

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

LUCIANO VENSÃO PERUCHI

**RESISTÊNCIA AO RISCAMENTO DE REVESTIMENTOS
APLICADOS PELO PROCESSO FCAW**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

LUCIANO VENSÃO PERUCHI

**RESISTÊNCIA AO RISCAMENTO DE REVESTIMENTOS
APLICADOS PELO PROCESSO FCAW**

Projeto de Pesquisa apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Ossimar Maranhão

CURITIBA

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa **“Resistência ao Riscamento de Revestimentos Aplicados pelo Processo FCAW”**, realizado pelo aluno Luciano Vensão Peruchi, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Ossimar Maranhão
Damec, UTFPR
Orientador

Prof. Dra. Ane Cheila Rovani
Damec, UTFPR
Avaliadora

Prof. Dr. Aldo Santos Pereira
Damec, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 17 de dezembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Com a conclusão deste trabalho tem-se fim uma importante etapa da minha vida. Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para que este sonho se tornasse possível.

Agradeço a meu orientador Ossimar Maranhão, pelo ensinamento, apoio e dedicação não só durante a realização deste trabalho, mas desde que fui seu aluno de Iniciação Científica.

Agradeço à banca, professor Aldo Santos Pereira, com quem também muito aprendi durante as aulas e Ane Cheila Rovani, que deu todo o suporte necessário para a realização dos ensaios no tribômetro.

Agradeço também a Ana Luiza e ao Guilherme, que auxiliaram nos laboratórios, ao Diego, pelas medições no perfilômetro, e ao Alexandre, pelo uso do MEV.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela estrutura e ensino de excelência durante todos esses anos.

Agradeço a minha família, meus pais Jorge e Irene e meu irmão Gustavo, por estarem sempre a meu lado, me apoiando sempre para seguir em frente.

Agradeço a todos que fizeram parte desta etapa: amigos, colegas de estudos e professores que tornaram este sonho possível.

RESUMO

Peruchi, Luciano Vensão. **Resistência ao Riscamento de Revestimentos Aplicados pelo Processo FCAW**. 2015. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Industrial Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

A deposição de revestimentos duros por técnicas de soldagem tem sido amplamente utilizada na indústria para recuperar peças e aumentar sua resistência ao desgaste. Comumente uma liga com características mais nobres do que as do metal de base são utilizadas. Materiais como Ferros com altos teores de Cromo vêm sendo bastante utilizados e são uma solução economicamente interessante quando comparados a outros elementos mais nobres como o Titânio. Estas ligas são propensas à formação de carbonetos, elementos duros na matriz que conferem uma maior resistência ao desgaste abrasivo. Em contrapartida, essa elevada dureza torna o material mais suscetível a trincas. Aplicando-se um pré-aquecimento é possível diminuir a dureza superficial e minimizar este problema. Este trabalho visou a caracterização quanto a resistência ao desgaste do revestimento de uma liga Fe-Cr depositada a temperatura ambiente e com pré-aquecimento de 450°C em chapas de aço AISI 1045. Para esta caracterização foi utilizada a norma ASTM G171-03 que avalia a resistência ao desgaste abrasivo através do ensaio de riscamento. Com estes ensaios foi possível mostrar que o pré-aquecimento causou uma diminuição da dureza superficial do revestimento e uma conseqüente diminuição da dureza ao riscamento.

Palavras-chave: FCAW, revestimento duro, desgaste abrasivo, riscamento.

ABSTRACT

Peruchi, Luciano Vensão. **Resistência ao Riscamento de Revestimentos Aplicados pelo Processo FCAW**. 2015. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Industrial Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

The hardfacing deposition by welding techniques has been widely used in industry to recover parts and increase its wear resistance. Commonly an alloy having characteristics more noble than the base metal are used. Materials such as Irons with high Chrome content have been widely used and are an economically interesting solution when compared to other more noble elements such as Titanium. These alloys are predisposed to the formation of carbides, hard elements in the matrix, which confers greater resistance to abrasive wear. In contrast, this high hardness makes the material susceptible to cracking. Applying pre-heating is possible to reduce the hardness and minimize this problem. This study aimed at characterizing the wear resistance of a coating of a Fe-Cr alloy deposited at room temperature and preheated to 450°C in AISI 1045 steel. For this characterization was used the ASTM G171-03 which assesses abrasive wear resistance by scratching test. With these tests it was possible to show that the pre-heating caused a decrease at the surface hardness of the coating and a consequent decrease in hardness scratching of this material.

Key words: FCAW, hardfacing, abrasive wear, scratch test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do processo de soldagem FCAW.	12
Figura 2 - Desenho esquemático da soldagem com arame tubular com (a) proteção externa e (b) autoprotégido.	13
Figura 3 - Ciclo térmico para diferentes energias de soldagem.	16
Figura 4 - Ciclo térmico para diferentes temperaturas de pré-aquecimento.....	17
Figura 5 – Diluição de um cordão de solda.	18
Figura 6 - Caracterização da abrasão a dois e a três corpos.	21
Figura 7- Tipos de desgaste abrasivo: (a) Abrasão a baixa tensão; (b) Abrasão a alta tensão; (c) Abrasão por arranque; (d) Polimento.	22
Figura 8 - Mecanismos de desgaste abrasivo: microsulcamento, microfadiga, microcorte e microtrincamento.	23
Figura 9 - Desgaste de uma superfície com ângulo de ataque de (a) 30° (b) 60° e (c) 90°.....	24
Figura 10 - Bancada de deposição dos cordões: (a) fonte de soldagem; (b) alimentador de arame; (c) tocha de soldagem; (d) movimentador da tocha.	26
Figura 11 - Aplicação do pré-aquecimento.....	28
Figura 12 - Medição da temperatura de pré-aquecimento.	28
Figura 13 - Gabarito utilizado para fixação das amostras.	29
Figura 14 - Corpos de prova utilizados nos ensaios.....	30
Figura 15 - Tribômetro UMT.....	31
Figura 16 - Método de medição da largura média do risco.	32
Figura 17 - Método de medição da largura média do risco.	33
Figura 18 - Perfilômetro óptico 3D.....	33
Figura 19 - Largura do risco obtida através do perfilômetro.....	34
Figura 20 - Dureza superficial média obtida.....	36

Figura 21 - Posição das medições de microdureza.....	37
Figura 22 - Topografia da região com risco.....	39
Figura 23 - Topografia da região sem risco.....	39
Figura 24 - Dureza ao riscamento.....	40
Figura 25 - Perda de massa obtida através de abrasômetro tipo roda de borracha..	41
Figura 26 - Dureza ao riscamento do aço ABNT 8550.....	42
Figura 27 - Gráfico de F_x , F_z e coeficiente de atrito.....	42
Figura 28 - Coeficiente de atrito dos ensaios de riscamento.....	43
Figura 29 - Risco da amostra sem pré-aquecimento.....	44
Figura 30 - Risco da amostra com pré-aquecimento de 450°C.....	45
Figura 31 - Áreas para espectroscopia da condição sem pré-aquecimento.....	47
Figura 32 - Áreas para espectroscopia da condição com pré-aquecimento de 450°C.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço AISI 1045.	25
Tabela 2 - Composição química do arame UTP AF Ledurit 60.	25
Tabela 3 - Parâmetros de soldagem dos cordões depositados.....	27
Tabela 4 - Microdureza da matriz e dos carbonetos precipitados.	37
Tabela 5 - Rugosidade das amostras.....	38
Tabela 6 - Composição química do metal de base, em %peso.....	46
Tabela 7 - Composição química da condição sem pré-aquecimento, em %peso.	46
Tabela 8 - Composição química da condição com pré-aquecimento a 450°C, em %peso.	46
Tabela 9 - Composição química, condição sem pré-aquecimento.	47
Tabela 10 - Composição química, condição com pré-aquecimento de 450°C.	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Contexto do Tema	9
1.2	Objetivos	10
1.3	Etapas do Trabalho	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	Processo de Soldagem FCAW	12
2.1.1	Vantagens do Processo FCAW	14
2.1.2	Desvantagens do Processo FCAW	14
2.2	Energia de Soldagem	14
2.3	Pré-aquecimento	16
2.4	Diluição	17
2.5	Soldagem de Revestimento	18
2.5.1	Ligas para Aplicação em Revestimentos	19
2.6	Desgaste	20
2.6.1	Desgaste Abrasivo	20
2.7	Ensaio de Desgaste	24
3	METODOLOGIA	25
3.1	Deposição dos Revestimentos	25
3.1.1	Materiais	25
3.1.2	Equipamentos	26
3.1.3	Procedimento Experimental	27
3.2	Ensaio de Dureza	30
3.3	Tribômetro	30
3.3.1	Ensaio de Riscamento	31
3.3.2	Medição da Largura dos Riscos	32
3.3.3	Coefficiente de Atrito	34
3.4	Análise Metalográfica	34
3.5	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	Dureza	36
4.2	Dureza ao Riscamento	38
4.3	Coefficiente de Atrito	42
4.4	Análise Metalográfica e Composição Química	43
5	CONCLUSÕES	49
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

Para aumentar a vida útil de componentes mecânicos que estão sujeitos ao desgaste diversas técnicas para aplicação de revestimentos têm sido estudadas e aprimoradas ao longo dos anos, além da seleção e desenvolvimento de novos materiais. (SANTOS, 2003). Revestimentos depositados por processos de soldagem são bastante utilizados na indústria principalmente em casos de acentuado desgaste onde há expressiva perda de material, ou seja, perda de tolerâncias geométricas. Grandes taxas de deposição dos processos de soldagem, quando comparados a processos como o de aspersão térmica, justificam sua aplicação nesses casos. (BOND et al, 2011).

Castro (2010) estudou a recuperação de sapatas de trator pelo processo de soldagem com eletrodo revestido e mostrou que tal aplicação em campo é viável quando analisados os resultados de resistência ao desgaste. Ribeiro (2004) também fez um trabalho similar com peças submetidas ao desgaste abrasivo na indústria sucroalcooleira e mostrou que o percentual de diluição do metal de adição no metal de base tem um papel importante na aplicação de revestimentos. (CASTRO, 2010) (RIBEIRO, 2004).

Grandes taxas de deposição e baixa diluição são altamente desejados na soldagem de revestimento. O processo de Soldagem a Arco com Arame Tubular (FCAW – *Flux Cored Arc Welding*) é um dos processos estudados e aplicados nestas situações.

Quando se busca uma elevada resistência ao desgaste abrasivo, é interessante que os materiais possuam carbonetos duros inseridos em uma matriz dúctil. Para ocorrer a formação desses carbonetos é necessário um alto teor de Carbono e elementos formadores de carbonetos como Cromo, Vanádio, Molibdênio, Tungstênio e Titânio. (TYLCZAK; ORENGON, 1992) (ZUM GAHR, 1987) (COLAÇO, 2013). Por outro lado, tais revestimentos duros são suscetíveis à formação de trincas que podem piorar o desempenho destes materiais. Uma das formas de minimizar estes efeitos é utilizando-se de um pré-aquecimento no material.

Neste contexto, Ishi (2012) avaliou o efeito do pré-aquecimento na resistência ao desgaste de revestimentos. Nos ensaios foi utilizado um abrasômetro tipo roda de borracha de acordo com a norma ASTM Internacional G65 – 04 (Reaprovada em 2010). Os resultados mostraram que o pré-aquecimento de 450°C teve o melhor desempenho quanto à perda de massa e diminuição das trincas. (ISHI, 2012)

A partir destes resultados, a presente pesquisa utilizou-se do ensaio de riscamento para dar continuidade à avaliação da resistência ao desgaste destes revestimentos.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo principal determinar a dureza ao riscamento do revestimento aplicado pelo processo FCAW sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de 450°C, avaliados através do ensaio de riscamento previsto na norma ASTM G171-03.

E tem-se como objetivos específicos:

- Determinar a diluição dos processos;
- Analisar a microestrutura do material;
- Analisar as diferenças entre a resistência ao desgaste abrasivo através do ensaio de riscamento e do ensaio com abrasômetro tipo roda de borracha.

1.3 Etapas do Trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo os demais apresentados a seguir.

No segundo capítulo, Revisão Bibliográfica, será abordado o processo de soldagem utilizado e alguns conceitos referentes à soldagem de revestimento. Também será feita uma revisão sobre revestimentos e ligas utilizadas, bem como alguns conceitos sobre desgaste.

No capítulo três, Metodologia, é descrito todo o processo de deposição do revestimento e ensaios realizados posteriormente. Os equipamentos e materiais utilizados também estão aqui descritos.

No capítulo quatro, Resultados e Discussões, serão apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de dureza e riscamento, bem como as análises feitas no MEV.

No capítulo cinco, Conclusões, serão apresentadas as conclusões e comparações referentes a este trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de Soldagem FCAW

O processo de Soldagem a Arco com Arame Tubular (FCAW – *Flux Cored Arc Welding*) consiste na formação de um arco elétrico entre um eletrodo metálico tubular, consumível e continuamente alimentado e o metal de base. (AWS, 1991)

O equipamento básico para soldagem FCAW está representado na Figura 1 e inclui fonte de soldagem, sistema de alimentação do arame e a tocha de soldagem. A presença ou não do sistema auxiliar de gás de proteção depende do fluxo contido no arame que será utilizado. Este equipamento é semelhante ao utilizado no processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), mais conhecido como MIG/MAG. A principal diferença está no arame utilizado. Nos processos de soldagem GMAW, diferentemente do FCAW, é utilizado arame sólido e portanto é necessário utilizar-se do sistema auxiliar de gás de proteção.

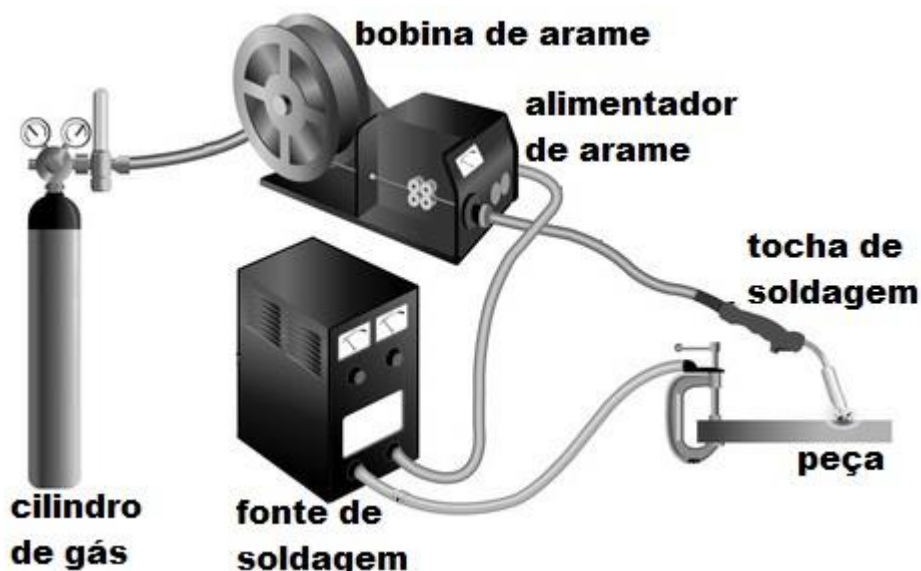


Figura 1 - Esquema do processo de soldagem FCAW.

