipo de eletrodo) e, II) o tipo de corrente (polaridade). Foram feitas três amostras para cada parâmetro de soldagem gerando assim um total de doze amostras. Os parâmetros de soldagem utilizados e a numeração das amostras estão dispostos no Quadro 2.

Quadro 2 – Parâmetros de soldagem das amostras

Condição	Eletrodo	Tipo de Corrente	Amostra	Corrente
A	DIN E6-UM-60G	CA	1	95A
			2	
			3	
B		CC+	4	
			5	
			6	
C	DIN E10-UM-60GR	CA	7	
			8	
			9	
D		CC+	10	
			11	
			12	

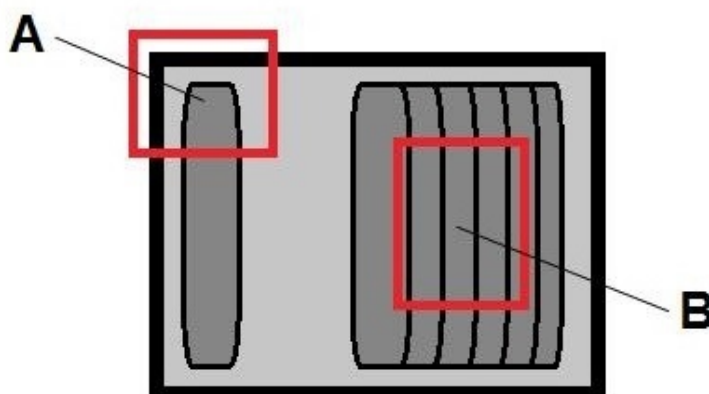
Fonte: O autor

Em cada amostra foi soldado um cordão único, para os ensaios macrográficos e de dureza na ZAC, além da camada de revestimento, que foi constituída por 6 cordões depositados com sobreposição lateral de aproximadamente 50%, e submetida a ensaios de desgaste abrasivo e dureza. Foram confeccionados

gabaritos que juntamente com as linhas roscadas auxiliaram na deposição dos cordões de modo a manter o cordão retilíneo e a oscilação constante. A técnica de oscilação do eletrodo durante a soldagem foi a técnica de oscilação pendular a velocidade constante (conforme Figura 18).

Na Figura 22 uma representação da deposição dos revestimentos soldados e a região de onde foram retirados os corpos de prova para micrografia e ensaio de desgaste abrasivo. Em “A” foram extraídos os corpos de prova dos cordões para macrografias e ensaio de dureza. Em “B” foram extraídos os corpos de prova dos revestimentos para o ensaio de desgaste abrasivo e dureza.

Figura 22 – Representação dos cordões de solda e regiões de extração dos corpos de prova para ensaios



Fonte: O autor

3.2.3 Cálculo do aporte térmico

Para o cálculo do aporte térmico de acordo com a fórmula (2) o valor de corrente (I) foi considerado 95 A para todas as condições. Para calcular a velocidade de soldagem (v) foi cronometrado o tempo de execução de cada passe. Considerando o a distância percorrida igual ao comprimento do cordão (76 mm) obteve-se a velocidade média de soldagem.

Como o processo de soldagem SMAW é de execução manual e o equipamento utilizado foi do tipo corrente constante, sabe-se que a tensão (V) durante soldagem é variável em função da distância da ponta do eletrodo à peça. Sendo assim, a tensão foi verificada durante o processo com alicate amperímetro, registrando-se a tensão

mínima e máxima durante a execução de cada passe para calcular a tensão média. Assim, com os valores de velocidade média calculada e tensão média verificada foi possível estimar o aporte térmico em cada amostra.

Os gabaritos confeccionados para auxiliar na deposição dos revestimentos serviram para fazer com que o processo de soldagem tivesse repetibilidade devido ao fato deste ter sido executado manualmente. O rendimento térmico (η) considerado foi de 0,75 (valor médio típico para o processo, conforme Tabela 3).

3.2.4 Cálculo da taxa de diluição

Para analisar a taxa de diluição do cordão soldado ensaios macrográficos foram realizados com execução de procedimento metalográfico padrão (lixamento e polimento) e obtenção de imagens do perfil dos cordões via estereoscópio binocular. Foram então medidas as áreas de penetração do cordão de solda e as áreas de reforço e calculadas as taxas de diluição.

Os ensaios macrográficos foram feitos no laboratório de Ensaio de Materiais do IFSC – Rau. Para análise das imagens utilizou-se o software IMAGE-PRO PLUS e ImageJ. Com auxílio do software ImageJ foram então medidas a área de penetração do cordão de solda e a área de reforço e calculada a taxa de diluição conforme a equação 1.

