

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

RAFAEL YUJI ISHI

**INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO NA PERDA DE MASSA DE
REVESTIMENTOS DUROS APLICADOS PELO PROCESSO DE SOLDAGEM COM
ARAME TUBULAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2012

RAFAEL YUJI ISHI

**INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO NA PERDA DE MASSA DE
REVESTIMENTOS DUROS APLICADOS PELO PROCESSO DE SOLDAGEM COM
ARAME TUBULAR**

Monografia do projeto de pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de conclusão de curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Ossimar Maranhão, Dr.
Eng.

CURITIBA

2012

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO NA PERDA DE MASSA DE REVESTIMENTOS DUROS APLICADOS PELO PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR", realizado pelo aluno(s) Rafael Yuji Ishi, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Ossimar Maranhão, Dr. Eng.
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr. Eng.
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Aldo Santos Pereira, Msc. Eng.
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 24 de Outubro de 2012

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pela paciência, investimento, esforço e sacrifícios ao longo da vida para me proporcionar a oportunidade de realizar um curso de graduação.

Ao meu orientador, o Professor Ossimar Maranhão pela paciência, orientação, ensinamentos, discussões e pela confiança depositada em mim durante a execução do trabalho de conclusão de curso.

À instituição UTFPR pelos recursos disponibilizados: laboratórios, materiais e bolsistas que me auxiliaram durante a execução do projeto.

RESUMO

Ishi, Rafael Yuji. **Influência do pré-aquecimento na perda de massa de revestimentos duros aplicados pelo processo de soldagem com arame tubular.** 2012. Monografia (Engenharia Industrial Mecânica) – Bacharel em engenharia industrial mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

A deposição de revestimentos duros é utilizada em superfícies de peças que sofrem com o desgaste por abrasão. Estes materiais apresentam característica de excelente resistência ao desgaste e garantem menores gastos com reposições e manutenção corretiva, pois estes materiais garantem maior vida útil às peças que sofrem com o desgaste abrasivo. Materiais como ferros com altos teores de cromo vêm se mostrando muito eficazes em aplicações de desgaste. No entanto, para a deposição destes é necessária a aplicação de um tratamento térmico, como um pré-aquecimento, com o objetivo de se reduzir a velocidade de resfriamento, diminuindo as tensões resultantes das contrações térmicas durante a solidificação, dessa forma, reduzindo as tensões de contração e evitando a ocorrência de trincas. No presente trabalho, os arames para revestimento duro serão depositados em um metal de base de aço carbono ABNT 1045 pelo processo de soldagem com arame tubular. Primeiramente, serão soldadas amostras sem o pré-aquecimento e, posteriormente, com pré-aquecimentos a temperatura de 350°C e 450°C . Serão realizados ensaios para a qualificação e quantificação de defeitos superficiais como trincas e porosidade, medição da dureza, observação da microestrutura obtida e realização do ensaio de desgaste abrasivo de roda de borracha. Por fim, serão coletados e analisados os resultados desses ensaios e a partir desses dados poderá ser correlacionado o efeito do pré-aquecimento na presença de trincas e porosidade, na dureza e na perda de massa deste material. Além disso, poderão ser comparados os resultados obtidos na pesquisa com os encontrados em literatura e artigos científicos.

Palavras-chave: Soldagem com arame tubular, revestimentos duros, resistência ao desgaste abrasivo, porosidade, trincas.

ABSTRACT

Ishi, Rafael Yuji. **Influência do pré-aquecimento na perda de massa de revestimentos duros aplicados pelo processo de soldagem com arame tubular.** 2012. Monografia (Engenharia Industrial Mecânica) – Bacharel em engenharia industrial mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Hardfacing applications are largely used on parts that suffer from abrasions wear. Those materials have a high wear resistance characteristic that guarantee lower reposition and maintenance costs. They also assure a longer service life due to their great abrasion resistance. Materials such as high-chrome (FeCrC) content are showing great efficiency on those applications. One characteristic of those Hardfacing alloys is that usually they need a heat treatment, such as a preheating is required. The main objective of preheating is to reduce the cooling rate and reduce the thermal contractions caused by the rapid cooling. Moreover lower contraction stress is promoted and the formation of cracks is avoided. In this research high-chrome hardfacing alloys were deposited on an ABNT 1045 Steel by the fluxed core arc welding process. First, the hardfacing alloys were deposited without a preheating, then they were deposited with a preheat temperature of 350°C and with 450°C. Analysis of the welding surface such as the qualification and quantification of cracks and porosity, surface hardness and mass loss on the rubber wheel abrasion test were performed. At last the results will be collect and analyzed so that the preheating effect on the Hardfacing deposits can be related to the hardness, porosity and cracks and mass loss. The results from this research were also compared with the literature and other scientific article.