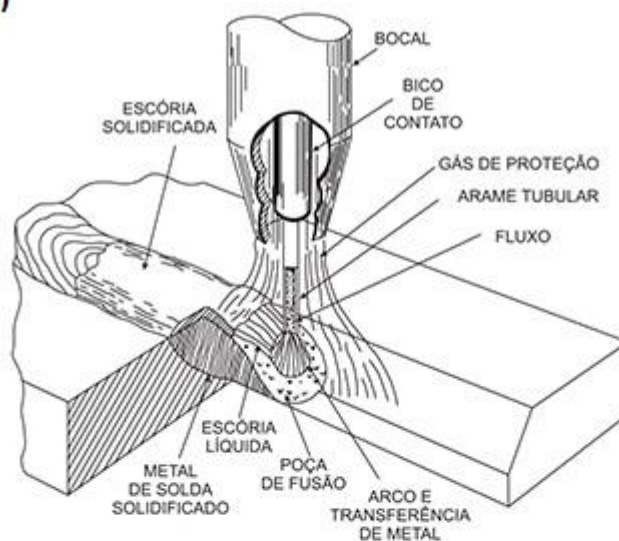
Fonte: adaptado de www.lindecana.com

O arame tubular utilizado no processo FCAW é preenchido por um fluxo que, além de estabilizar o arco, pode fornecer elementos de liga para o cordão de solda, formação de escória e proteção contra a oxidação da poça de fusão. Quando esta proteção se dá somente pelos gases gerados pelo fluxo, o arame é denominado

autoprotégido. Caso contrário a proteção do cordão de solda se dá por um gás auxiliar que flui pelo bocal da tocha. (MARQUES, 1991).

A Figura 2 mostra um desenho esquemático da soldagem com arame tubular com proteção externa e autoprotégido, com destaque para a proteção da poça de fusão. No primeiro caso ela é feita pelo gás que flui pelo bocal e no segundo pelos gases formados na fusão do fluxo.

**Soldagem com arames tubulares com proteção externa
(a)**



**Soldagem com arames tubulares autoprotégidos
(b)**

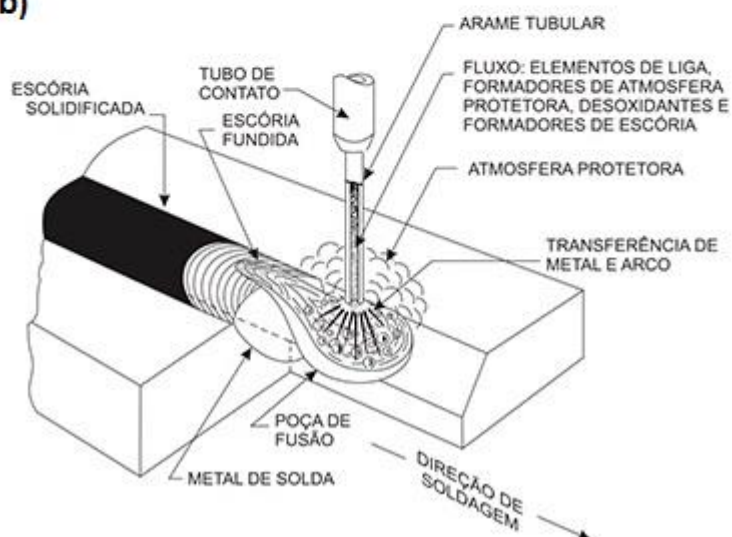


Figura 2 - Desenho esquemático da soldagem com arame tubular com (a) proteção externa e (b) autoprotégido.

Fonte: (ESAB, 2014)

Neste processo de soldagem, o arame é continuamente alimentado. Assim não há a necessidade de paradas de processo para repor o metal de adição, como ocorre em outros processos. Isto faz com que o processo de soldagem com arame tubular seja de elevada produtividade. Ainda, há certa facilidade para utilização deste processo em campo quando utilizado com arame tubular autoprotegido visto que não há necessidade de utilizar o sistema de gás de proteção e, conseqüentemente, o cilindro de gás. (MODENESI *et al.*, 2006)

2.1.1 Vantagens do Processo FCAW

- Possibilidade de adição de elementos de liga pelo fluxo interno, conferindo assim uma maior versatilidade do que os arames sólidos para se adequar a alguma aplicação particular ou algum requisito especial; (QUITES, 2002) (BARBEDO, 2010)
- Alta taxa de deposição;
- Possibilita solda em todas as posições.

2.1.2 Desvantagens do Processo FCAW

- Dificuldade de soldagem em campo quando necessita de gás de proteção. Além do transporte do cilindro de gás, o processo não pode ser executado quando há vento. Já o processo com arame autoprotegido é mais tolerante à presença de ventos brandos; (RODRIGUES, 2005)
- Necessidade de remoção da escória, ainda que neste processo ela seja de fácil remoção; (RODRIGUES, 2010)
- Arame tubular possui custo superior em relação ao arame sólido;
- São gerados mais fumos do que no processo GMAW; (BARBEDO, 2011)

2.2 Energia de Soldagem

Também chamada de aporte térmico ou aporte de calor, é a quantidade de calor aplicada no material por unidade de comprimento linear (J/mm). Ela leva em conta a tensão no arco elétrico, a corrente de soldagem, a velocidade de soldagem e a eficiência térmica do processo. (AWS, 1991). É dada pela Equação 1:

$$\text{Energia de Soldagem} = \frac{\eta VI}{s} \quad (1)$$

Onde:

η → eficiência térmica do processo [%];

V → tensão no arco elétrico [V];

I → corrente de soldagem [A];

s → velocidade de soldagem [mm/s].

A intensidade de corrente de soldagem é a principal variável que afeta o aporte térmico no substrato. Como resultado de uma corrente de soldagem alta, o depósito apresentará uma ZTA (zona termicamente afetada) elevada e diluição excessiva, tendendo assim à deterioração das características do revestimento. Por outro lado, caso a corrente seja baixa poderá haver falta de fusão do metal de adição e do substrato.

Apesar de a velocidade de soldagem não atuar diretamente nas características do arco, ela está diretamente relacionada com o aporte de calor transferido à peça. Fixando-se os demais parâmetros, a variação da velocidade de soldagem influi diretamente no formato da poça de fusão, microestrutura, tamanho da ZTA e oxidação superficial do cordão. (SANTOS, 2003). Para efeitos de produtividade, a velocidade de soldagem deve ser a mais elevada possível, desde que isto não afete a qualidade do cordão depositado.

A energia de soldagem influencia diretamente na velocidade de resfriamento do depósito. Esta correlação é denominada ciclo térmico de soldagem e está representada na Figura 3. A velocidade de resfriamento para cada instante é obtida através da inclinação da curva. Observa-se que quanto maior a energia de soldagem mais lento é o resfriamento, ou seja, a taxa de resfriamento é menor.

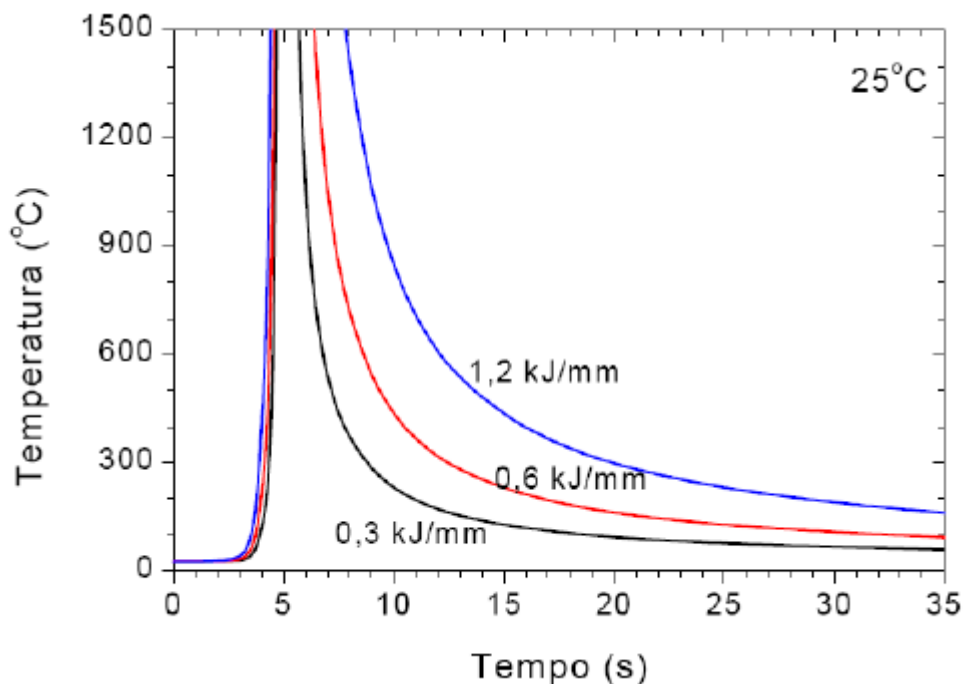


Figura 3 - Ciclo térmico para diferentes energias de soldagem.

Fonte: (MODENESI *et al.*, 2006)

2.3 Pré-aquecimento

Pré-aquecimento pode ser definido como o aquecimento do metal de base até certa temperatura antes da soldagem. Dentre suas principais funções, podemos citar: (AGLAN *et al.*, 2013)

- a) Diminui a taxa de resfriamento, produzindo microestruturas mais dúcteis que são menos suscetíveis à formação de trincas e ajudando na difusão do hidrogênio;
- b) Diminuição das tensões residuais entre a zona fundida e o metal de base;
- c) Elimina a umidade da superfície da peça.

Semelhante ao que ocorre com a energia de soldagem, quanto maior for a temperatura de pré-aquecimento mais calor está sendo adicionado na peça. Na Figura 4 observa-se o ciclo térmico para diferentes temperaturas de pré-aquecimento. Quanto maior a temperatura de pré-aquecimento, menor é a taxa de resfriamento.

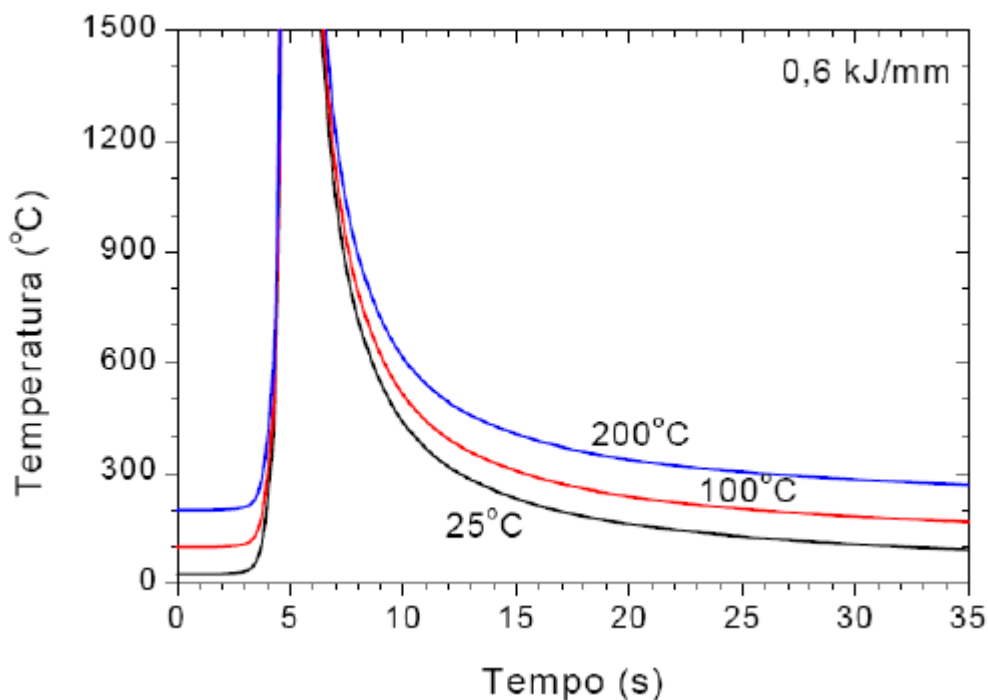


Figura 4 - Ciclo térmico para diferentes temperaturas de pré-aquecimento.
 Fonte: (MODENESI et al., 2006)

2.4 Diluição

É definida como o percentual do metal de base que entra na composição da zona fundida e pode ser calculada pela Equação 2. (AWS, 1991).

$$\text{Percentual de Diluição} = \frac{\text{Área "B"}}{\text{Área "A"} + \text{Área "B"}} * 100 \quad (2)$$

Na deposição de revestimentos deseja-se uma baixa diluição do cordão de solda e assim a influência do metal de base é minimizada, visto que o metal de base possui propriedades inferiores às do metal de adição utilizado. Na Figura 6 estão representadas as áreas A e B e indicados o reforço (R), a penetração (P) e a largura (L) do cordão de solda. (LIMA et al., 2007).

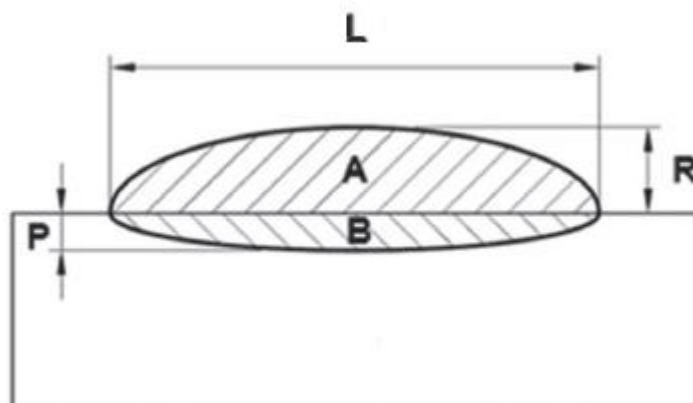


Figura 5 – Diluição de um cordão de solda.

Fonte: (GOMES *et al*, 2011)

Alternativamente, a diluição pode ser calculada através da composição química do substrato, do metal de adição e do metal de solda. Este método está apresentado através da Equação 3.

$$%D = 100 * \frac{E1 - E2}{E3 - E2} \quad (3)$$

Onde:

E1 → composição química no metal de solda;

E2 → composição química no metal de adição;

E3 → composição química no metal de base.

2.5 Soldagem de Revestimento

A soldagem de revestimentos superficiais com características em geral mais nobres que o metal de base que visa aplicações específicas com maiores durezas, resistência ao desgaste e/ou corrosão, vem sendo amplamente estudada ao longo dos anos. Os processos mais utilizados para a deposição de eletrodos e arames são: soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*), soldagem a arco submerso (SAW – *Submerged Arc Welding*), soldagem a arco com arame sólido ou MIG/MAG (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*) e soldagem com arame tubular (FCAW – *Flux Cored Arc Welding*). (MARQUES, 1991)

Selecionando-se apropriadamente materiais e tratamentos térmicos de superfície é possível reduzir problemas como o desgaste abrasivo. Uma diversidade

de materiais promove uma boa resistência a abrasão, como é o caso de revestimentos duros com alto teor de carbonetos.