3.2.5 Ensaio de microdureza

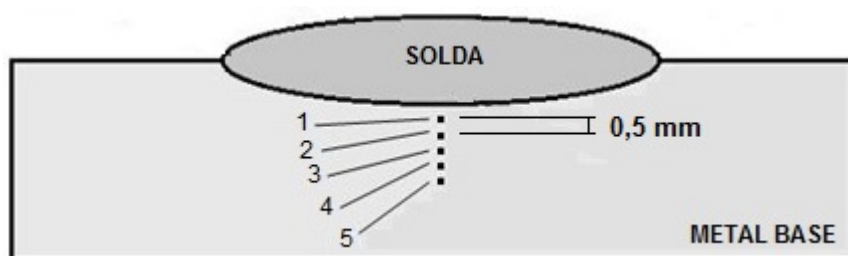
O ensaio de microdureza Vickers foi realizado com o auxílio do equipamento da marca Future Tech, modelo FM – 800 (Figura 23). A carga aplicada foi de 500 gf durante 15 segundos. Para análise do revestimento foram realizadas 4 medições aleatoriamente posicionadas na superfície dos CP's "B" e calculadas as médias. Já para a análise da zona afetada pelo calor (ZAC), foi feito o perfil de dureza das amostras através de 5 medições distanciadas igualmente entre si (conforme Figura 24). Análise da ZAC tem o objetivo de avaliar a variação das propriedades mecânicas do metal base em cada condição de soldagem.

Figura 23 – Equipamento de microdureza modelo FM-800



Fonte: O autor

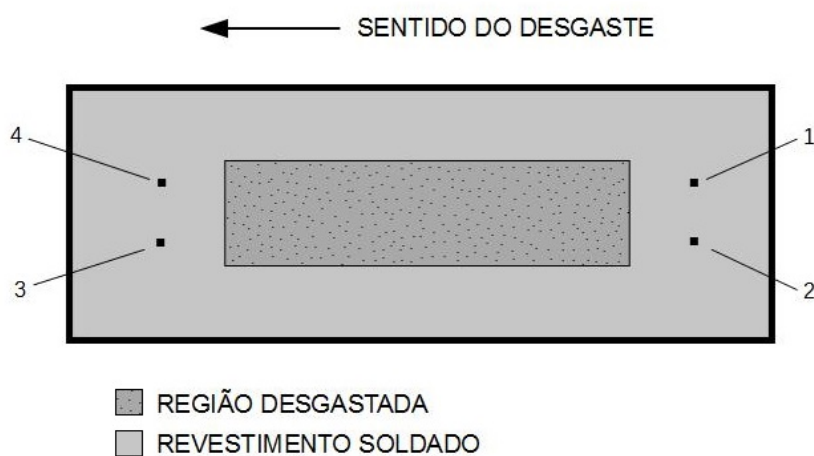
Figura 24 – Esquema da obtenção do perfil de dureza da ZAC.



Fonte: O autor

Na Figura 25 estão localizados os pontos de medição de dureza da superfície da região “B” (revestimento) da Figura 22. As medições foram realizadas após o ensaio de desgaste abrasivo. Entre os pontos “1” e “2”, “3” e “4” há uma distância de 2mm.

Figura 25 – Esquema de realização do ensaio de microdureza dos corpos de prova do ensaio de desgaste abrasivo