Key words: Fluxed cored arc welding (FCAW), hardfacing alloys, mass loss, porosity, cracks

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - ESQUEMA DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG (METAL INERT GAS)	18
FIGURA 2 - TOCHA DE SOLDAGEM DO PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAMES TUBULARES	18
FIGURA 3 - CICLO TÉRMICO PARA DIFERENTES ENERGIAS DE SOLDAGEM A TEMPERATURA AMBIENTE.	21
FIGURA 4 - CURVAS DE CICLO TÉRMICO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE PRÉ-AQUECIMENTO.	23
FIGURA 5 - DIAGRAMA TTT PARA UM AÇO EUTETÓIDE	24
FIGURA 6 - CLASSIFICAÇÃO DO DESGASTE PROPOSTA POR BUDINSKI (1998)	26
FIGURA 7 - SITUAÇÕES DO DESGASTE ABRASIVO. (A) ABRASÃO A DOIS CORPOS E (B) ABRASÃO A TRÊS CORPOS. FONTE: HUTCHINGS, 1992.....	27
FIGURA 8 - CLASSIFICAÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO PROPOSTA POR DAVIS (2001).....	28
FIGURA 9 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS QUATRO TIPOS DE DESGASTE ABRASIVO: (A) ABRASÃO A BAIXA TENSÃO, (B) ABRASÃO A ALTA TENSÃO, (C) ABRASÃO POR ARRANQUE E (D) POLIMENTO FONTE: DAVIS, 2001.....	29
FIGURA 10 - MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO: (A) E (B) MICROSULCAMENTO (C) MICROCORTE E (D) MICROTRINCAMENTO FONTE: ZUM GAHR, 1998	30
FIGURA 11 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FUNCIONAMENTO DO ABRASÔMETRO RODA DE BORRACHA FONTE: CARMONA, 2011	31
FIGURA 12- RESULTADOS PARA: (A) DUREZA E (B) PERDA DE MATERIAL PARA OS MATERIAIS COM: (A) BAIXO, (B) MÉDIO E (C) ALTO TEOR DE C.....	36
FIGURA 13 - MICROESTRUTURAS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM FCAW A E FCAW B OBTIDOS POR CORONADO ET. AL. (2009).....	38
FIGURA 14 - PERDA DE MASSA RELACIONADA AO PROCESSO DE SOLDAGEM	38
FIGURA 15 - SUPERFÍCIE DA AMOSTRA DE UM CORDÃO DE FECRC	39
FIGURA 16 – POROSIDADE (A) DISTRIBUÍDA, (B) AGRUPADO E (C) EM LINHA.	40
FIGURA 17 - SUPERFÍCIE DESGASTADA NO EXPERIMENTO DE BUCHANAN ET. AL. (2007)	41
FIGURA 18 - SUPERFÍCIE DESGASTADA DE REVESTIMENTO DURO COM FECRC + NB	41
FIGURA 19 - EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR UTILIZADO PARA OS ENSAIOS.....	44
FIGURA 20 - APLICAÇÃO DO PRÉ-AQUECIMENTO COM TOCHA.....	48
FIGURA 21 - MEDIÇÃO DA TEMPERATURA PARA INÍCIO DA SOLDAGEM	49
FIGURA 22 - GABARITO UTILIZADO PARA FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS	50
FIGURA 23 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DOS CORTES REALIZADOS NA AMOSTRA SOLDADA.....	52
FIGURA 24 - ABRASÔMETRO DE RODA DE BORRACHA UTILIZADO PARA OS ENSAIOS	55
FIGURA 25 - EQUIPAMENTO DE LIMPEZA POR ULTRASOM.....	56
FIGURA 26 - BALANÇA UTILIZADA PARA MEDIÇÃO DA MASSA DOS CORPOS DE PROVA	57

FIGURA 27 - PONTOS ONDE A DUREZA FOI AVALIADA.....	58
FIGURA 28 – CORPO DE PROVA SEM PRÉ-AQUECIMENTO.....	60
FIGURA 29 – CORPO DE PROVA COM PRÉ-AQUECIMENTO A 350°C.....	61
FIGURA 30 – CORPO DE PROVA COM PRÉ-AQUECIMENTO A 450°C.....	61
FIGURA 31 - QUANTIDADE DE POROSIDADE.....	63
FIGURA 32 – IMAGEM EM CAMPO ESCURO DAS AMOSTRAS: (A) SEM PRÉ-AQUECIMENTO, (B) PRÉ-AQUECIMENTO A 350°C E (C) PRÉ-AQUECIMENTO A 450°C.....	63
FIGURA 33- DUREZA MÉDIA OBTIDA.....	64
FIGURA 34 – GRÁFICO DE BARRAS COM A REPRESENTAÇÃO DA PERDA DE MASSA.....	65
FIGURA 35 – CORTE NA SUPERFÍCIE DO CORPO DE PROVA S3 SEM PRÉ-AQUECIMENTO APÓS DESGASTE NO ABRASÔMETRO. (A) IMAGEM EM CAMPO ESCURO. (B) IMAGEM NO MICROSCÓPIO COM AUMENTO DE 200 VEZES.....	67
FIGURA 36 – CORTE NA SUPERFÍCIE DO CORPO DE PROVA T1 PRÉ-AQUECIDA A 350°C APÓS DESGASTE NO ABRASÔMETRO. (A) IMAGEM EM CAMPO ESCURO. (B) IMAGEM OBTIDA NO MICROSCÓPIO COM AUMENTO DE 200 VEZES.....	68
FIGURA 37 - CORTE NA SUPERFÍCIE DO CORPO DE PROVA U1 PRÉ-AQUECIDA A 450°C APÓS DESGASTE NO ABRASÔMETRO. (A) IMAGEM EM CAMPO ESCURO. (B) IMAGEM OBTIDA NO MICROSCÓPIO COM AUMENTO DE 200 VEZES.....	69
FIGURA 38 – DETALHE DO DESPRENDIMENTO DE PEDAÇOS DO CORPO DE PROVA DA AMOSTRA S1 SEM PRÉ-AQUECIMENTO. (A) IMAGEM EM CAMPO ESCURO. (B) DETALHE DO PORO E (C) DETALHE DA TRINCA.....	71