Como o desgaste abrasivo ocorre exclusivamente na superfície do material não se justifica produzir uma peça inteira com um metal resistente à abrasão, uma vez que materiais utilizados para revestimento são considerados mais nobres e, portanto, muito mais caros que os do metal de base. Dessa forma, utiliza-se um metal de base mais barato e aplica-se o revestimento na superfície. (LINCOLN ELECTRIC, 2011)

2.5.1 Ligas para Aplicação em Revestimentos

Para aumentar a resistência ao desgaste do revestimento usualmente são utilizadas ligas que formam carbetos e boretos em uma matriz de Cromo, Cobalto, Níquel ou Ferro. Ligas de Cobalto e Níquel são utilizadas para aplicações a altas temperaturas. Elas fornecem uma combinação de alta resistência à corrosão e/ou temperatura aliada à resistência ao desgaste, porém são mais caras que ligas em matriz de Cromo e Ferro. (WANG *et al*, 2008).

A presença de boretos, carbetos e intermetálicos na matriz promove seu reforço com o objetivo de conter o movimento de discordâncias que geram distorções. Assim essas ligas apresentam elevada resistência a tração, módulo de elasticidade, ductilidade, resistência a fadiga, ao impacto e à fadiga térmica. (REINALDO, 2008).

De acordo com a literatura, a resistência ao desgaste abrasivo tende a aumentar com a proporção de carbetos na matriz. Uma alta concentração de carbetos uniformemente distribuídos em uma matriz metálica tem mostrado fornecer a máxima resistência ao desgaste em ensaios de desgaste abrasivo. Em contrapartida, aumentando a proporção dessa fase dura na matriz a resistência a fratura diminui, limitando seu uso para aplicações de impacto. Como alternativa, têm sido desenvolvidas ligas com uma dispersão muito fina e uniforme de carbetos para simultaneamente aumentar a resistência à fratura e à abrasão. Essas ligas apresentam altas concentrações de Nióbio, Cromo, Tungstênio e Molibdênio. (LEECH *et al*, 2012).

Revestimentos duros com alto teor de Cromo vêm sendo utilizados como uma boa solução em situações onde seja necessária resistência à abrasão. Eles apresentam custo menor do que revestimentos duros com alta concentração de Tungstênio ou Vanádio, além de possuírem boa resistência à corrosão. (CHANG *et al.*, 2010)

Os revestimentos duros com Ferro e alto teor de Cromo abrangem composições químicas nas quais o teor de Cromo pode variar desde 6% até 35% em peso e o teor de Carbono desde 2% até 6% em peso. Como principal característica desses revestimentos com alto teor de Cromo está a formação de carbonetos, geralmente M_7C_3 em sua microestrutura, podendo estar dispersos em uma matriz austenítica, martensítica ou perlítica. A microestrutura desses materiais é diretamente influenciada pela taxa de resfriamento do processo. (ASM, 1993)

2.6 Desgaste

Segundo Davis (2001), desgaste pode ser definido como dano a uma superfície sólida causado pela remoção ou deslocamento de material através de um mecanismo de ação por contato sólido, líquido ou gasoso.

Há diversas classificações de desgaste. Uma das mais simples trata da presença ou não de um lubrificante. Outra forma trata do mecanismo de remoção do material dividindo em categorias como abrasão, erosão, adesão e fadiga superficial. Na abrasão, há partículas duras agindo em uma superfície de menor dureza. Na erosão há a ação de fluídos na superfície, por exemplo o que ocorre no fenômeno de cavitação. No desgaste por adesão há transferência de material entre duas superfícies sólidas. Na fadiga superficial há a ação de esforços repetitivos de tensões compressivas. (DAVIS, 2001)

Como o ensaio de riscamento trata da resistência ao desgaste abrasivo ele será discutido mais detalhadamente a seguir.

2.6.1 Desgaste Abrasivo

É definido pela ASTM G40-01 como “a perda progressiva de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície ao longo da qual se movem”. Essa forma de desgaste nos metais é

frequentemente causada por materiais não-metálicos, uma vez que geralmente os materiais só são riscados ou sofrem abrasão por partículas mais duras que ele mesmos. (ASTM G40-01) (DAVIS, 2001)

Quanto ao contato entre abrasivo e superfície, podemos tradicionalmente classificar em dois tipos: abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos. A abrasão a dois corpos ocorre quando as partículas abrasivas estão fixas enquanto na abrasão a três corpos as partículas estão livres entre as duas superfícies. (HUTCHINGS, 1992). Ambos os tipos estão representados na Figura 6.

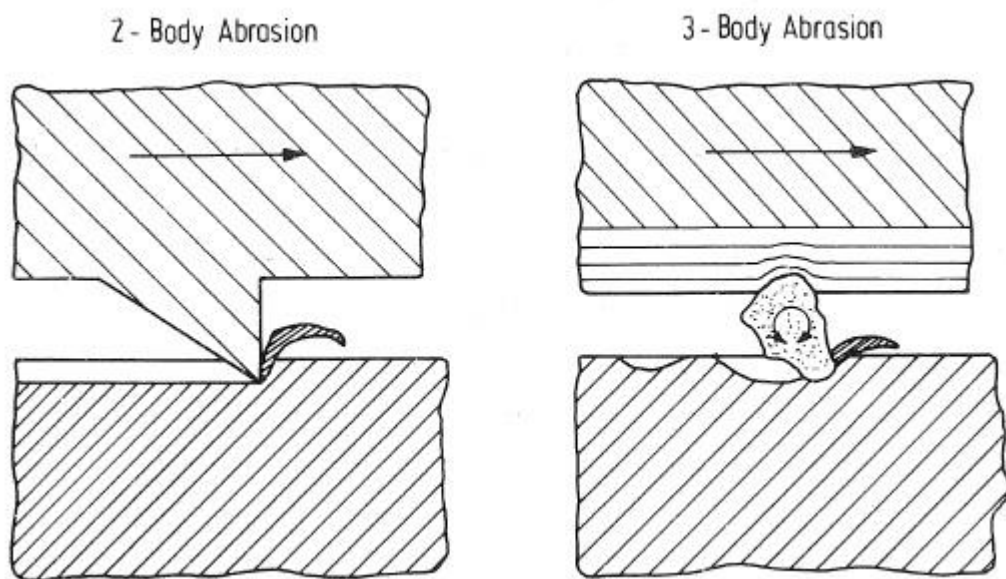


Figura 6 - Caracterização da abrasão a dois e a três corpos.

Fonte: (ZUM GAHR, 1987) p.84

A abrasão pode ser subdividida em quatro categorias. São elas: abrasão a baixa tensão, abrasão a alta tensão, abrasão por arranque e polimento.

Abrasão a baixa tensão ocorre quando há um contato relativamente brando entre as partículas abrasivas com o metal. Neste tipo de contato as forças atuantes devem ser baixas o suficiente para prevenir o esmagamento da partícula abrasiva. As marcas do desgaste geralmente mostram riscos na superfície e a deformação abaixo da superfície é mínima. A Figura 7a mostra uma partícula abrasiva em contato com a superfície, havendo abrasão a baixa tensão. (DAVIS, 2001)

Na abrasão a alta tensão, diferentemente do caso anterior, as tensões são altas o suficiente para que haja o esmagamento das partículas abrasivas e, por

deformação, há um aumento da dureza da superfície. É caracterizado por riscos, deformação plástica da superfície e cavidades impressas pelas partículas abrasivas. Este caso é ilustrado pela Figura 7b. (DAVIS, 2001)

Na abrasão por arranque, ilustrado na Figura 7c, a remoção do material é causada pela ação repetitiva de cargas compressivas. São característicos desse fenômeno a deformação plástica e o endurecimento da superfície. (DAVIS, 2001)

Polimento tem como característica superfícies planas e brilhantes. Essa planeza e brilho requerem remoção de material sendo, portanto, uma forma extremamente suave de desgaste envolvendo uma escala extremamente refinada de abrasão. O material é removido sem riscos visíveis, fraturas ou deformações plásticas. A Figura 7d ilustra esta forma de desgaste. (DAVIS, 2001)

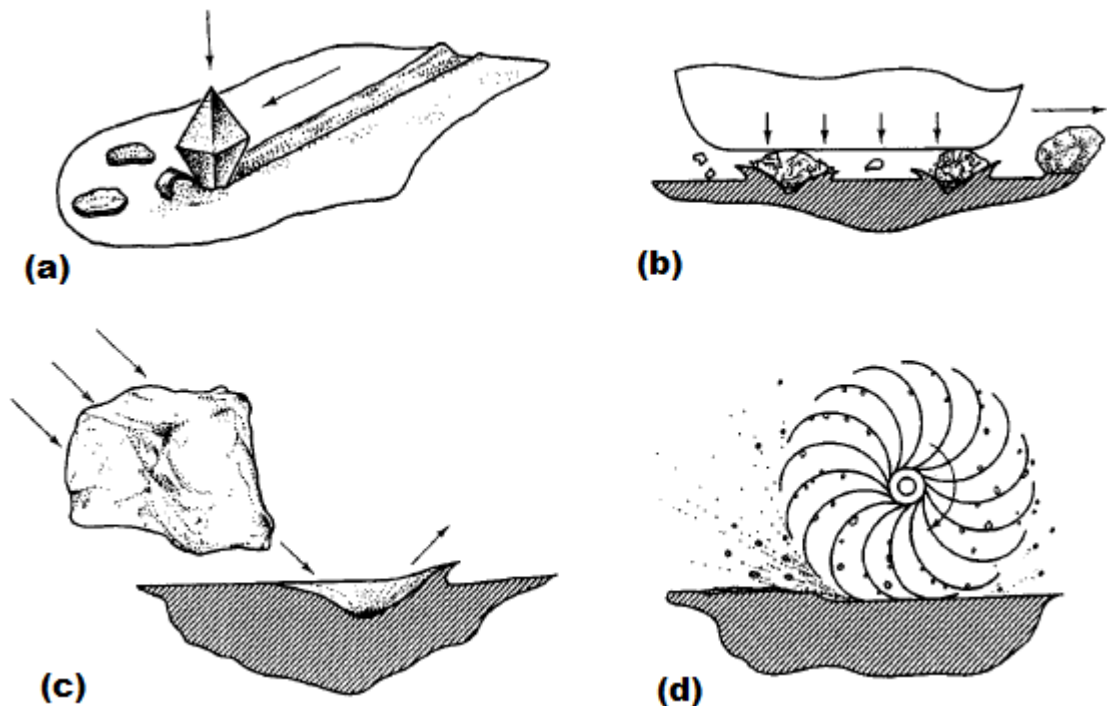


Figura 7- Tipos de desgaste abrasivo: (a) Abrasão a baixa tensão; (b) Abrasão a alta tensão; (c) Abrasão por arranque; (d) Polimento.

Fonte: (DAVIS, 2001) p.59

Quanto ao mecanismo de desgaste atuante, a Figura 8 mostra as interações que ocorrem entre partícula abrasiva e superfície do material. No caso ideal de microsulcamento por único passe de uma partícula abrasiva não há remoção de material da superfície desgastada. Uma proa é formada a frente da partícula e material é continuamente deslocado aos lados de modo a formar sulcos laterais ao

entalhe. Durante o microsulcamento, entretanto, perda de material pode ocorrer devido à ação sucessiva ou simultânea de partículas abrasivas. O material deslocado ao lado repetidamente pela ação do abrasivo pode romper por um ciclo de fadiga. Já em um caso ideal de microcorte a perda de material resultante é igual ao volume do entalhe produzido. (DAVIS, 2001) (ZUM GAHR, 1987)

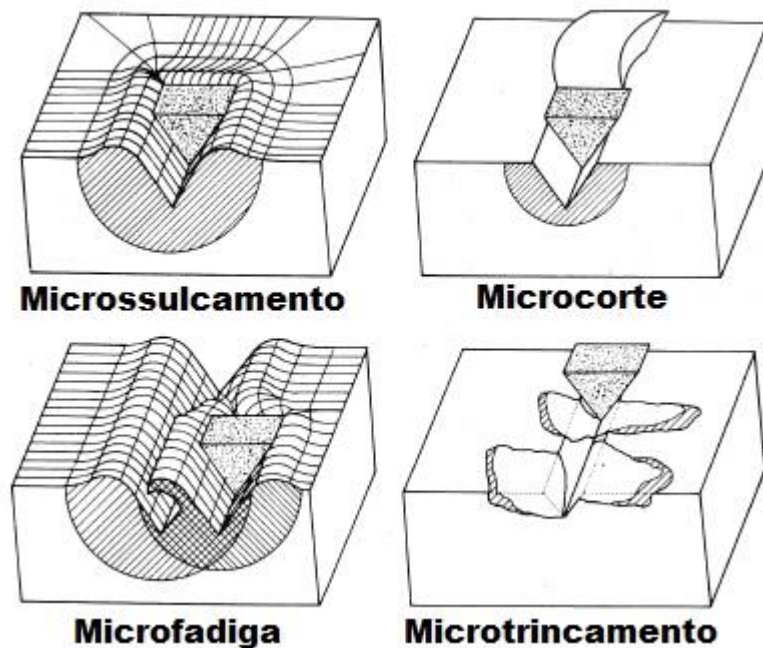


Figura 8 - Mecanismos de desgaste abrasivo: microsulcamento, microfadiga, microcorte e microtrincamento.

Fonte: (ZUM GAHR, 1987) p.96

Microtrincamento pode ocorrer quando tensões altamente concentradas são impostas pelas partículas abrasivas, particularmente na superfície de materiais frágeis. Neste caso, há considerável destacamento de material da superfície decorrente da formação e propagação de trincas. Quanto aos materiais mais dúcteis, as interações dominantes são o microsulcamento e o microcorte. A proporção do volume deslocado para os lados do entalhe depende do ângulo de ataque da partícula abrasiva. Segundo a literatura, a transição entre microsulcamento e microcorte ocorre quando o ângulo de ataque do abrasivo é maior do que um valor crítico. A Figura 9 mostra o desgaste sofrido em uma superfície variando o ângulo de ataque entre 30° , 60° e 90° . O ângulo de ataque crítico é uma função da superfície e das condições de teste. Teoricamente, o ângulo crítico descreve a transição entre microsulcamento e microcorte. (DAVIS, 2001) (ZUM GAHR, 1987)

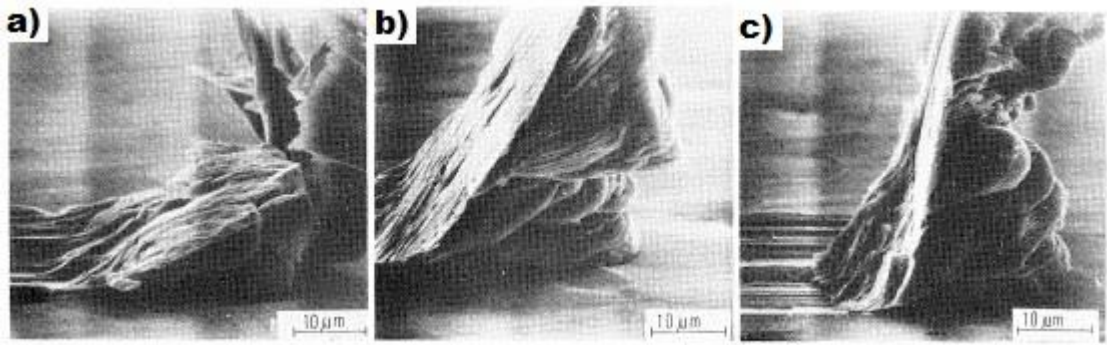


Figura 9 - Desgaste de uma superfície com ângulo de ataque de (a) 30° (b) 60° e (c) 90°.