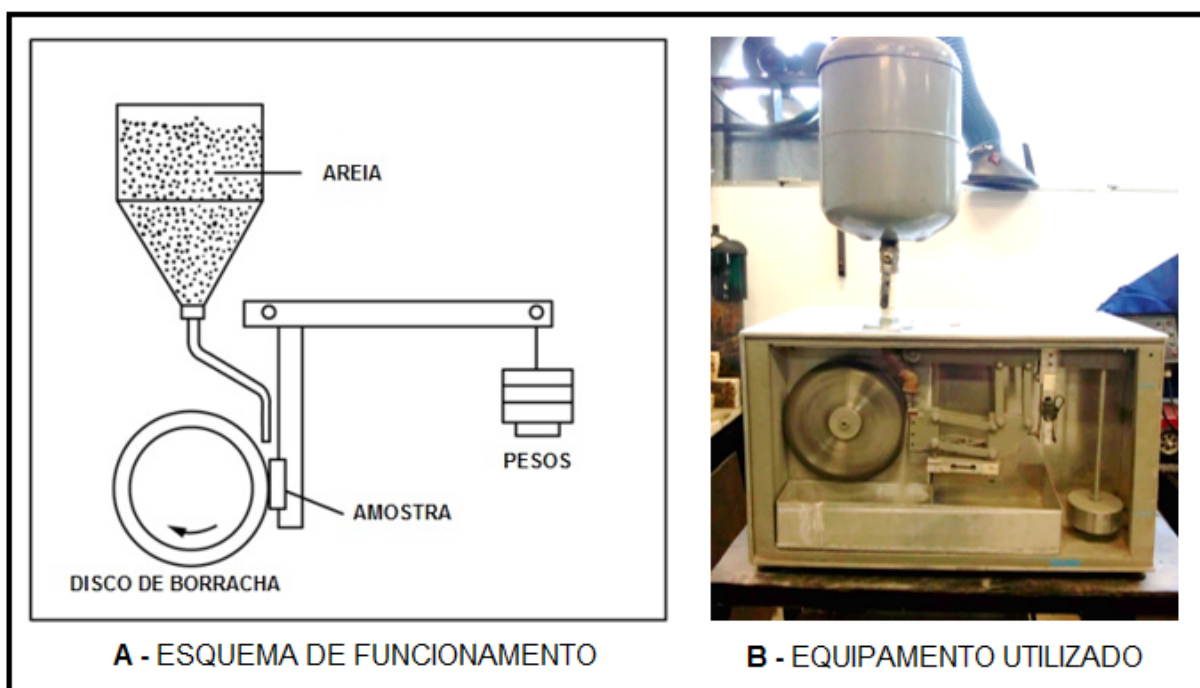


Fonte: O autor

3.2.6 Ensaio de desgaste abrasivo

A resistência ao desgaste por abrasão dos revestimentos aplicados foi avaliada através de ensaio com disco de borracha, conforme norma ASTM G65 (Figura 26A). O equipamento utilizado pertence ao laboratório de soldagem do IFSC – Rau (Figura 26B).

Figura 26 – Aparato para ensaio de resistência à abrasão.



Fonte: A - ASTM (2017), B - O autor

Baseando-se na norma ASTM G65, foi definido o procedimento de ensaio tipo “B”, com tempo de duração de 10 min. Dessa forma, o desgaste foi induzido através de fricção de areia Normal Brasileira n°100 à temperatura ambiente (25°C) com uma vazão entre 300 e 400 g/min, pressionada com uma carga de 130N por um disco emborrachado de 12,7 x 228 mm a uma rotação de 200 RPM.

Para calcular o volume perdido, os corpos de prova foram medidos com um paquímetro para determinar o volume individualmente. Os corpos de prova também foram pesados em uma balança de precisão (resolução de 0,1 mg) antes e após o ensaio a fim de se determinar a massa perdida e a densidade de cada corpo de prova. Na equação 3 “ V_P ” representa o volume perdido (mm³), “ m_P ” representa a massa perdida (g) e “ D ” a densidade do material (g/cm³).

$$V_P = \frac{m_P}{D} \cdot 1000 \quad (3)$$

Antes e após a realização do ensaio por abrasão as impurezas presentes nos corpos de prova foram removidas através de um processo de limpeza ultrassônica com duração de 10 min a uma frequência de 40Khz a uma temperatura de 35°C. O equipamento utilizado foi o Banho Ultrassônico da Solidsteel (Figura 26).

Figura 27 – Banho Ultrassônico



Fonte: O autor

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Aporte térmico

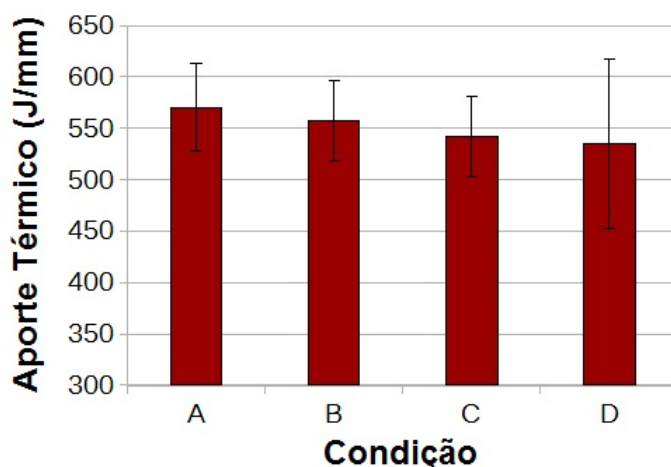
A fim de verificar a repetibilidade de condições de soldagem para cada condição, já que o processo SMAW é manual e a variação da quantidade de calor pode causar efeito na fusão do material, foi calculado o aporte térmico baseado na equação 2 (considerando o valor da corrente 95 A para todas as condições). Os valores médios de tensão, velocidade de soldagem e aporte térmico médio na execução de cada amostra, são apresentados no Quadro 3 e no gráfico da Figura 28.