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RESULTADOS OBTIDOS POR CORONADO ET. AL. (2009)	37
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO DA CHAPA A SER SOLDADA SEGUNDO SAE-AISI	42
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ARAME ELETRODO UTP AF LEDURIT 60	43
TABELA 4- PARÂMETROS DE SOLDAGEM UTILIZADOS PARA OS ENSAIOS	45
TABELA 5 - TEMPERATURAS DE INÍCIO DE FORMAÇÃO DE MARTENSITA OBTIDAS PELAS EQUAÇÕES PROPOSTAS POR ANDREWS (1965) E SVERDLING E NESS (1997).....	46
TABELA 6 - NOMENCLATURA DOS EXPERIMENTOS DE ACORDO COM A VARIÁVEL DE SOLDAGEM UTILIZADA....	47
TABELA 7 - ANÁLISE QUALITATIVA DA PRESENÇA DE TRINCAS E POROSIDADE SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS	62
TABELA 8 - RELAÇÃO PRESENÇA DE TRINCAS, QUANTIDADE DE POROSIDADE, DUREZA E PERDA DE MASSA OBTIDAS APÓS ENSAIO DE ABRASÃO RODA DE BORRACHA	70

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Tema	13
1.2 Caracterização do problema	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo principal	14
1.3.2 Objetivos secundários	14
1.4 Justificativa	14
1.5 Etapas do trabalho	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Processo de soldagem a arco com arame tubular	17
2.2 Energia de soldagem	20
2.2.1 Energia de soldagem	20
2.2.2 Pré-aquecimento	21
2.2.3 Temperatura de início de formação de martensita	23
2.3 Desgaste	25
2.3.1 Tipos de desgaste	25
2.3.2 Desgaste Abrasivo	26
2.3.3 Mecanismos de desgaste abrasivo	29
2.3.4 Avaliação do desgaste à abrasão	30
2.4 Revestimentos duros	32
2.4.1 Revestimentos duros com ferros com alto teor de cromo	33
2.4.2 Revestimentos duros soldados pelo processo de soldagem com arame tubular	34
2.4.3 Influência da dureza no desgaste abrasivo	34
2.4.4 Influência das trincas no desgaste abrasivo	36
2.4.5 Influência da porosidade no desgaste abrasivo	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 Materiais	42

	11
3.1.1 Material do substrato	42
3.1.2 Material do arame eletrodo	43
3.2 Equipamento	43
3.2.1 Equipamento de soldagem com arame tubular	43
3.3 Metodologia	44
3.3.1 Parâmetros adotados na soldagem	44
3.3.2 Determinação das temperaturas de pré-aquecimento	45
3.3.3 Nomenclatura dos corpos de prova	46
3.3.4 Propriedades Avaliadas	47
3.3.5 Preparação dos corpos de prova	47
3.3.6 Aplicação do pré-aquecimento	48
3.3.7 Execução do revestimento	49
3.3.8 Confecção dos corpos de prova para ensaio de desgaste	51
3.4 Ensaio realizados	52
3.4.1 Ensaio por Líquido penetrante	52
3.4.2 Quantificação da porosidade	53
3.4.3 Ensaio de desgaste em roda de borracha	54
3.4.4 Ensaio de dureza	58
3.4.5 Análise do mecanismo de desgaste	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1 Ensaio por líquido penetrante	60
4.2 Porosidade	62
4.3 Dureza	64
4.4 Perda de massa	65
4.5 Mecanismo de desgaste	66
5 CONCLUSÕES	72
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
APÊNDICE A – TABELA QUANTITATIVA DA POROSIDADE	77

APÊNCICE B – TABELAS QUANTITATIVAS DE DUREZA	78
APÊNDICE C – TABELA QUANTITATIVA DA PERDA DE MASSA	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

O tema do projeto de pesquisa é avaliar a influência do pré-aquecimento na perda de massa de revestimentos duros aplicados pelo processo de soldagem com arame tubular. O objeto de estudo é avaliar os efeitos do pré-aquecimento na perda de massa, dureza e características do revestimento duro.

O estudo está inserido dentro de duas áreas do curso de engenharia mecânica: na Tecnologia dos Materiais ao se realizar os ensaios de desgaste, dureza e análise dos mecanismos de desgaste obtidos após os ensaios e Processos de Fabricação ao realizar a soldagem e confecção dos corpos de prova.