Fonte: (ZUM GAHR, 1987) p.97

2.7 Ensaios de Desgaste

Há diversos ensaios de desgaste normalizados pela ASTM. Entre eles, estão ensaios como o de riscamento, ensaio com roda de borracha e areia seca, ensaio de pino contra o disco, etc.

O ensaio de riscamento, normalizado pela ASTM G171-03 (Revisada em 2009), é utilizado para determinar a dureza ao riscamento de materiais sólidos. O método é aplicável a metais, cerâmicos, polímeros e superfícies revestidas. Há diversas condições que podem ser variadas neste ensaio como, por exemplo, a presença ou não de lubrificante, a temperatura de ensaio, a carga aplicada, a velocidade do risco e o indentador utilizado. Como padrão, utilizam-se indentadores de diamante podendo ter formato piramidal (Vickers) ou cônico (Rockwell C). (ASTM G171-03)

Em comparação com métodos quase estáticos de medição de dureza, onde o indentador é forçado contra a superfície e a área de impressão ou profundidade são medidos, a dureza por riscamento envolve diferentes combinações de propriedades da superfície visto que o indentador move-se tangencialmente ao longo da mesma. Assim, a dureza por riscamento é uma medida mais apropriada para avaliar a resistência à abrasão a dois-corpos do que os demais métodos quase estáticos.

3 METODOLOGIA

3.1 Deposição dos Revestimentos

3.1.1 Materiais

Como material do substrato, Ishi (2012) utilizou chapas de aço Carbono AISI 1045 laminado a quente com dimensões de 6,35 mm x 100 mm x 150 mm para todas as deposições. Este material tem médio teor de carbono e foi escolhido por apresentar boa temperabilidade, predisposto à formação de uma microestrutura martensítica, de forma que a aplicação do pré-aquecimento possa alterar suas características durante o processo de soldagem. A composição química da chapa conforme a AISI (*American Iron and Steel Institute*) está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço AISI 1045.

Composição do aço AISI 1045			
%C	%Mn	%P (Máxima)	%S (Máxima)
0,42 – 0,45	0,6 – 0,9	0,04	0,05

Fonte: (Ishi, 2012)

Para o metal de adição é necessário que o material apresente boa resistência ao desgaste com a formação de uma superfície de elevada dureza. Como considerado anteriormente, elementos formadores de carboneto tais como Cromo ou Titânio são altamente desejáveis.

O arame tubular utilizado então foi o UTP AF Ledurit 60. É um arame tubular de Ferro para revestimentos duros com alto teor de Cromo. Sua composição química nominal está apresentada na Tabela 2. Trata-se de um arame tubular autoprotetido, portanto não necessita de proteção gasosa externa.

Tabela 2 - Composição química do arame UTP AF Ledurit 60.

Composição do arame UTP AF Ledurit 60			
%C	%Si	%Mn	%Cr
4,4	0,2	0,3	27,0

Fonte: (UTP, 2010)

A bitola do arame é de 1,6 mm. O fabricante recomenda tensões de soldagem entre 22 e 29 Volts e corrente entre 150 e 300 Ampéres. Para uma posição de

soldagem plana, é recomendada a técnica de soldagem “puxando” e entre 25 a 30 mm de arame saliente.

3.1.2 Equipamentos

Para deposição dos cordões utilizou-se a fonte de soldagem INVERSAL 450 com tensão constante. A bancada de deposição dos cordões é mostrada na Figura 10 e é composta pela fonte de soldagem, alimentador de arame, tocha de soldagem e movimentador da tocha de soldagem.

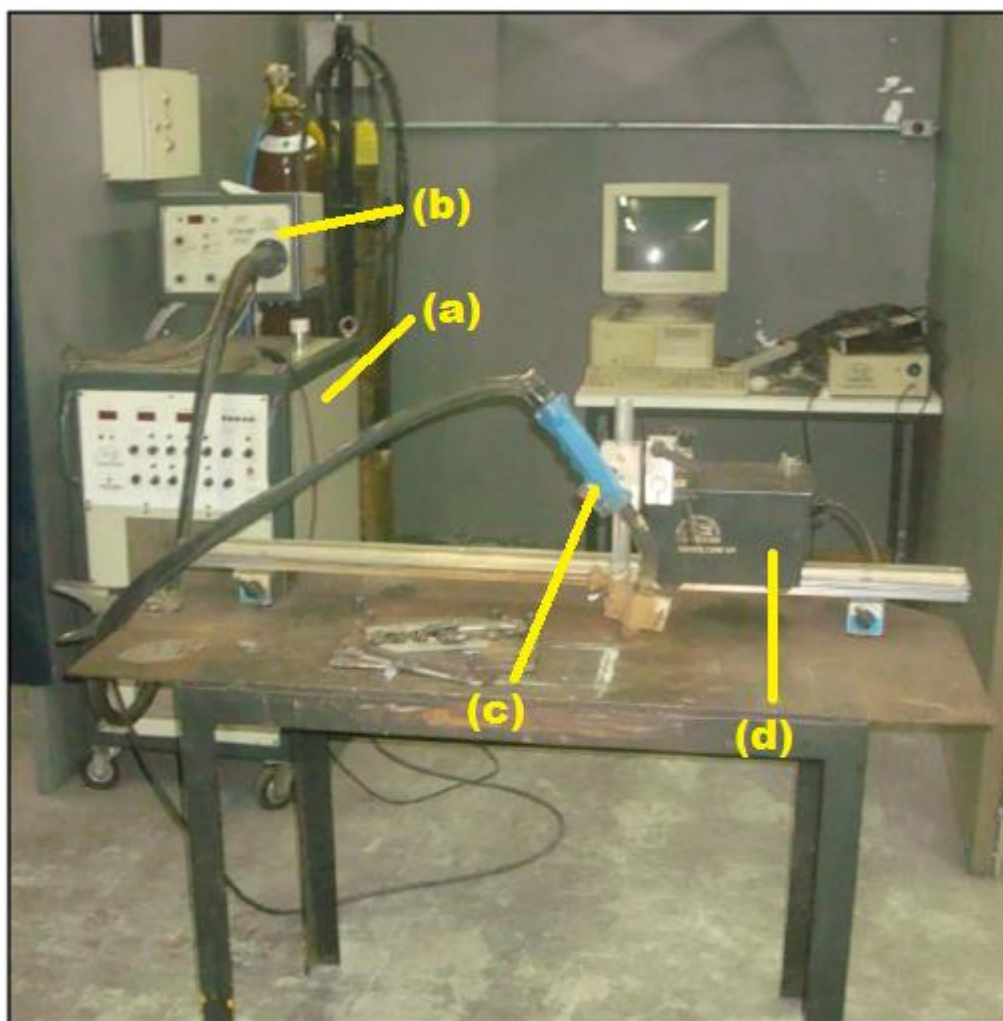


Figura 10 - Bancada de deposição dos cordões: (a) fonte de soldagem; (b) alimentador de arame; (c) tocha de soldagem; (d) movimentador da tocha.

Fonte: (Ishi, 2012)

Os cordões foram depositados de forma semiautomática utilizando um sistema de deslocamento da tocha de soldagem denominado TATÍLOPE-V1. Este

equipamento permite o controle da velocidade de soldagem e da distância tocha/peça para que sejam constantes durante todo o processo.

3.1.3 Procedimento Experimental

Seguindo as recomendações do fabricante, os parâmetros de soldagem dos cordões depositados por Ishi (2012) estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de soldagem dos cordões depositados.

Parâmetros de Soldagem		
Distância tocha/peça	25	mm
Inclinação da tocha com a vertical	15	°
Voltagem <i>setup</i>	25,0	V
Velocidade de alimentação do arame	3,0	m/min
Velocidade de soldagem	25	mm/s
Comprimento do cordão	130	mm

Fonte: (Ishi, 2012)

Previamente à deposição foi realizada a preparação da superfície do metal de base. Com o auxílio de uma esmerilhadeira com disco abrasivo foi realizada a remoção da carepa de laminação.

Para realização do pré-aquecimento nas amostras foi utilizado um maçarico oxi-gás com acetileno como combustível. O processo foi realizado com chama neutra, ou seja, proporções ideais de comburente e combustível. Para aferição da temperatura de pré-aquecimento e uniformidade da temperatura na superfície da peça foi utilizado um pirômetro com sensor digital (tipo de termômetro que mede irradiação térmica da superfície). A aplicação do pré-aquecimento e a medição da temperatura podem ser observadas nas Figuras 11 e 12, respectivamente.



Figura 11 - Aplicação do pré-aquecimento.
Fonte: (Ishi, 2012)



Figura 12 - Medição da temperatura de pré-aquecimento.
Fonte: (Ishi, 2012)

Após o pré-aquecimento foram depositados os cordões, lado a lado, de forma a obter-se uma camada de revestimento. A velocidade de soldagem foi mantida constante com a utilização do movimentador da tocha, bem como os demais parâmetros já citados. A distância tocha/peça foi aferida com o uso de um paquímetro analógico e a inclinação do bocal através de um goniômetro.

Para reduzir o empenamento causado pelas tensões de contração durante o resfriamento da peça foi utilizado um gabarito. O empenamento causaria variações

na distância tocha/peça. Entre a deposição de cada cordão foi realizado a limpeza das amostras para remoção da escória e impurezas com o auxílio de uma esmerilhadeira com um disco rotativo tipo escova de aço. O gabarito e os cordões de solda podem ser observados na Figura 13.



Figura 13 - Gabarito utilizado para fixação das amostras.

Fonte: (Ishi, 2012)

Para a condição sem pré-aquecimento, a temperatura ambiente foi de 23°C. Nas amostras com pré-aquecimento foi realizado a aferição da temperatura antes de cada passe.

Por fim, as amostras foram fresadas e a superfície retificada a fim de realizar os procedimentos experimentais no abrasômetro tipo roda de borracha propostos por Ishi (2012). Estas amostras são mostradas na Figura 14 e foram utilizadas em todos os ensaios posteriores.

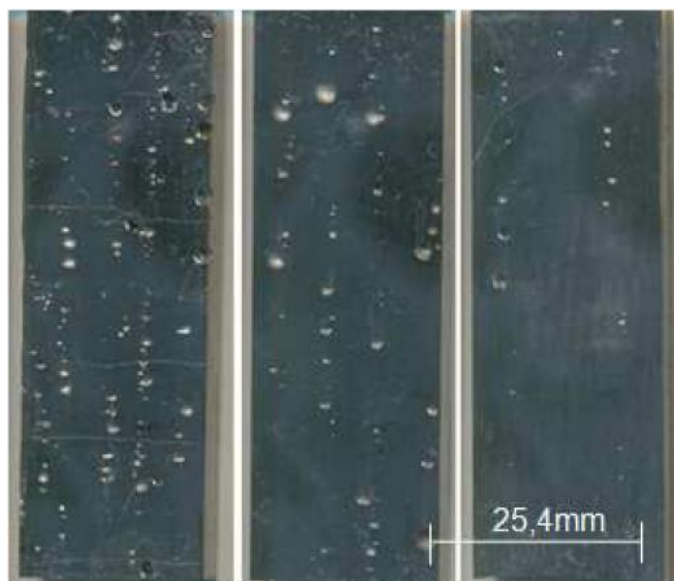


Figura 14 - Corpos de prova utilizados nos ensaios.

Fonte: (Ishi, 2012)

3.2 Ensaios de Dureza

Na superfície do revestimento duro foram realizadas medições de dureza a fim de caracterizar cada condição de pré-aquecimento. Foram realizadas 15 medições para cada condição no durômetro EMCO – TEST M4C 025 G3M através do método Vickers HV30, ou seja, durante 10s foi aplicada uma carga de 30kgf. Através do próprio durômetro, os resultados na escala Vickers foram convertidos para a escala Rockwell C (HRC).

Na secção transversal do revestimento foram feitas medições de microdureza para caracterizar a microestrutura do material. Foram realizadas 5 medições na matriz do material e 5 medições nos carbonetos de cada uma das amostras. O microdurômetro utilizado foi Shimadzu HMV-2, padrão de dureza HV0,01 (carga de 0,01 kgf) durante 10 s.

3.3 Tribômetro

O equipamento a ser utilizado nos ensaios de riscamento é o Tribômetro UMT (*Universal Mechanical Tester*) do fabricante CETR® localizado no LASC (Laboratório de Superfícies e Contato) da UTFPR e mostrado na Figura 15.



Figura 15 - Tribômetro UMT.

Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Ensaio de Riscamento

Neste trabalho foram realizados riscos na superfície através do movimento de uma ferramenta cônica de diamante com força normal e velocidade constantes. O teste foi realizado sem lubrificação e em temperatura ambiente. Então mediu-se a largura do risco e calculada a dureza ao riscamento utilizando a Equação 4. (ASTM G171-03).

$$HS_p = \frac{8 * P}{\pi * w^2} \quad (4)$$

Onde:

HS_p → Dureza ao riscamento [Pa];

P → Força normal [N];

w → largura do risco [m].

Para determinação da força normal aplicada foram feitos riscos na amostra à temperatura ambiente, pois esta apresentou a maior dureza. Foi variada a carga e

então analisado em um microscópio ótico para determinar este parâmetro. A carga que apresentou um risco uniforme e sem desvios foi de 40N. O comprimento dos riscos foi de 5 mm e a velocidade mantida constante em 0,17 mm/s, totalizando 30 s por risco.

3.3.2 Medição da Largura dos Riscos

Para calcular a dureza ao riscamento através da Equação 4 é necessário medir a largura dos riscos realizados no Tribômetro. As medições foram feitas utilizando o microscópio ótico Olympus® BX51M com a câmera CCD CoolSNAP-Pro instalada para aquisição das imagens. Com o auxílio do *software* Image-Pro Plus é possível delimitar a área do risco. Dividindo esta área pelo comprimento do risco temos sua largura média. Este processo está mostrado nas Figuras 16 e 17 e foi utilizado também por Molossi e Kamei (2014). Na Figura 16 a área foi realçada para melhor ilustrar o processo.