Quadro 3 – Velocidades e tensões medidas em cada amostra

Condição	Amostra	Velocidade (mm/s)		Tensão (V)		Aporte Térmico (J/mm)	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP
A	1	3,35	0,22	28	2,30	570,2	42,55
	2	3,59	0,35	27,8	0,7		
	3	3,54	0,21	27,7	1,4		
B	4	3,69	0,28	29,1	1,9	557,21	38,53
	5	3,61	0,23	28,8	1,6		
	6	3,72	0,33	28	1,3		
C	7	3,34	0,41	25,1	0,7	541,77	39,37
	8	3,33	0,25	25,1	0,5		
	9	3,25	0,2	24,8	1		
D	10	3,4	0,49	26,4	2,3	534,9	82,55
	11	3,57	0,3100	25,8	0,9		
	12	3,55	0,23	25,8	1,6		

Fonte: O autor

Figura 28 – Energia térmica gerada em cada condição de soldagem



Fonte: O autor

Embora os procedimentos tenham sido executados com gabaritos para repetibilidade no dimensionamento dos cordões, a velocidade de soldagem foi controlada manualmente e é afetada pelo tipo de eletrodo, já que cada um apresenta uma característica distinta durante fusão. Os valores de desvio padrão altos são característicos desta execução manual. Percebe-se, no entanto, que os valores de aporte térmico médio calculados foram semelhantes, indicando que não houve uma variação de energia de soldagem abrupta entre os procedimentos.

Possivelmente, isso é devido a utilização de gabaritos para controle da oscilação durante o movimento de tecimento e também por cada cordão executado ter sido cronometrado, o que auxiliou o controle da velocidade de soldagem.

Mesmo com desvio padrão elevado pode-se observar que o aporte térmico gerado com o uso de corrente alternada (CA) foi um pouco superior ao gerado com corrente contínua inversa (CC+) tanto para o eletrodo E6-UM-60G como para o E10-UM-60GR. Esta pequena variação se deve a necessidade de adaptação manual durante execução.

4.2 Diluição

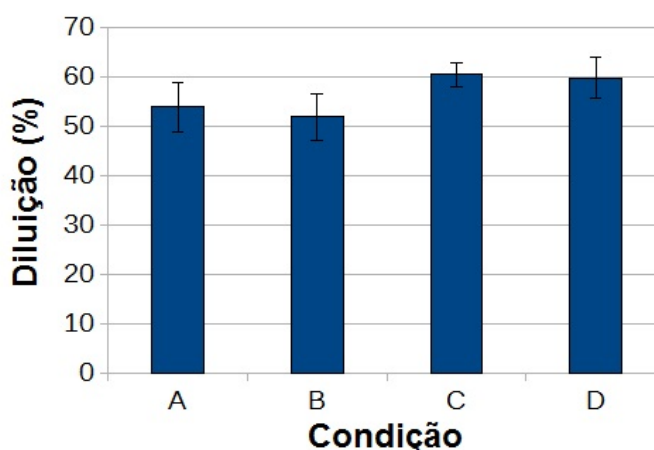
Devido a sobreposição lateral no processo de soldagem dos revestimentos, sabe-se que a taxa de diluição final gerada no revestimento é inferior a encontrada nos cordões únicos. No entanto, para fins comparativos durante as análises, utilizou-se os valores de diluição individuais. A Tabela 6 e o gráfico da Figura 29 apresentam os valores médios do percentual de diluição de cada condição de soldagem.

Tabela 6 – Valores médios de diluição para cada condição

Condição	Diluição (%)	Desvio Padrão
A	53,90	5,02
B	51,91	4,69
C	60,43	2,45
D	59,82	4,10