1.2 Caracterização do problema

Na indústria mecânica, componentes estruturais e peças estão sujeitas a processos de desgaste superficial ou abrasão. Estes processos de desgaste geram gastos significativos com manutenção além dos custos com reposição de peças. No Brasil, os revestimentos duros são bastante utilizados no setor sucroalcooleiro, na manutenção de equipamentos de extração e processamento da cana de açúcar. (LIMA e FERRARESI, 2009)

Para se estender a vida útil desses equipamentos, podem-se realizar tratamentos superficiais ou ainda depositar películas de revestimentos a fim de gerar uma superfície com característica de elevada resistência ao desgaste abrasivo. (MODENESI *et. al.*, 2006)

Os materiais mais empregados para estas aplicações são: ligas de ferro com alto teor de cromo (Fe-Cr-C), ligas com elementos formadores de carbonetos, como titânio, tungstênio e vanádio. Estes materiais vêm apresentando bons resultados na resistência ao desgaste abrasivo, no entanto, alguns pesquisadores como Coronado *et. al.*(2009) constataram que a presença de trincas em revestimentos duros com FeCrC pode vir a piorar o desempenho destes materiais. Variando-se a temperatura

de pré-aquecimento, é possível avaliar os efeitos que causa nas propriedades mecânicas do material depositado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é determinar o efeito do pré-aquecimento na perda de massa de revestimentos duros com alto teor de cromo aplicados pelo processo de soldagem com arame tubular.

1.3.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste projeto são determinar o efeito do pré-aquecimento:

- 1 Na formação de trincas;
- 2 Na porosidade dos revestimentos;
- 3 Na dureza dos revestimentos.

1.4 Justificativa

Kirchgaßner *et al* (2008) afirma que para se aumentar com eficiência a vida útil de equipamentos que sofram com desgaste abrasivo, é necessária a utilização de materiais com boa resistência ao desgaste. A aplicação de revestimentos duros pode vir a garantir uma maior vida útil em serviço de componentes solicitados pelo desgaste abrasivo, além de reduzir as pausas para manutenção. É interessante observar que o desgaste abrasivo ocorre somente na superfície do material, isso possibilitaria a utilização de metais de base mais baratos, e dessa forma reduzir-se-iam os custos com fabricação. (LIMA e FERRARESI, 2009)

Em estudo de Lima e Ferraresi (2009) foram aplicados eletrodos autoprotégidos de FeCrC e FeCrCNb e FeCrCTiMo pelo processo FCAW. Lima e Ferraresi (2009) concluíram que existe uma correlação entre a dureza e a resistência ao desgaste abrasivo, normalmente quanto maior for a dureza, maior será a

resistência ao desgaste. Entretanto, Lima e Ferraresi (2009) apontam que a presença de defeitos de formação no material como trincas superficiais podem causar resultados diferentes.

Lima e Ferraresi (2009) afirmam que nesses casos materiais mais duros podem apresentar piores resultados na resistência à abrasão, pois há o desprendimento de material causado pela fratura frágil durante o mecanismo de abrasão, resultando numa pior resistência ao desgaste.

A elaboração e execução deste projeto envolvem diferentes áreas de conhecimento estudadas durante o curso de Engenharia Industrial Mecânica tornando o desenvolvimento deste interessante e desafiador para o aluno.

Portanto, a realização deste projeto de pesquisa é justificável tecnicamente, tendo como base os estudos científicos já realizados e financeiramente, pois poderá causar reduções nos custos com manutenção de peças desgastadas.

1.5 Etapas do trabalho

A seguir é apresentada a estrutura do presente trabalho dividido em cinco capítulos.

No capítulo dois “Fundamentação teórica” foi realizada uma revisão bibliográfica com os termos e conceitos mais importantes para a realização e embasamento teórico do projeto. Dentre estes temas estão: o processo de soldagem com arame tubular, os mecanismos mais comuns de desgaste abrasivo, uma revisão sobre os revestimentos duros e suas características e alguns parâmetros operacionais como, por exemplo, a energia de soldagem e o pré-aquecimento.

No capítulo três “Materiais e Métodos” serão documentados os procedimentos, equipamentos e os consumíveis utilizados durante o projeto, ou seja, cada etapa realizada será detalhada. Iniciando-se com a seleção dos materiais utilizados, parâmetros de soldagem escolhidos e determinação das variáveis de soldagem envolvidas. Além disto, será descrito toda a metodologia empregada para a

realização deste projeto, desde a nomenclatura e preparação dos corpos de prova até os ensaios realizados.

No capítulo quatro “Resultados e Discussões” serão apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de líquido penetrante, medição da quantidade de porosidade presente nos corpos de prova, ensaios de dureza e análise da quantidade de perda de massa obtida e mecanismo de desgaste presente no ensaio de desgaste com roda de borracha.

No capítulo cinco “Conclusões” será o desfecho do trabalho, com as comparações do que foi proposto com os resultados obtidos. Além disso, serão feitas comparações do que foi feito com o que outros autores realizaram.

Por fim, no capítulo seis “Sugestões para trabalhos futuros” serão feitas sugestões e recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo do trabalho, alguns temas de grande importância serão detalhados, para facilitar o entendimento do processo de soldagem aplicado na deposição do revestimento duro e no embasamento teórico para análise dos resultados. Este capítulo tem ainda como objetivo esclarecer alguns termos para que a metodologia utilizada seja compreendida na execução deste trabalho.