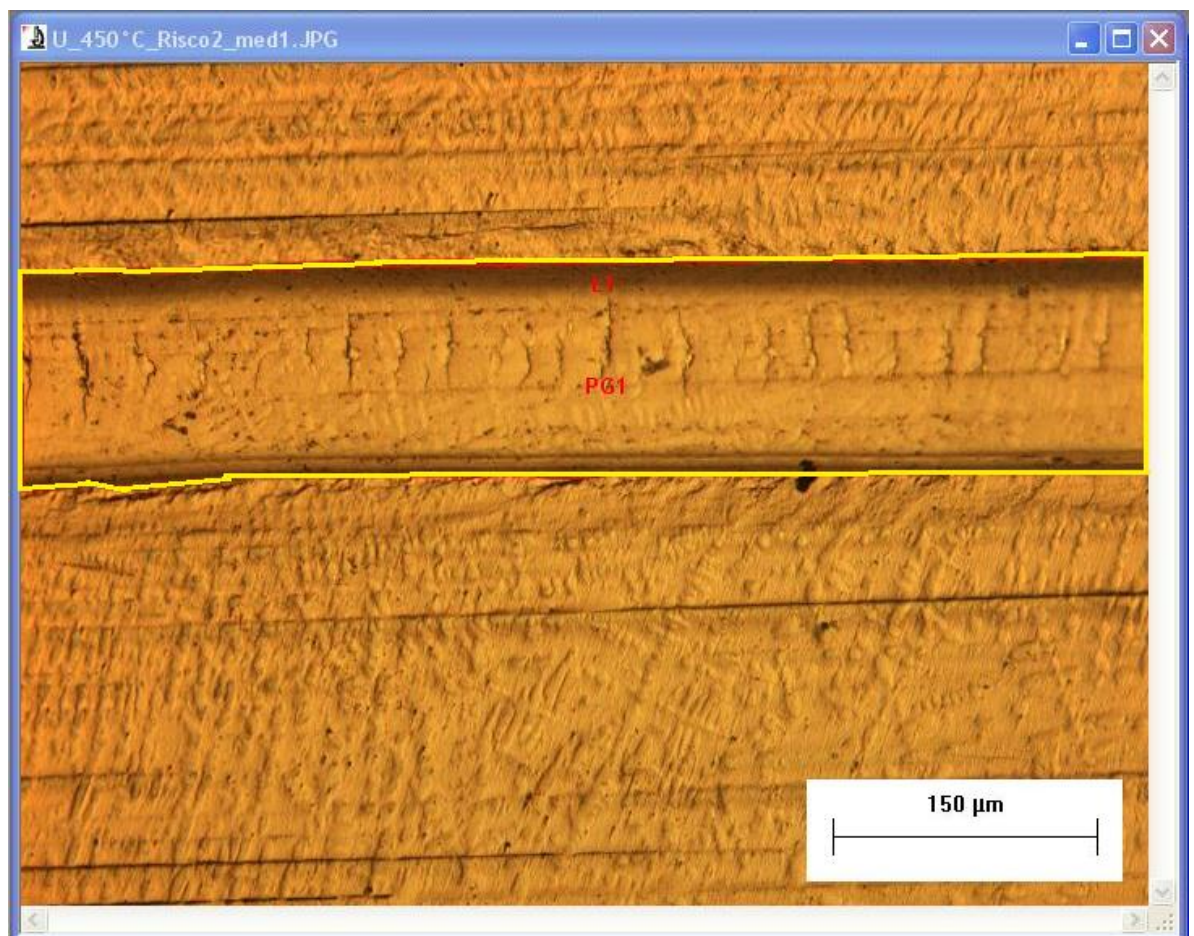
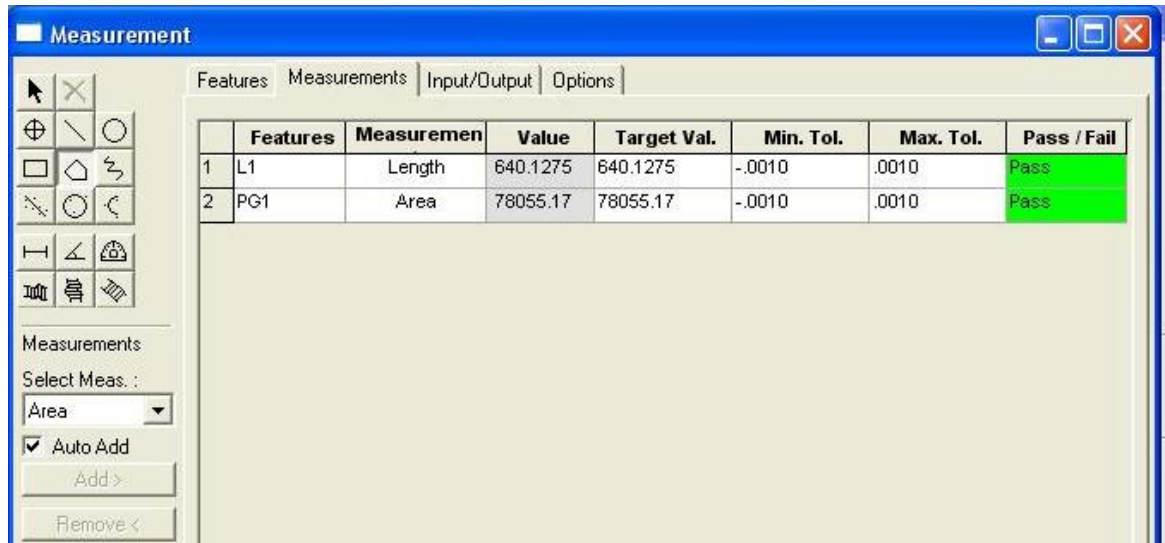


Figura 16 - Método de medição da largura média do risco.

Fonte: Autoria própria.



	Features	Measuremen	Value	Target Val.	Min. Tol.	Max. Tol.	Pass / Fail
1	L1	Length	640.1275	640.1275	-.0010	.0010	Pass
2	PG1	Area	78055.17	78055.17	-.0010	.0010	Pass

Figura 17 - Método de medição da largura média do risco.

Fonte: Autoria própria.

Como método alternativo para obtenção do perfil do risco, foi utilizado o perfilômetro óptico 3D Talysurf CCI – Lite, fabricante Taylor Hobson, mostrado na Figura 18. No perfilômetro é possível obter as dimensões do risco, bem como a rugosidade da amostra. A Figura 19 mostra o perfil de um dos riscos e a medição de sua largura.



Figura 18 - Perfilômetro óptico 3D.

Fonte: Autoria própria.

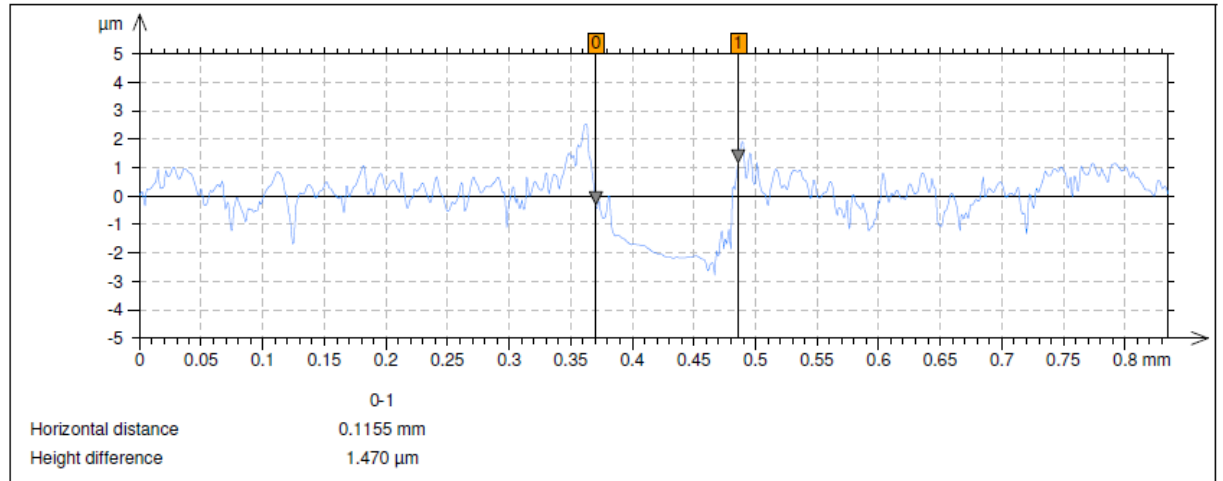


Figura 19 - Largura do risco obtida através do perfilômetro.

Fonte: Autoria própria.

3.3.3 Coeficiente de Atrito

Durante o ensaio de riscamento são realizadas aquisições das forças normal e tangencial ao movimento. A força normal (F_z) é a carga aplicada no risco enquanto a força tangencial (F_x) é a própria força de atrito (F_f). Dividindo-se F_x por F_z obtemos o coeficiente de atrito cinético, conforme mostrado na Equação 5.

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad (5)$$

Onde:

μ → Coeficiente de atrito cinético, adimensional;

F_x → Força tangencial ou de atrito [N];

F_z → Força normal [N].

3.4 Análise Metalográfica

Para que sejam observadas as diferenças microestruturais de cada condição das amostras, foi feito um corte transversal aos cordões de solda e embutido a quente em baquelite. A embutidora utilizada foi a Struers® Predopress. Após embutidas, as amostras foram lixadas em lixas com granulometrias 200, 400 e 600 μm, sucessivamente. Por fim as amostras foram polidas com uma solução de alumina de granulometria 1 μm.

Para revelar a presença de carbonetos no metal de solda, as amostras foram atacadas com o reagente químico Vilella por aproximadamente 10 s e então levadas ao microscópio óptico Olympus® BX51M para análise metalográfica.

3.5 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) foram obtidas imagens das amostras para melhor observação dos riscos efetuados. Além das imagens, o MEV foi utilizado com o módulo EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X) e o software INCA, da Oxford Instruments®, para análise da composição química dos revestimentos. Analisando a composição química dos revestimentos é possível obter a diluição do processo de soldagem e também analisar a microestrutura do material.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Dureza

Segundo o catálogo do fornecedor, o arame tubular UTP AF Ledurit 60 depositado sem diluição tem uma dureza entre 57 e 62 HRC. Nas condições sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de 450°C as durezas encontradas foram de 60,0 HRC e 53,1 HRC, respectivamente. Os valores obtidos e seus desvios padrão estão apresentados na Figura 20.

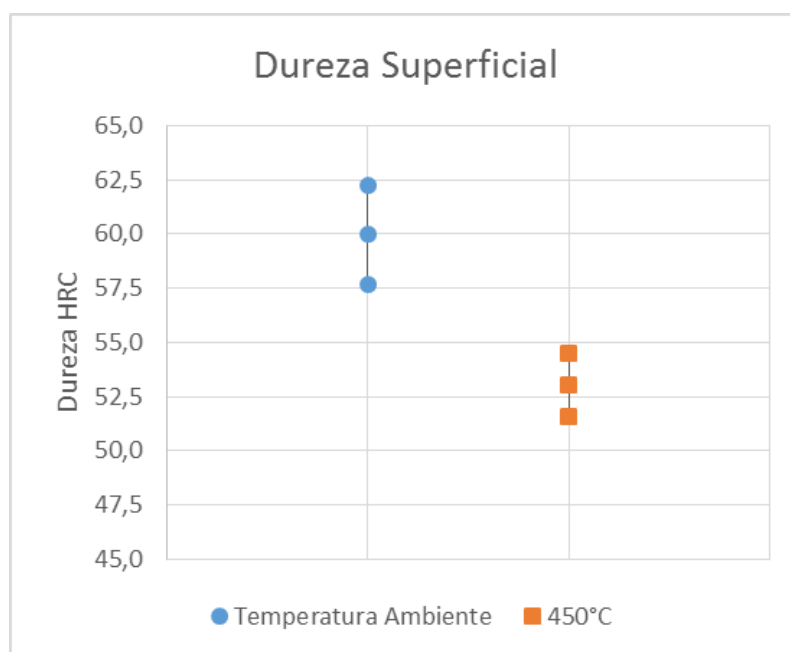


Figura 20 - Dureza superficial média obtida.

Fonte: Autoria própria.

A menor dureza superficial na condição pré-aquecida a 450°C foi uma consequência da diminuição na velocidade de resfriamento, formando-se microestruturas mais dúcteis e menos duras.

Na condição à temperatura ambiente, a dureza encontrada de 60,0 HRC é considerada muito alta. Isto pode ser facilmente evidenciado pelas trincas superficiais das amostras. Entretanto, nas duas condições a microestrutura frágil pode ser evidenciada através de microtrincas presentes no interior do risco. Isso será abordado adiante.

Também foram obtidos valores de microdureza para a matriz e para os carbonetos presentes na microestrutura do material. A Figura 21 exemplifica onde foram feitas as identações, sendo “estrela” os locais para a matriz e “quadrado” para os carbonetos. Devido ao tamanho dos elementos microestruturais das amostras, foi utilizada a carga de 0,01 kgf por 10 s, sendo esta a menor carga possível no microdurômetro. Assim, as larguras das identações foram em média de 5 µm. Observamos na Tabela 4 que os carbonetos precipitados foram os grandes responsáveis pela alta dureza do material. Os resultados foram convertidos para Rockwell C para facilitar a análise comparativa com as medições de dureza superficial.

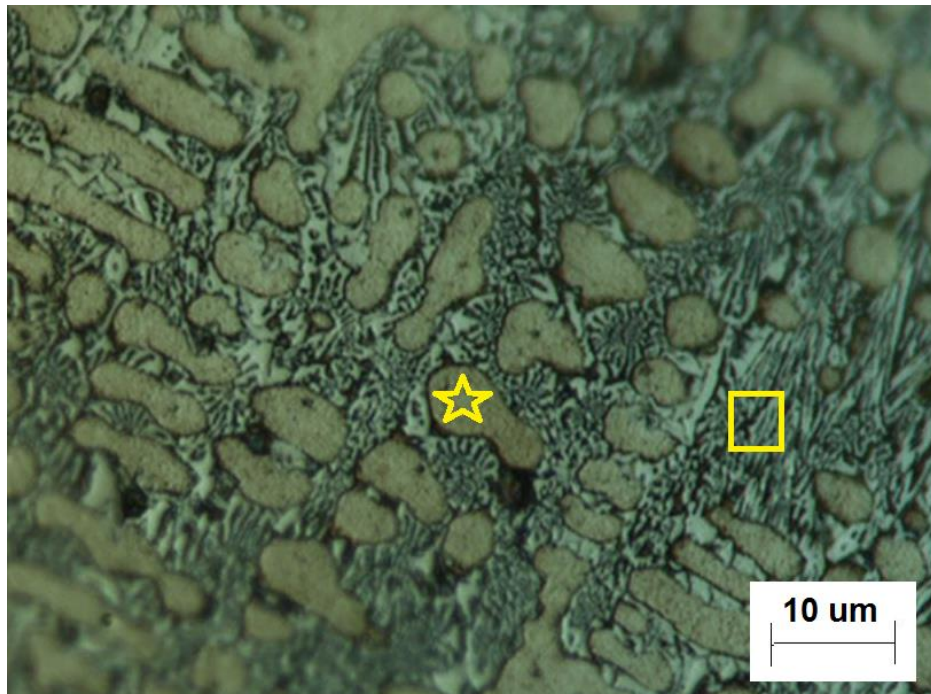


Figura 21 - Posição das medições de microdureza.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Microdureza da matriz e dos carbonetos precipitados.

		HV 0.01	HRC
Temperatura Ambiente	Matriz	437 ± 28	44,2 ± 2,4
	Precipitado	821 ± 52	64,5 ± 1,7
450°C	Matriz	440 ± 17	44,4 ± 1,4
	Precipitado	794 ± 33	63,7 ± 1,1

Fonte: Autoria própria.