Fonte: O autor

Figura 29 – Resultado do cálculo da taxa de diluição



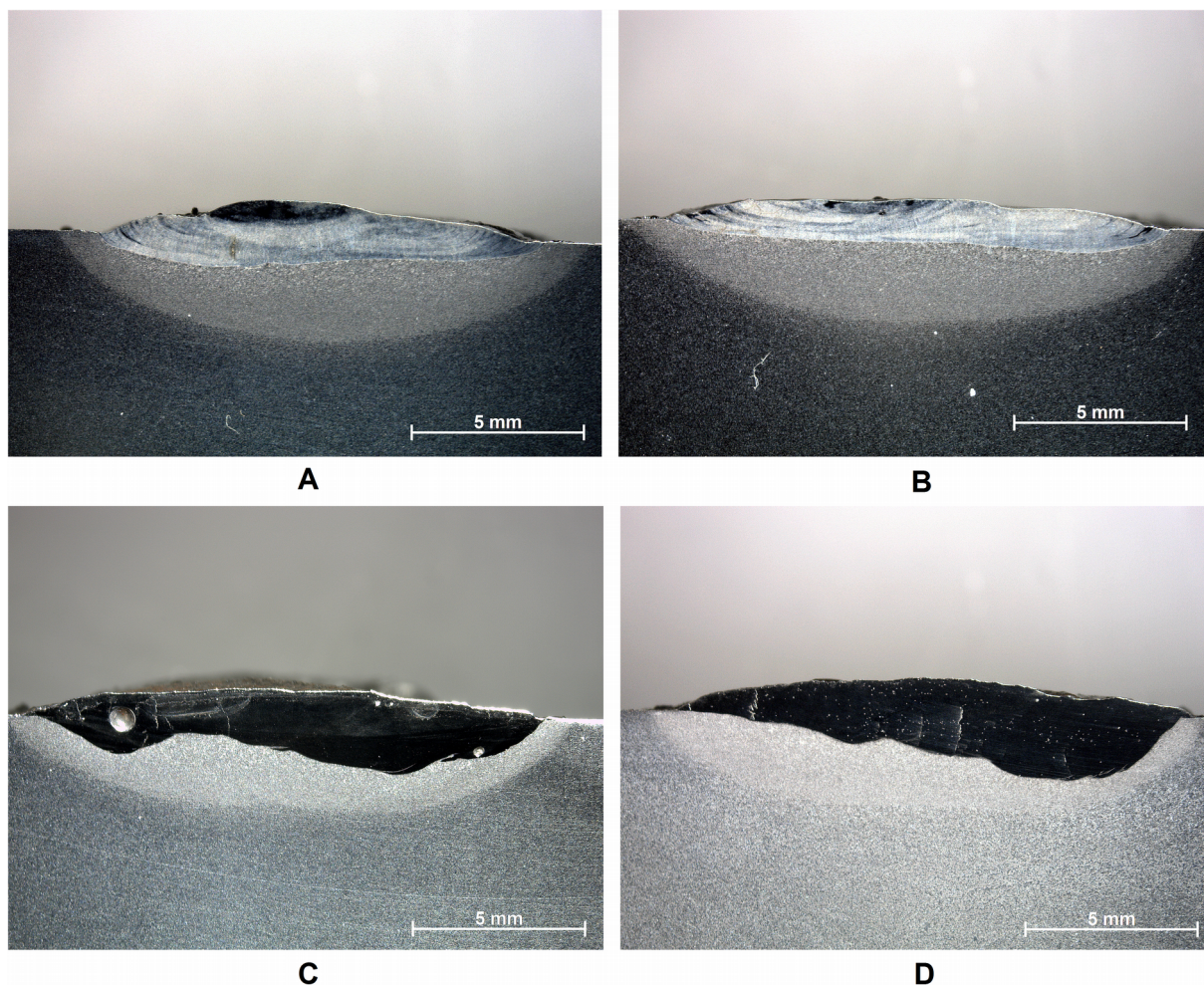
Fonte: O autor

Era esperada uma taxa de diluição maior no uso de CC+, devido a maior penetração que este tipo de corrente causa no metal base, conforme Mellor (2006) e American Welding Society (2011b), no entanto ocorreu o inverso. Conclui-se que o aporte térmico teve maior efeito na diluição do que o tipo de corrente, ou seja, parâmetros como tensão ou velocidade de soldagem possuem efeito maior do que a polaridade do eletrodo na deposição destes tipos de revestimentos.

Nota-se que houve um aumento significativo na diluição de um tipo de eletrodo para o outro. Com corrente alternada, o eletrodo E10-UM-60GR (condição “C”) teve uma diluição 6,43% maior que o eletrodo E6-UM-60G (condição “A”). E com corrente contínua de polaridade positiva, esta taxa foi 7,91% maior. Mesmo com os valores de aporte térmico levemente inferiores calculados para as condições C e D, a diluição nestas condições foram superiores.

Ao considerar o diagrama de fases Fe-C (Figura 5), este resultado provavelmente se deve ao teor de carbono no revestimento E10-UM-60GR ser maior, tornando o ponto de fusão da liga inferior ao outro tipo de revestimento. Ou seja, a composição química do eletrodo teve maior efeito na diluição. Na Figura 30 algumas das amostras utilizadas para calcular a taxa de diluição.

Figura 30 – Amostras de perfil de cada condição utilizada para calcular a diluição



Fonte: O autor

4.3 Análise da zona afetada pelo calor (ZAC)

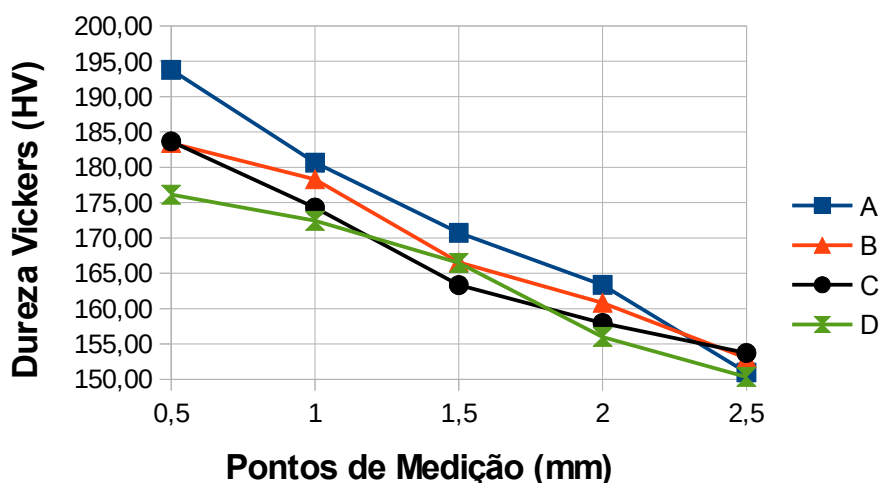
A zona termicamente afetada se mostrou similar em todos os grupos de amostras. O perfil de microdureza realizado na secção transversal do metal base serviu pra identificar a região da ZAC, o qual ocorreu a aproximadamente 2,5mm de distância do cordão de solda para todos os casos. No Quadro 4 e na Figura 31 é possível observar o gráfico em que o ponto de medição 5 (2,5mm), para todos os grupos de amostras, a dureza é próxima de 150 HV, que corresponde a dureza do aço ABNT 1020 laminado (GERDAU, 2019).