2.1 Processo de soldagem a arco com arame tubular

O processo de soldagem a arco com arame tubular (FCAW – *Flux Cored Arc Welding*) é um processo de soldagem por fusão, no qual o arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo metálico tubular, contínuo e consumível e um metal de base. (MARQUES, 2002)

O equipamento básico para a soldagem com arames tubulares é semelhante ao aparelho de soldagem MIG (*Metal Inert Gas*), representado na Figura 1. O equipamento consiste basicamente de uma fonte de soldagem, um alimentador de arame e a tocha de soldagem. Conforme mostrado pela Figura 1, há a possibilidade da utilização de um cilindro de gás protetor, opcional, dependendo das características do arame eletrodo a ser utilizado. Devido à elevada quantidade de fumos produzidos, característica do processo de soldagem com arame tubular, deve-se considerar em alguns casos a utilização de um equipamento de remoção de fumo. (ASM HANDBOOK, 1993)

A principal diferença entre os processos de soldagem MIG e a soldagem com arame tubular está no arame eletrodo utilizado. Na soldagem com arames tubulares, os arames possuem um fluxo de soldagem enquanto que no processo de soldagem MIG, não. A tocha de soldagem característica do processo com arame tubular é demonstrada na Figura 2. A presença do gás de proteção depende do fluxo contido no arame eletrodo utilizado. (MARQUES, 2002)

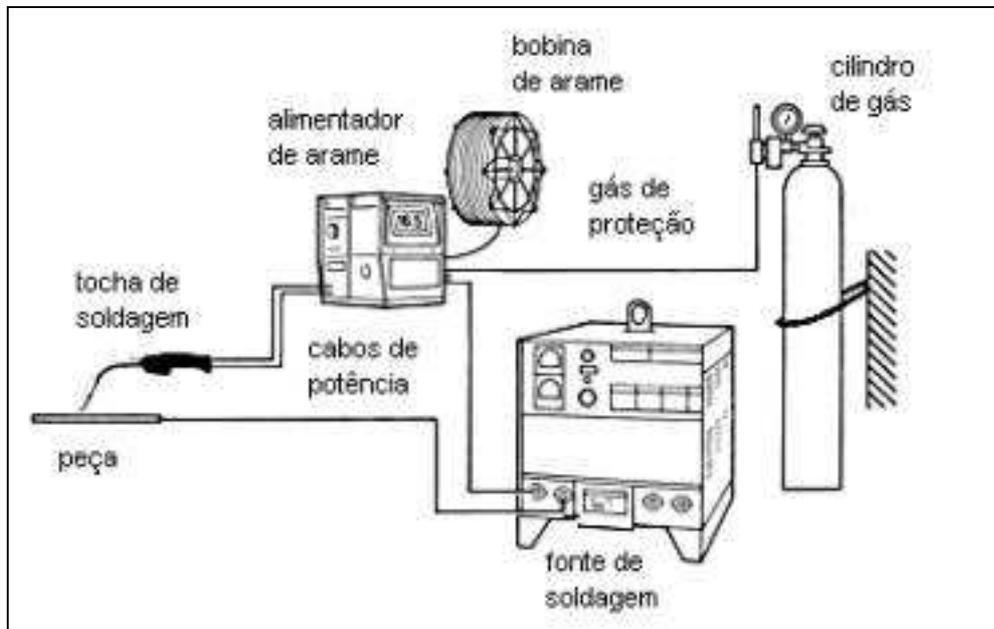


Figura 1 - Esquema do processo de soldagem MIG (Metal Inert Gas)
 Fonte: Marques, 2002.

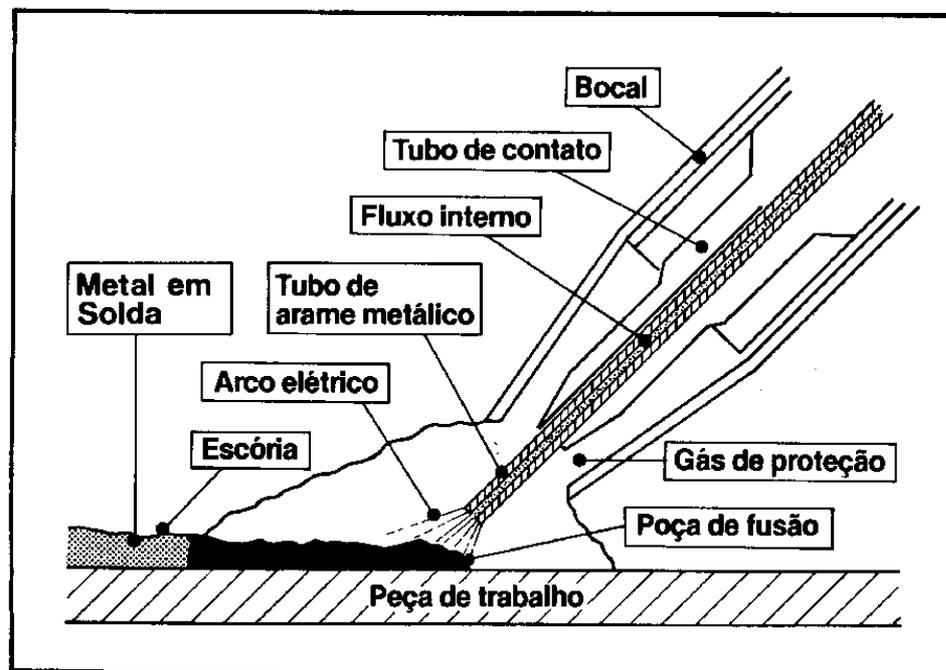


Figura 2 - Tocha de soldagem do processo de soldagem com arames tubulares
 Fonte: Marques, 2002.