4.2 Dureza ao Riscamento

Para que o risco seja válido, é necessário aferir a rugosidade da peça. Caso o valor da rugosidade na área que contém o risco seja igual ou menor que em outras áreas da peça significa que o risco não foi capaz de desgastar o material de forma confiável e, portanto, esses ensaios não podem ser validados. No perfilômetro é possível medir a rugosidade 3D das amostras. A Tabela 5 mostra os valores médios obtidos nessas medições.

Tabela 5 - Rugosidade das amostras.

		Sa (μm)	Sz (μm)
Temperatura Ambiente	Com Risco	0,746	25,43
	Sem Risco	0,695	4,43
450°C	Com Risco	0,944	26,34
	Sem Risco	0,779	7,33

Fonte: Autoria própria.

Sz representa a soma do máximo valor de altura do pico com o máximo valor de altura do vale na superfície da área medida. Sa expressa a média dos valores absolutos dos vales e picos da área medida. Assim, constatamos que em ambas as condições o risco foi suficiente para avaliar o desgaste abrasivo nas amostras.

A Figura 22 mostra a topografia de um risco enquanto a Figura 23 mostra a topografia de uma área sem risco, exemplificando as áreas para obtenção dos resultados de rugosidade e/ou perfil.

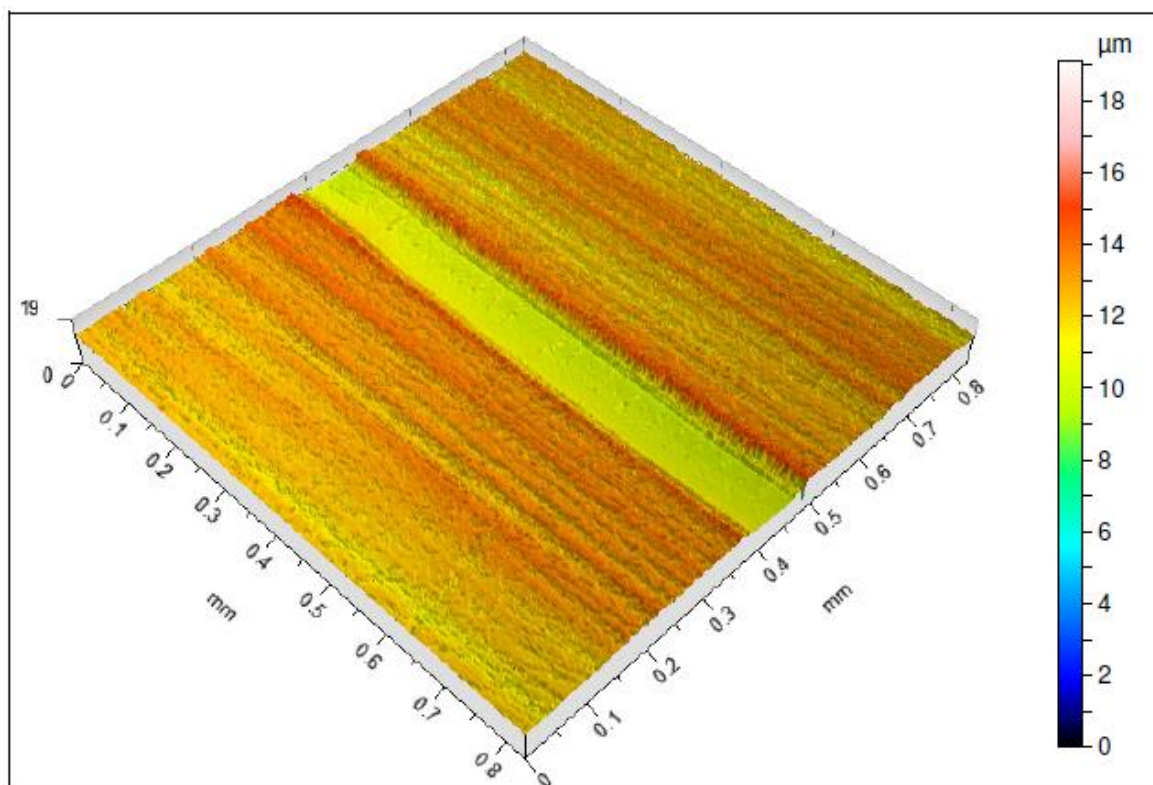


Figura 22 - Topografia da região com risco.

Fonte: Autoria própria.

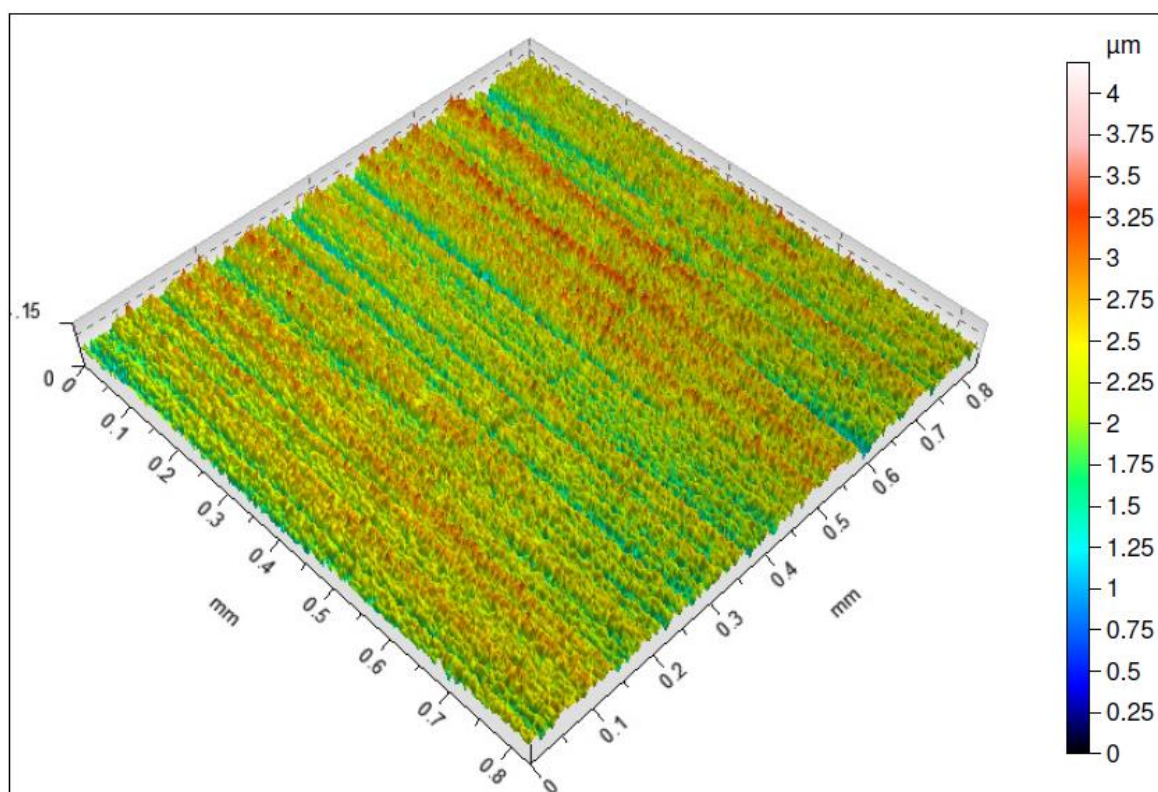


Figura 23 - Topografia da região sem risco.

Fonte: Autoria própria.

A medição da largura dos riscos foi realizada através do microscópio óptico e do software Image-Pro Plus. Este método foi considerado mais adequado, uma vez que em cada medição é possível obter a largura média em aproximadamente 0,5 mm do risco. Em contrapartida, no perfilômetro óptico só é possível obter a largura de um único ponto por medição, resultando em uma grande dispersão de valores. Assim este método para obtenção da largura dos riscos não foi considerado.

Os dados da força aplicada são gerados pelo próprio software do tribômetro. É fornecido o valor médio da força aplicada, bem como o desvio padrão das leituras.

Considerando que o valor da dureza ao riscamento é proporcional à força aplicada e inversamente proporcional ao quadrado da largura do risco, para o cálculo da máxima dureza ao riscamento de determinada condição foi considerada a máxima força aplicada, ou seja, a força média aplicada somada ao desvio padrão, e a largura mínima dos riscos, ou seja, a largura nominal subtraída do desvio padrão. Já para o valor mínimo da dureza ao riscamento foi considerado a força mínima e a máxima largura. Os resultados estão apresentados na Figura 24.

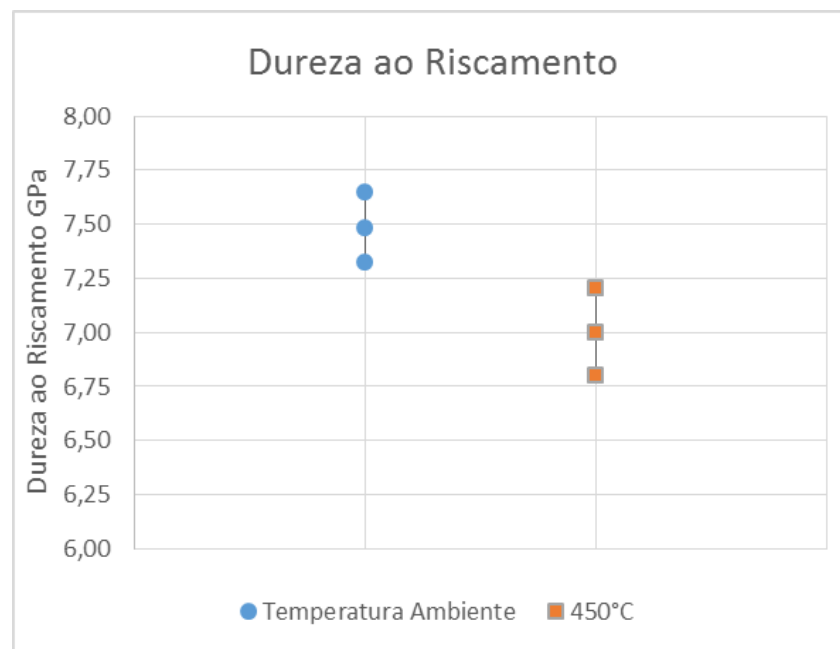


Figura 24 - Dureza ao riscamento.

Fonte: Autoria própria.

Comparando a dureza ao riscamento das amostras com a dureza superficial das mesmas, observamos estes valores foram diretamente proporcionais. Ou seja, uma maior dureza superficial da condição à temperatura ambiente proporcionou uma

maior dureza ao riscamento. Assim a resistência ao desgaste abrasivo foi uma função da dureza superficial.

Essas mesmas amostras foram submetidas ao ensaio de desgaste abrasivo com um abrasômetro tipo roda de borracha, normalizado pela ASTM G65-04 (2010), no trabalho realizado por Ishi (2012). No trabalho em questão, a amostra com pré-aquecimento de 450°C obteve melhor performance (menor perda de massa durante os ensaios) pois apresentou menor quantidade de poros e trincas, fatores que afetam diretamente os ensaios em roda de borracha. Já nos ensaios de dureza ao riscamento, por tratar-se de um ensaio em uma superfície reduzida, essas descontinuidades não se mostraram significativas. A perda de massa obtida nos ensaios roda de borracha então apresentados na Figura 25.

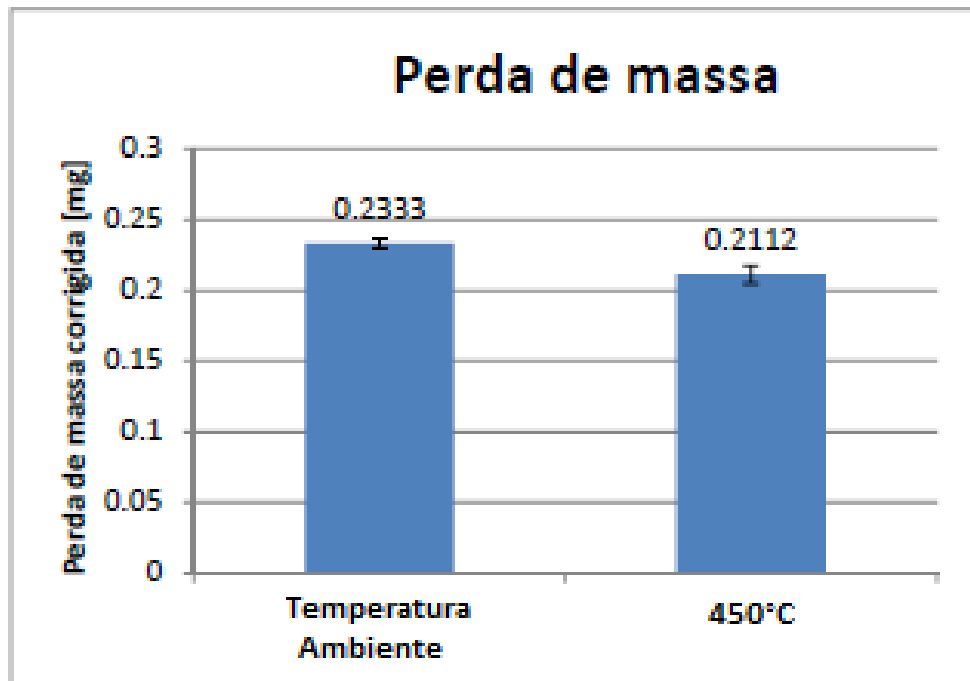


Figura 25 - Perda de massa obtida através de abrasômetro tipo roda de borracha.

Fonte: (Ishi, 2012)

Como referência para os valores encontrados neste trabalho, a pesquisa de Ferreira (2010) analisou a resistência ao desgaste no aço ABNT 8550 beneficiado para diferentes cargas e velocidades de riscamento. O aço ABNT 8550 é utilizado para nitretação em componentes como discos, extrusoras, engrenagens, bielas, etc. Na Figura 26 estão apresentados seus dados. Podemos observar que a máxima dureza ao riscamento foi de 4,27 GPa, bem abaixo da liga aqui analisada. A dureza

média deste material foi de 308 HV30 (31 HRC), também bem abaixo do revestimento analisado neste trabalho.