Quadro 4 – Valores de dureza medidos na ZAC com desvio padrão

Distância (mm)		0,5		1		1,5		2		2,5	
Dureza (HV)		Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Condição	A	193,8	9,07	180,7	8,87	170,7	9,48	163,4	3,32	151	4,57
	B	183,4	4,10	178,3	0,90	166,6	3,17	160,8	2,62	153	5,55
	C	183,7	4,99	174,3	5,82	163,3	1,62	158	10,87	153,7	10,19
	D	176,1	8,06	172,4	14,58	166,5	4,69	156	5,33	150,3	4,15

Fonte: O autor

Figura 31 – Perfis de microdureza na ZAC



Fonte: O autor

Percebe-se que em todos os casos houve aumento da dureza do metal base, possivelmente devido ao refinamento dos grãos na região da ZAC. Nas condições de soldagem A e B (uso do eletrodo E6-UM-60G) os valores de dureza na ZAC

foram superiores aos valores das condições C e D. O fato de apresentar taxas de diluição diferentes do cordão também gerou efeito distinto na ZAC. Com menor diluição (A e B), menor a região afetada pelo calor e, portanto, maior a velocidade de resfriamento. Segundo Callister Junior e Retwisch (2012), um resfriamento mais rápido permite a obtenção de grãos de ferrita mais refinados e, como consequência, maiores valores de dureza.

Quanto ao efeito do tipo de corrente, não é possível afirmar que sua variação tenha causado influência no perfil de dureza da ZAC devido à semelhança, principalmente, entre as condições C e D.

4.4 Análise dos revestimentos

4.4.1 Resistência ao desgaste por abrasão

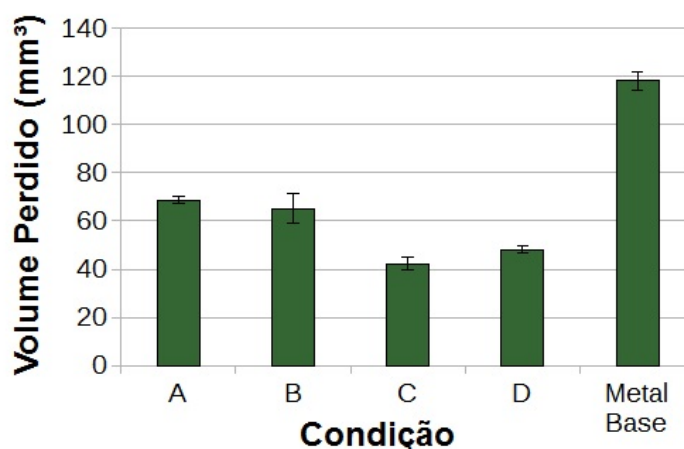
Os resultados do ensaio de desgaste abrasivo foram obtidos através da medição da perda de volume das amostras (segundo norma ASTM G65). Também foi realizado o ensaio diretamente no metal base (aço ABNT 1020) para comparação. A Tabela 7 e o gráfico da Figura 32 apresentam estes resultados.

Tabela 7 – Volume perdido após ensaio de desgaste por abrasão

Condição	Perda (mm ³)	Desvio Padrão
A	68,59	1,41
B	65,08	6,22
C	42,29	2,87
D	48,08	1,5
Metal Base	118,17	3,69

Fonte: O autor

Figura 32 – Resultado do desgaste abrasivo das amostras



Fonte: O autor

É possível verificar um significativo aumento na resistência ao desgaste por abrasão após aplicação dos revestimentos, visto que o aço ABNT 1020 obteve perda de 118,17 mm³ de material e os revestimentos apresentaram perdas inferiores a 70 mm³ de material nas superfícies ensaiadas.

Como o esperado, o revestimento E10-UM-60GR (amostras C e D) apresentou maior resistência ao desgaste abrasivo. Sua composição com maior teor de carbono e de elementos de liga gerou os resultados com menor perda de volume, mesmo com níveis de diluição superiores. O grupo de amostras da condição “C” obteve a melhor resistência ao desgaste abrasivo, aumentando em 2,79 vezes a resistência do metal base.