Existem duas variações do processo de soldagem a arco com arame tubular, uma delas é a soldagem sem a necessidade de utilizar-se o gás de proteção, nesse caso a soldagem é denominada auto-protegida. Os elementos contidos no fluxo de soldagem realizam a função de isolar o cordão de solda evitando a oxidação. A outra variação do processo é aquela em que além do fluxo de soldagem é necessária a proteção do arco com a alimentação de um gás inerte de proteção, nesses casos a soldagem é denominada com proteção gasosa. (MARQUES, 2002)

O que caracteriza este processo é a proteção do arco durante a soldagem que é realizada através de um fluxo contido no núcleo do eletrodo ou através um gás de proteção. Os ingredientes do fluxo presentes nestes arames geralmente são: formadores de escória, desoxidantes, estabilizadores do arco e elementos de liga. Este fluxo desempenha diversas funções, sendo as mais importantes: estabilizar o arco, proteger a superfície da solda contra a formação de óxidos e ajustar a composição da solda. Dessa forma, conhecendo a quantidade dos elementos presentes no fluxo, pode-se caracterizar o arame eletrodo. (ASM HANDBOOK, 1993)

Neste processo de soldagem o arame é alimentado continuamente e não há a necessidade de se trocar o arame eletrodo, como no processo de soldagem com eletrodos revestidos, por isso ele é considerado de elevada produtividade. Nos casos em que o arame utilizado no processo é auto-protegido possibilita certa mobilidade para reparo em campo, pois não há a necessidade da utilização de um cilindro gás de proteção. (MODENESI *et. al.*, 2006)

As características das soldas obtidas por este processo são: boa qualidade e boa aparência, uma produção a um custo de operação relativamente baixo e é um processo que requer menos habilidade do operador. Apesar destas vantagens, o equipamento para soldagem é relativamente caro e é necessário realizar a limpeza do cordão após cada passe de solda, o que torna o processo um pouco mais lento. (MODENESI *et. al.*, 2006)

2.2 Energia de soldagem

Num processo de soldagem, diversas variáveis envolvidas na sua execução podem afetar o fluxo de calor na peça e mudar algumas de suas características e propriedades importantes. A energia de soldagem e a aplicação de um pré-aquecimento estão entre os parâmetros de maior importância metalúrgica.

2.2.1 Energia de soldagem

Nos processos de soldagem, há necessidade da geração de grande quantidade de energia na forma de calor para que ocorra a fusão e solidificação das partes a serem soldadas. Esta transferência de calor causa alterações de temperatura nas partes envolvidas, gerando elevados gradientes de temperatura na poça de fusão e em regiões adjacentes. Em termos práticos, é muito difícil medir a intensidade de uma fonte de calor, por isso geralmente o parâmetro mais utilizado para medição é a energia de soldagem, ou aporte térmico, que correlaciona diretamente as variáveis da fonte de soldagem. (MODENESI *et. al.*, 2006)

A energia de soldagem é a quantidade de energia gerada pela fonte de calor, por unidade de comprimento da junta, e é comumente representada em kJ/mm, podendo ser expressa também em kJ/cm ou J/mm. É representada usualmente pelas letras “H” ou “E”. Para a soldagem a arco elétrico, sua fórmula está representada pela Equação 1. (ASM HANDBOOK, 1993)

$$E = \eta \cdot \frac{V \cdot I}{v} \quad \text{Equação 1}$$

Onde, η é a eficiência de transferência; V é a tensão em Volts [V]; I é a corrente elétrica em Ampéres [A]; e v é a velocidade linear de soldagem [mm/s].

A energia de soldagem e a velocidade de resfriamento são correlacionadas pelo ciclo térmico de soldagem, como ilustrado na Figura 3. A velocidade de resfriamento é obtida através da inclinação da curva de ciclo térmico nesta temperatura. Para maiores valores da energia de soldagem, são obtidos menores valores para a taxa de resfriamento, conforme observado pelas curvas de ciclo térmico. (MODENESI *et. al.*, 2006)

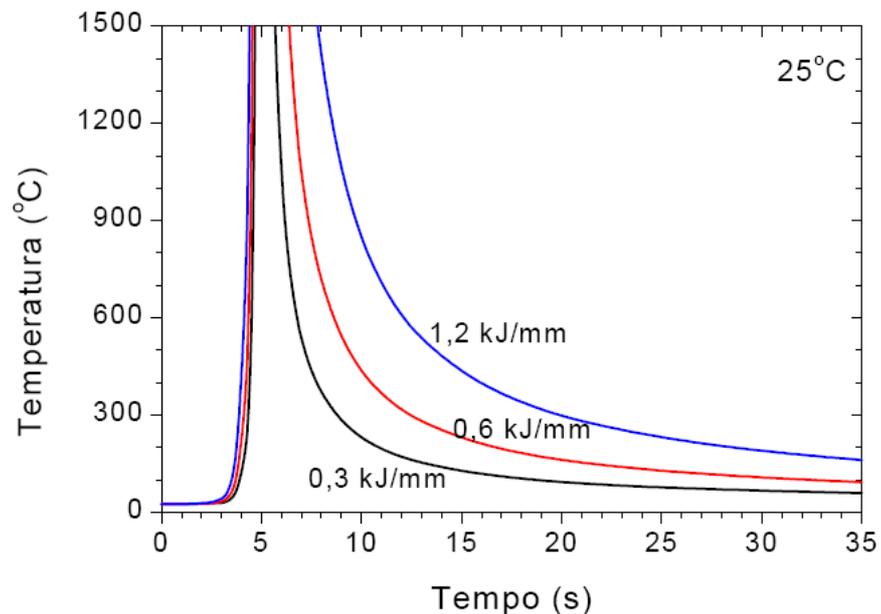


Figura 3 - Ciclo térmico para diferentes energias de soldagem a temperatura ambiente.
 Fonte: Modenesi *et. al.*, 2006.