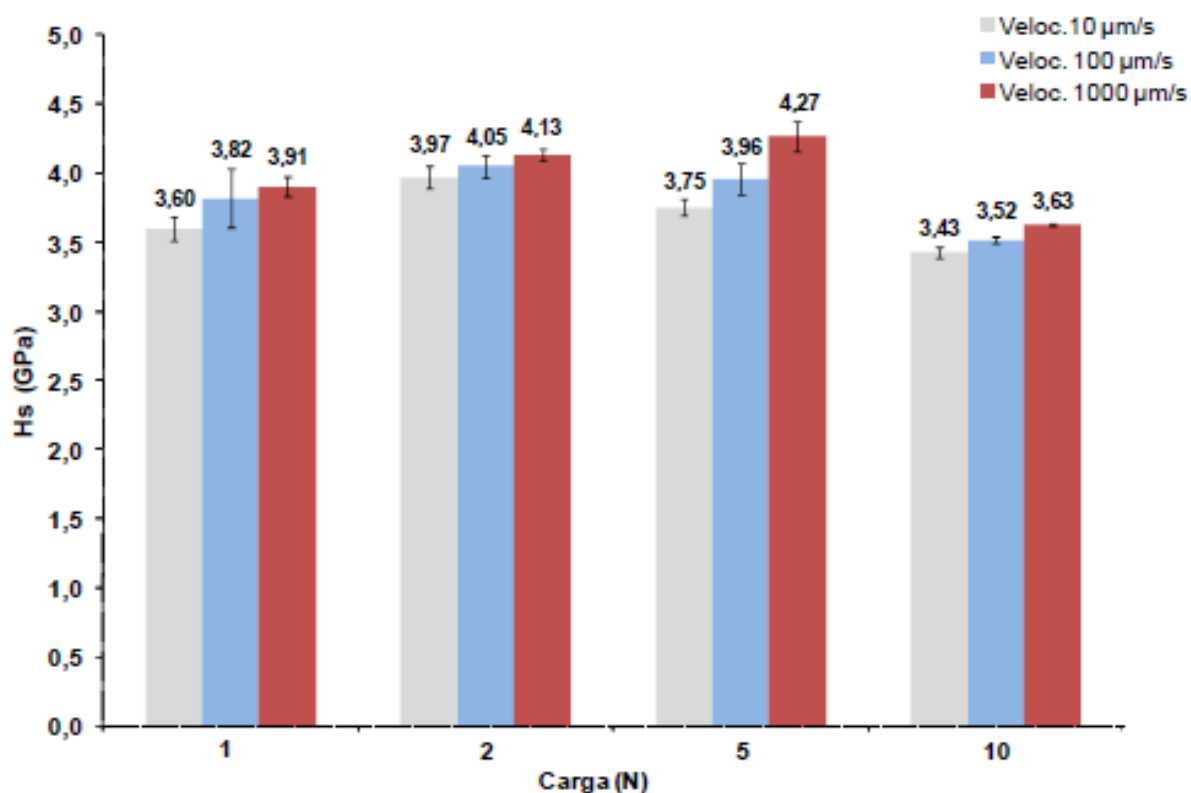


Figura 26 - Dureza ao riscamento do aço ABNT 8550.
Fonte: (Ferreira, 2010)

4.3 Coeficiente de Atrito

A Figura 27 mostra um gráfico obtido no ensaio de riscamento. Nele podemos obter a força normal F_z , força de atrito F_x e o coeficiente de atrito.

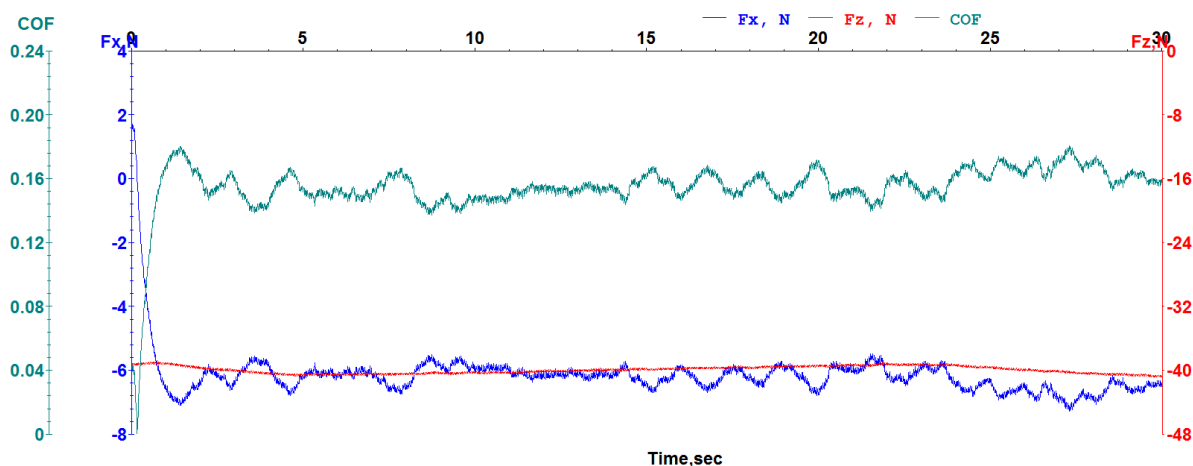


Figura 27 - Gráfico de F_x , F_z e coeficiente de atrito.
Fonte: Autoria própria.

Em todos os riscos feitos nas amostras foram registrados esses dados. O coeficiente de atrito médio e o desvio padrão está representado na Figura 28. Podemos observar que apesar de não haver uma alteração significativa do coeficiente de atrito entre as duas condições, há uma tendência que o coeficiente de atrito da condição menos dura seja menor. Ou seja, como o atrito é uma resistência a um movimento relativo, quanto maior a resistência ao riscamento do material maior é o coeficiente de atrito.

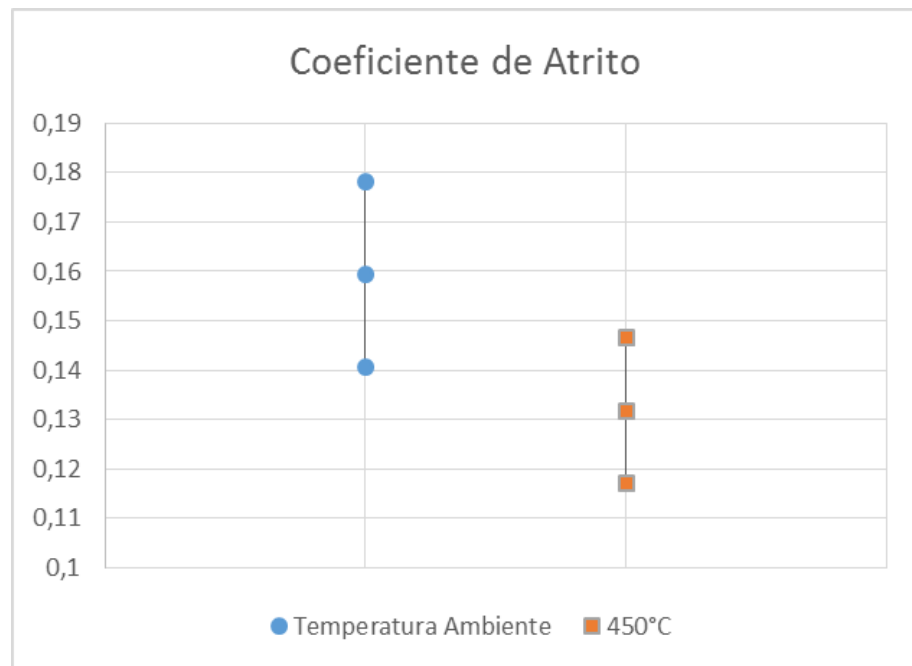


Figura 28 - Coeficiente de atrito dos ensaios de riscamento.
Fonte: Autoria própria.

No trabalho de Ferreira (2010) citado acima como valores de referência, o aço ABNT 8550 apresentou valores para o coeficiente de atrito de: 0,05 a 0,1 para carga normal de 1N; 0,1 a 0,15 para carga normal de 2N; 0,15 a 0,2 para carga normal de 5N e 0,2 a 0,25 para carga normal de 10N.

4.4 Análise Metalográfica e Composição Química

Nas Figuras 29 e 30 podemos observar a presença de microtrincas no interior dos riscos. Na condição à temperatura ambiente houve um maior número de trincas, porém isso não foi suficiente para que sua dureza ao riscamento fosse menor quando comparada à condição de 450°C de pré-aquecimento. As trincas são uma consequência da microestrutura dura e frágil do material. O maior número de trincas

da condição sem pré-aquecimento se deve à maior dureza superficial do revestimento.

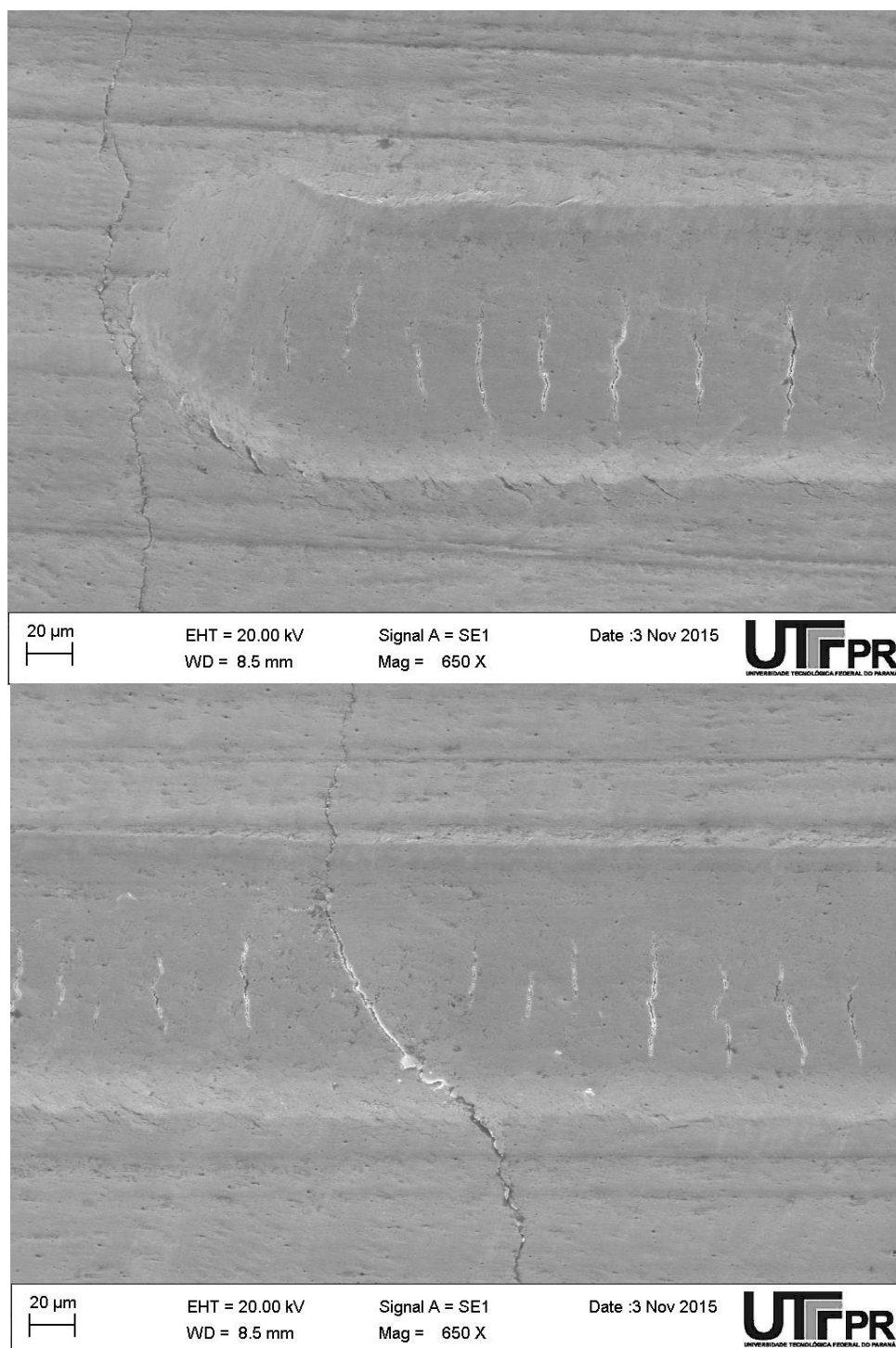


Figura 29 - Risco da amostra sem pré-aquecimento.
Fonte: Autoria própria.

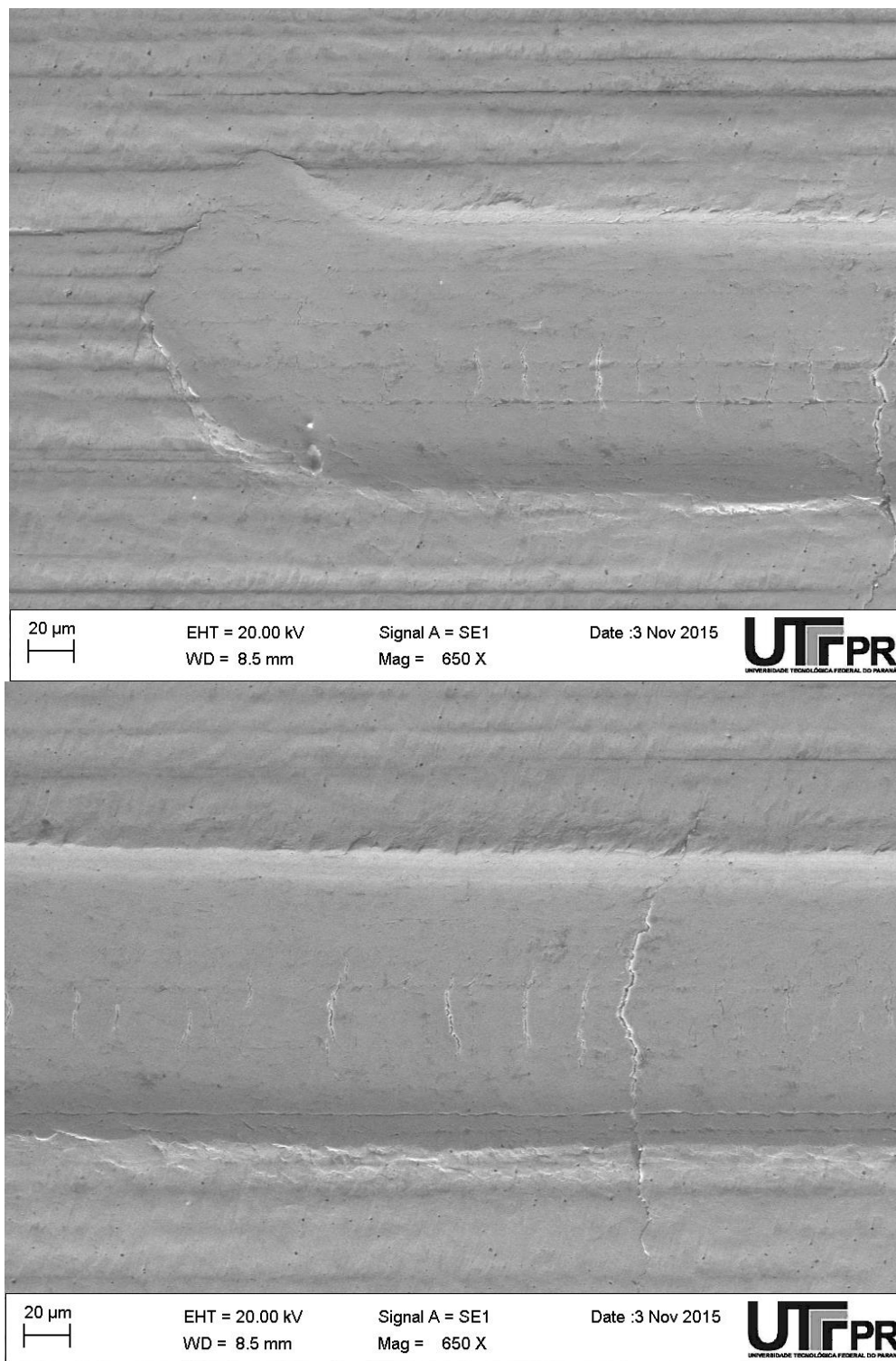


Figura 30 - Risco da amostra com pré-aquecimento de 450°C.
Fonte: Autoria própria.