Quanto a mudança de polaridade, não houve influência significativa nos resultados de resistência ao desgaste, se considerados os valores de desvio padrão. No eletrodo E10-UM-60GR o uso de CA apresentou resistência superior e no eletrodo E6-UM-60G ocorreu o inverso. Como é sabido, o efeito do tipo de corrente pode afetar o nível de diluição e como consequência as propriedades mecânicas do revestimento. Como a diluição dos eletrodos sofreu pouca influência do tipo de corrente utilizada (como mostrado na Tabela 6) não gerou efeito significativo na resistência ao desgaste.

4.4.2 Microdureza dos revestimentos

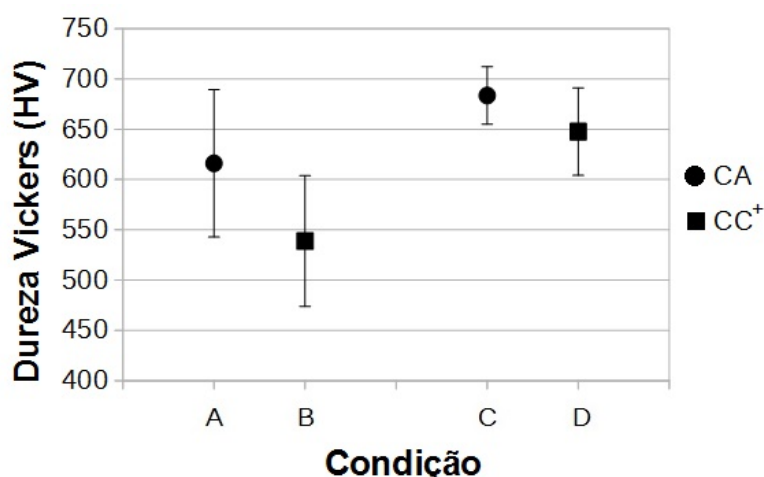
A Tabela 8 e a Figura 33 mostram os valores de dureza média encontradas na superfície dos revestimentos.

Tabela 8 – Valores de dureza média na superfície dos revestimentos

Condição	Dureza (HV)	Desvio Padrão
A	616,08	73,26
B	538,77	65,07
C	683,52	28,57
D	647,58	43,53

Fonte: O autor

Figura 33 – Resultado de microdureza Vickers nos revestimentos



Fonte: O autor

Como o previsto, devido a maior quantidade de carbono e de elementos de liga, o eletrodo E10-UM-60GR apresentou dureza superior ao eletrodo E6-UM-60G. Com base nos dados da Tabela 4, estes valores apresentaram-se dentro do esperado para os materiais (nota-se que a condição B apresentou valor inferior ao esperado, porém com grande desvio padrão).

Sabe-se que variando o tipo de corrente a taxa de diluição pode ser alterada e, como consequência, pode-se afetar a velocidade de resfriamento acarretando em mudança de morfologia e dureza do material. Velocidades maiores de resfriamento, por exemplo, podem acarretar em refino de grão com aumento de dureza, ou podem

gerar mudanças na morfologia das fases presentes que reduzam a dureza do material.

No entanto, mesmo com os valores médios de microdureza maiores nas condições “A” e “C” (CA) este resultado não se refletiu claramente no ensaio de desgaste abrasivo, sendo que somente para o eletrodo E10-UM-60GR a corrente alternada obteve uma resistência à abrasão superior. Considerando o desvio padrão da Figura 33, é possível afirmar que a condição “C” obteve o revestimento com dureza superficial mais homogênea e que tipo de corrente teve pouca influência nos valores de dureza.

5 CONCLUSÃO

O uso de gabaritos para dimensionamento durante confecção dos cordões aliados ao monitoramento da tensão e velocidade de soldagem, permitiu a repetibilidade de condições durante aplicação de revestimentos duros através do processo de soldagem SMAW, que é manual.

A composição química do revestimento apresentou maior impacto nas propriedades mecânicas do que o aporte térmico ou o nível de diluição gerados durante o processo. Mesmo com diluições maiores devido a sua capacidade de fusão, o que afeta as propriedades mecânicas, o eletrodo DIN E10-UM-60GR, com 4,5% C e 24% Cr, apresentou resultados mais consistentes de dureza e maior resistência ao desgaste abrasivo sob baixa tensão, se comparado ao eletrodo DIN E6-UM-60G (0,55% C e 5,5% Cr).

O tipo de corrente utilizada durante deposição via processo SMAW tem influência pequena na diluição dos revestimentos. Concluiu-se que para controle da taxa de diluição a variação do aporte térmico, através do controle de variáveis como tensão, corrente e velocidade de soldagem, tendem a gerar maior efeito.