2.2.2 Pré-aquecimento

O pré-aquecimento é necessário para prevenir a formação de martensita na região afetada pelo calor, reduzir possíveis tensões residuais devido às contrações termoplásticas durante o resfriamento do cordão de solda e promover um resfriamento mais lento da peça. (MODENESI *et. al.*, 2006)

O pré-aquecimento causa uma diminuição na velocidade de resfriamento. Conforme mostrado nas curvas TTT, uma diminuição na taxa de resfriamento dificulta ou até mesmo impossibilita a formação de martensita. Ao se aplicar um tratamento térmico de pré-aquecimento é obtida uma microestrutura menos frágil, menos dura e menos suscetível à formação de trincas. (CALLISTER, 2002)

Materiais com elevados percentuais de carbono ou alto percentual de elementos de liga possuem um carbono equivalente elevado, conforme mostrado pela Equação 2, segundo o IIW (*International Institute of Welding*). Materiais com carbono equivalente maior que 0,6% em peso são considerados altamente temperáveis e a sua soldagem requer alguns cuidados. Nestes casos, a aplicação de

tratamentos térmicos de pré ou pós-soldagem são recomendadas para evitar a formação de trincas.

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%P}{3} \quad \text{Equação 2}$$

O pré-aquecimento é usado para promover um resfriamento mais lento da peça, prevenindo o excesso de dureza e baixa ductilidade da zona afetada pelo calor. Além disso, este procedimento garante que haja tempo suficiente para a difusão dos átomos de H₂, e diminua a quantidade de porosidade. (ASM HANDBOOK, 1993)

A temperatura de pré-aquecimento é definida como a temperatura na qual a peça é colocada antes de iniciar o processo de soldagem. É importante que haja uma homogeneidade no calor aplicado à peça durante a soldagem, ou seja, é necessário garantir que toda a peça esteja aquecida à mesma temperatura. (MODENESI *et. al.*, 2006)

Uma grande quantidade de fatores é necessária na escolha da temperatura de pré-aquecimento. Dentre os principais estão fatores químicos como a composição do metal de base; fatores de origem geométrica como a espessura, a restrição e a rigidez dos membros a serem soldados; e também a quantidade de calor adicionado ao processo. (ASM HANDBOOK, 1993)

O efeito do pré-aquecimento nos processos de soldagem é semelhante ao da energia de soldagem. A Figura 4 ilustra o ciclo térmico no centro do cordão de solda para diferentes temperaturas de pré-aquecimento. Observa-se que o efeito de uma maior temperatura de pré-aquecimento e uma maior energia nominal de soldagem são quase semelhantes. (MODENESI *et. al.*, 2006)

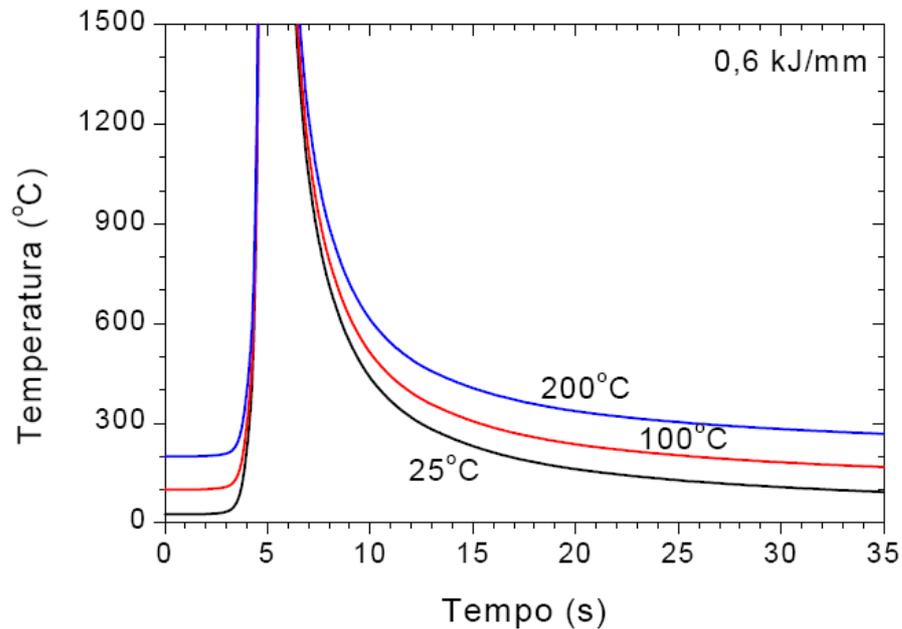


Figura 4 - Curvas de ciclo térmico para diferentes temperaturas de pré-aquecimento.
 Fonte: Modenesi *et. al.*, 2006.