Com o auxílio do software INCA e do módulo EDS no MEV, foi possível obter a composição química dos revestimentos e do material de base. O elemento Carbono foi excluído da análise por ser um elemento leve e de baixa emissividade de raios-X,

sendo assim uma limitação física do EDS. As Tabelas 6, 7 e 8 mostram as composições químicas encontradas, todas em percentual de peso.

Tabela 6 - Composição química do metal de base, em %peso.

Si	Fe
0.43	99.57

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Composição química da condição sem pré-aquecimento, em %peso.

Si	Cr	Fe
1.31	17.98	80.7

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Composição química da condição com pré-aquecimento a 450°C, em %peso.

Si	Cr	Fe
1.2	15.66	83.17

Fonte: Autoria própria.

Através da fórmula apresentada na Equação 3, podemos calcular a diluição das amostras. Considerando o cálculo da diluição pelo elemento Cromo, ausente no metal de base, obtemos:

$$\%D \text{ Sem Pré-Aquecimento} = 33,4\%;$$

$$\%D 450^{\circ}\text{C} = 42,0\%.$$

Assim, para uma maior energia de soldagem do processo com pré-aquecimento obteve-se uma maior diluição. Essa diluição ocasiona uma maior influência do metal de base nas propriedades do metal de solda. Isso pode ser observado pela menor dureza ao riscamento desta condição, enquanto a amostra com menor diluição apresentou maior dureza ao riscamento.

O EDS/MEV também foi utilizado para analisar a composição química do material. As Figuras 31 e 32 mostram as imagens do material obtidas no MEV e as áreas utilizadas na espectroscopia e nas Tabelas 9 e 10 está apresentada a composição química encontrada.

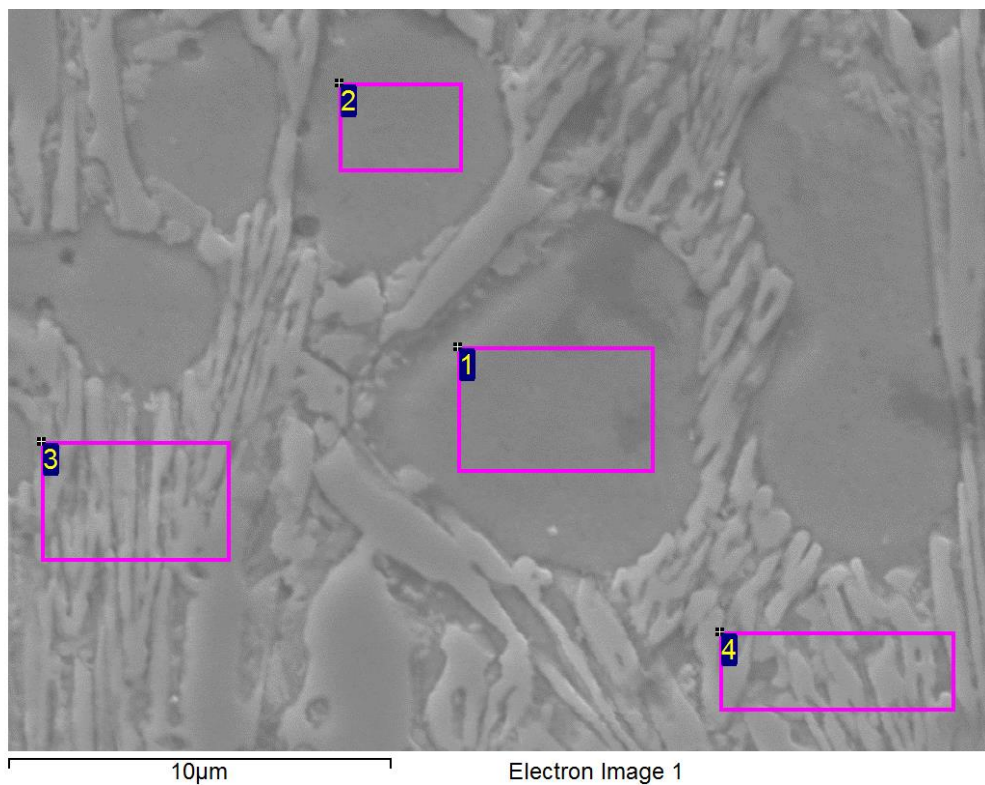


Figura 31 - Áreas para espectroscopia da condição sem pré-aquecimento.
Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 - Composição química, condição sem pré-aquecimento.

Spectrum	Si	Cr	Fe
1	1.47	10.61	87.92
2	1.50	10.43	88.07
3	0.90	23.04	76.06
4	0.85	22.61	76.54

Fonte: Autoria própria.

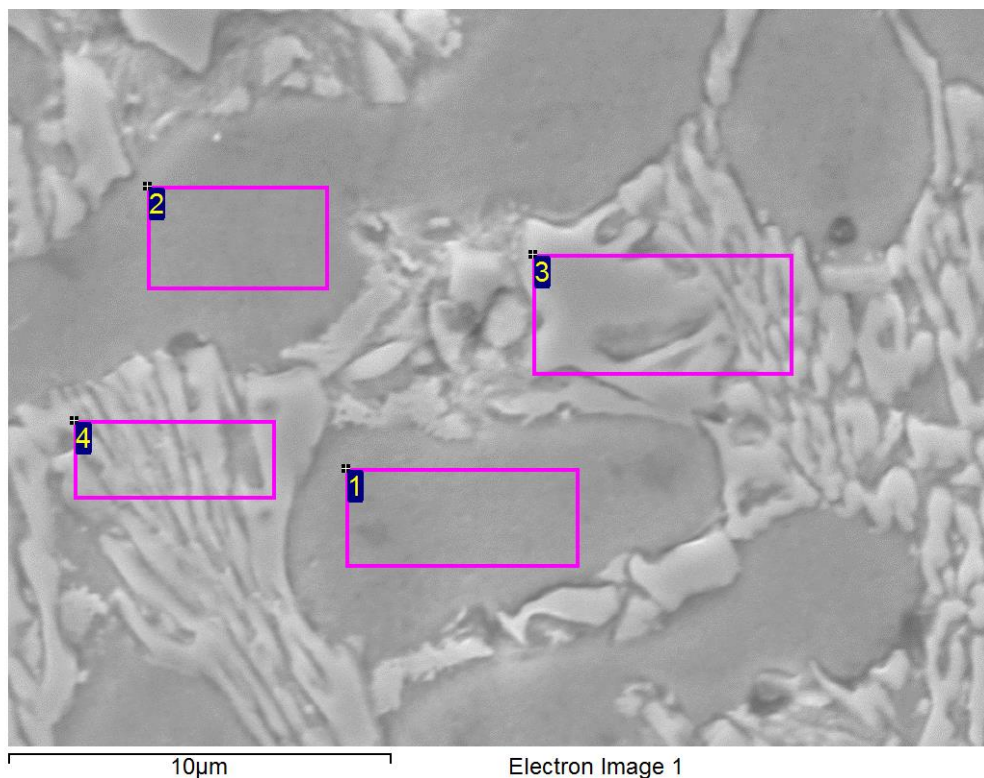


Figura 32 - Áreas para espectroscopia da condição com pré-aquecimento de 450°C.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 - Composição química, condição com pré-aquecimento de 450°C.

Spectrum	Si	Cr	Fe
1	1.41	9.99	88.60
2	1.35	10.17	88.48
3	0.73	24.93	74.34
4	0.82	23.81	75.37

Fonte: Autoria própria.

Analisando a composição química das amostras, observamos que os espectros apresentam composição similar. Os espectros 1 e 2 representam a matriz do metal de solda, com teor de Cromo de aproximadamente 10% diluído em sua composição. Já os espectros 3 e 4 correspondem à precipitação de carbonetos de Cromo por toda a matriz, com teor acima dos 22% nas duas condições. Através da imagem gerada no MEV, observa-se que os carbonetos de Cromo, mais claros e em relevo, não foram atacados pelo reagente químico utilizado.

5 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nos ensaios de riscamento, de composição química e de dureza, pode-se concluir:

- A maior energia do processo com pré-aquecimento promoveu uma maior diluição do revestimento, havendo assim uma maior influência do metal de base nas suas características.

- Na condição com pré-aquecimento a 450°C a dureza superficial obtida foi menor do que na condição sem pré-aquecimento e isso resultou numa menor resistência ao riscamento.

- O maior número de trincas presentes na condição sem pré-aquecimento não foi suficiente para que a resistência ao riscamento fosse menor do que da condição com pré-aquecimento, sendo assim a dureza a principal variável que influenciou neste ensaio.

- Ambas as condições apresentaram a mesma microestrutura: matriz com teor de Cromo de aproximadamente 10% diluído e precipitação uniforme de carbonetos com teor de Cromo de aproximadamente 22%.

- Comparando-se com os resultados obtidos por Ishi (2012) no abrasômetro tipo roda de borracha, obteve-se um resultado diferente para a resistência ao desgaste abrasivo. No abrasômetro tipo roda de borracha, como a área de ensaio é consideravelmente maior, as trincas e poros tiveram um papel fundamental nos resultados e a amostra com menor perda de massa foi a menos dura e que apresentou menos descontinuidades. Já nos ensaios de riscamento não houve esta influência e a amostra mais dura foi a que apresentou maior resistência ao desgaste abrasivo.

REFERÊNCIAS

- AGLAN, Heshmat A.; AHMED, Sudan; PRAYAKARAO, Kaushal R.; FATEH, Mahmood. **Effect of Preheating Temperature on the Mechanical and Fracture Properties of Welded Pearlitic Rail Steels**. Engineering, v 5, p 837-843, Nov 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). **Welding, Brazing and Soldering**. Metals Handbook, Volume 6, 1993.
- ASTM International. **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**. Designation: G40-01.
- ASTM International. **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Ruber Wheel Apparatus**. Designation: G65-04 (Reapproved 2010).
- ASTM International. **Standard Test Method for Scratch Hardness of Material Using a Diamond Syllus**. Designation: G171-03 (Reapproved 2009).
- AWS - American Welding Society. **Welding Handbook**. 8th edition, Volume 2: Flux Cored Arc Welding. AWS, p.158. 1991.
- BARBEDO, Nancy Del Lucca. **Avaliação Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW Utilizando Aço ASTM A-36 para Verificar a Solsabilidade, Propriedades Metalúrgicas e Geométricas, e Resistência Mecânica**. 2011. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.
- BOND, Danielle; BECKER, Sueli Fischer; D'OLIVEIRA, Ana Sofia C. M. **Influência da Corrente e Granulometria do Material de Adição nos Revestimentos Processados por PTA**. Soldagem & Inspeção, v 16 (1), p 053-061, Jan/Mar 2011.
- CASTRO, Américo Ferreira. **Resistência ao Desgaste Abrasivo das Sapatas de Trator de Esteira Após Processos de Recuperação**. 2010. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UTFPR, Curitiba, 2010.
- COLAÇO, Fernando Henrique Gruber. **Avaliação da Perda de Massa de Revestimento Duro Depositado por Soldagem com Arame Tubular de Liga FeCrC-Ti**. 2013. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UTFPR, Curitiba 2013.
- CHANG, Chia-Ming; CHEN, Yen-Chun; WU, Weite. **Microstructural and Abrasive Characteristics of High Carbon Fe-Cr-C Hardfacing Alloy**. Tribology International, v 43, p 929-934, Mai/Jun 2010.
- DAVIS, J. R. **Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance**. ASM International. USA, 2001.

ESAB. **Processos de Soldagem: Arames Tubulares**. 2014. Disponível em < http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_arames_tubulares.cfm >. Acesso em 13/10/2015.

GOMES, José Henrique de Freitas; COSTA, Sebastião Carlos; PAIVA, Anderson Paulo; BALESTRASSI, Pedro Paulo. **Otimização de Múltiplos Objetivos na Soldagem de Revestimento de Chapas de Aço Carbono ABNT 1020 Utilizando Arame Tubular Inoxidável Austenítico**. Soldagem & Inspeção, v 16 (3), p 232-242, Jul/Set 2011.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials**. London: Edward Arnold, 273p. 1992.

ISHI, Rafael Yuji. **Influência do Pré-Aquecimento na Perda de Massa de Revestimentos Duros Aplicados pelo Processo de Soldagem com Arame Tubular**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Mecânica – UTFPR, Curitiba, 2012.

LEECH, Patrick W.; LI, Xing S., ALAM, Nazmul. **Comparison of abrasive wear of a complex high alloy hardfacing deposit and WC-Ni based metal matrix composite**. Wear, v 294-295, p 380-386, 2012.

LIMA, Aldemi Coelho.; FERRARESI, Valtair Antonio; GONÇALVES, R. A. **Avaliação de Resistência ao Desgaste de Revestimentos Duros Aplicados com Arames Tubulares de Liga Ferro-Cromo-Carbono**. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Cusco, Perú, 2007.

LINDE CANADA. **Flux-Cored Arc Welding (FCAW)**. Disponível em < http://www.lindecanada.com/en/processes/welding/flux_cored_arc_welding/index.html >. Acesso em 13/10/2015

LINCOLN ELECTRIC. **Hardfacing Guide Product and Procedure Selection**. Disponível em < <http://www.lincolnelectric.com> >. Acesso em 13/10/2015.

MARQUES, Paulo Villani. **Tecnologia da Soldagem**. 352p. Ed. O Lutador. ESAB, Belo Horizonte, 1991.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte, 2006.

MOLOSSI, Anderson Takeo Tanioka; KAMEI, Marcelo Arana. **Análise da Resistência ao Riscamento a Quente do Revestimento Intermetálico Fe-Al**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Mecânica – UTFPR, Curitiba, 2014.

QUITES, A. M. **Introdução à Soldagem a Arco Voltaico**. Soldasoft. Florianópolis, 2002.

REINALDO, Paulo Ramos. **Influência dos Parâmetros de Processamento por PTA e do Substrato, na Resistência ao Desgaste de um Revestimento a Base de Ni.** 2008. 75p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

RODRIGUES, Lucilene de Oliveira. **Análise e Otimização de Parâmetros na Soldagem com Arame Tubular.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

RIBEIRO, Rubens. **Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Revestimentos Soldados do Tipo Fe-C-Cr Utilizados na Indústria Sucroalcooleira.** 2004. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

SANTOS, Ricardo Luiz Cardoso. **Deposição por Plasma de Arco Transferido Com Corrente Contínua Pulsada.** 2003. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFPR, Curitiba, 2003.

TYLCZAK, J. H.; ORENGON, A. **Abrasive wear.** In: ASM Handbook. Friction, Lubrication and Wear Technology, v 18, p 337-351, 1992.

UTP. **UTP Manual.** Nov/2010.

WANG, Xinhong; HAN, Fang; LIU, Xuemei; QU, Shiyao; ZOU, Zengda. **Microstructure and wear properties of the Fe-Ti-V-Mo-C hardfacing alloy.** Wear, v 265, p 583-589, 2008.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials.** Tribology Series, v 10, Elsevier, Science Publishers, Amsterdam. 560p. 1987.