Na zona afetada pelo calor, uma diluição menor do cordão de solda gerou maiores valores de dureza. Isto porque, como nestes casos a área afetada é menor, diminui-se a velocidade de resfriamento e, como consequência, tende-se a gerar uma microestrutura com tamanho médio de grãos menores, acarretando em maior alteração nas propriedades mecânicas da ZAC.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **A5.13**: Specification for surfacing electrodes for shielded metal arc welding. 5 ed. Miami: American Welding Society, 2010.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **A5.21**: Specification for bare electrodes and rods for surfacing. 5 ed. Miami: American Welding Society, 2011a.

AMERICAN WELDING SOCIETY (EUA). **Welding Handbook**: Materials and applications, part 1. 9. ed. Miami: Annette O'Brien, 2011b. (Volume 4).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G65-16**: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. West Conshohocken: Astm Internacional, 2017.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETWISCH, David G.. **Ciência e Engenharia dos Materiais**: Uma Introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda – LTC, 2012.

CIMM (Florianópolis) (Org.). **Dicionário**. 2019. Disponível em: <<https://www.cimm.com.br/portal/verbetes>>. Acesso em: 10 set. 2019.

DALLOS, Jennifer. **Shielded Metal Arc Welding Basics**. 2018. Disponível em: <<https://www.fabtechexpo.com/blog/2018/01/04/shielded-metal-arc-welding-basics>>. Acesso em: 17 set. 2019.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8555-1**: Filler metals used in surfacing - solid wires, filler rods, wire electrodes, designation, technical delivery conditions. Berlim: Din, 1983.

ESAB (Minas Gerais). **Apostila de Metalurgia de Soldagem**. Contagem: Assistência Técnica Consumíveis – Esab Br, 2005.

GERDAU. **Manual dos aços**. Piratini: Gerdau, 2003. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf>. Acesso em: 02 set. 2019.

GREGOLIN, José Angelo Rodrigues. **Desenvolvimento de ligas Fe-C-Cr-(Nb) resistentes ao desgaste**. 1990. 241 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campinas, Campinas, 1990.

HSOLDAS (Santa Catarina). **Catálogo geral HSoldas**: técnicos em soldas. 2. ed. Blumenau: Hsoldas, 2016. 19 p.

INFOMET (Rio de Janeiro). **Aços Inoxidáveis**. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo.php?codAssunto=119>>. Acesso em: 27 ago. 2019a.

INFOMET (Rio de Janeiro). **Aços e Ferros Fundidos**. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo.php?codAssunto=36>>. Acesso em: 13 set. 2019b.

ITUBOMBAS (São Paulo). **Mineração**. 2020. Disponível em: <http://itubombas.com.br/locacao/mineracao>. Acesso em: 29 mar. 2020.

KATO, Koji. Classification of Wear Mechanisms/Models. In: STACHOWIAK, Gwidon W. (Ed.). **Wear – Materials, mechanisms and practice**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2005. Cap. 2. p. 9-18.

KOU, Sindo. **Welding Metallurgy**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.

KSB BRASIL (São Paulo). **Válvulas Globo ECOLINE - GL-150/600**. 2020. Disponível em: https://www.ksb.com/ksb-br-pt/produtos-e-servicos/valvulas/valvula-globo/gl150-600_ch/. Acesso em: 29 mar. 2020.

LIPPEL (Santa Catarina). **Rosca Transportadora para Biomassa Lippel RT**. 2020. Disponível em: <https://www.lippel.com.br/movimentacao-e-dosagem/rosca-transportadora-para-biomassa-lippel-rt/>. Acesso em: 29 mar. 2020.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MELLOR, Brian G. (Ed.). **Surface coatings for protection against wear**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006.

MODENESI, Paulo José. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA (São Paulo). **Bombas e válvulas: Conheça os tipos e aplicações**. 2017. Disponível em: <<https://www.tratamentodeagua.com.br/bombas-e-valvulas-conheca-os-tipos-e-aplicacoes/>>. Acesso em: 11 set. 2019.

RIBEIRO, Rubens. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira**. 2004. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

RIJEZA METALURGIA (São Leopoldo). **Redução do Desgaste Abrasivo em Bombas de Polpa**. Disponível em: <<https://www.rijeza.com.br/blog/reducao-do-desgaste-abrasivo-em-bombas-de-polpa>>. Acesso em: 12 set. 2019a.

RIJEZA METALURGIA (São Leopoldo). **Desgaste abrasivo**. Disponível em: <<https://www.rijeza.com.br/blog/desgaste-por-abrasao>>. Acesso em: 20 set. 2019b.

RIJEZA METALURGIA (São Leopoldo). **Aspersão Térmica ou Soldagem de Revestimento: Saiba qual técnica utilizar contra o desgaste por abrasão.** Disponível em: <<https://www.rijeza.com.br/blog/aspersao-termica-ou-soldagem-de-revestimento>>. Acesso em: 20 set. 2019c.

ZUM GAHR, Karl-heniz. **Microstructure and wear of materials:** Tribology Series, 10. Amsterdam: Elsevier, 1987.