Métodos e tabelas em catálogos de fabricantes foram criados para diminuir a chance de defeitos de formação durante a soldagem e facilitar a vida dos consumidores. No entanto, estes métodos com indicações e recomendações não são para todos os materiais. Para aços com médio teor de carbono, recomenda-se aplicar um pré-aquecimento e manter a temperatura nos interfases acima da temperatura de início de formação de martensita, evitando-se assim a formação desta microestrutura. (ASM HANDBOOK, 1993)

2.2.3 Temperatura de início de formação de martensita

A velocidade de resfriamento nos processos de fabricação é de fundamental importância para a determinação da microestrutura a ser formada e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas do material. As curvas TTT (Transformação–Tempo-Temperatura) relacionam a temperatura e o tempo necessário para o resfriamento contínuo ou a temperatura constante.

Nesse diagrama é possível observar famílias de curvas que indicam o percentual de determinada transformação ao longo do tempo, como mostrado na

Figura 5. Dessa forma é possível determinar, a partir de uma velocidade de resfriamento conhecida, qual microestrutura será formada. (CALLISTER, 2002)

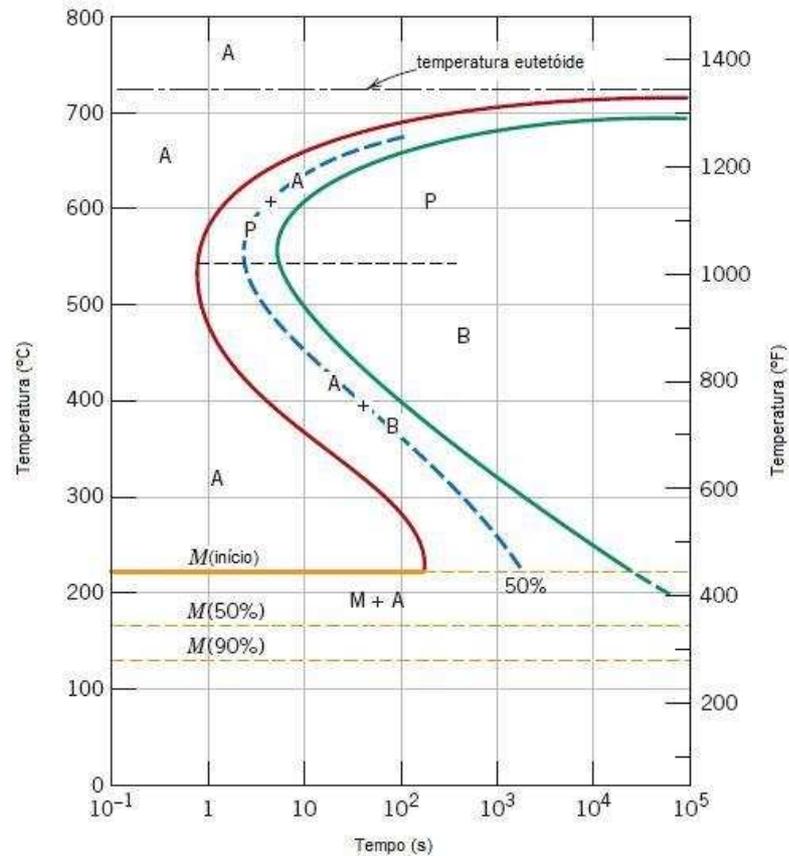


Figura 5 - Diagrama TTT para um aço eutetóide

Fonte: Adaptado de Callister, 2007.

Quanto maior for o percentual de carbono do aço mais para a direita a curva de início de formação de perlita estará deslocada. Todos os elementos de liga com exceção do Cobalto deslocam as curvas de início e fim de transformação de fase do diagrama TTT para a direita. Estes elementos se dissolvem na austenita a altas temperaturas e no resfriamento podem formar carbonetos ou se dissolverem na ferrita. Estas reações levam certo tempo para se iniciar e se completar e por isso causam um retardamento nas transformações, deslocando as curvas de início e fim de transformação para a direita. (CHIAVERINNI, 2008)

A determinação da temperatura de início de formação da martensita se torna importante, pois esta microestrutura é mais susceptível à formação de trincas. Estas

podem ocasionar maiores perdas de massa nos materiais. Para evitar maiores perdas de massa, as trincas devem ser evitadas. (TOTTEN, 2006)

Diversos estudos e formulações empíricas são encontrados para a formulação de uma equação para o início de transformação da martensita em aços carbono. Dentre estas estão, a equação 3, proposta por Sverdlin e Ness (1997), e a equação 4, proposta por Andrews (1965), que é válida para aços liga baixa com teores menores que 0,6%C; 4,99%Mn; 5,0%Cr; 5%Ni e 5,4%Mo.

$$M_s(^{\circ}C) = 520 - 320C - 50Mn - 30Cr - 20[Ni + Mo] - 5[Cu + Si] \quad \text{Equação 3}$$

$$M_s(^{\circ}C) = 539 - 423C - 30,4Mn - 17,7Ni - 12,1Cr - 11,0Si - 7,0Mo \quad \text{Equação 4}$$

2.3 Desgaste

O desgaste pode ser definido como um dano a uma superfície sólida causada pela remoção ou deslocamento de material através de um mecanismo de ação por contato sólido, líquido ou gasoso.

2.3.1 Tipos de desgaste

O desgaste pode ser classificado de diversas formas. Uma delas é em função da aparência, como, lascamento, polimento, entre outros. Outra classificação é em termos do mecanismo físico de remoção de material, por exemplo, adesão, abrasão e erosão. E ainda pode ser classificado em termos das condições em que ocorre o desgaste, como desgaste sob lubrificação, desgaste sem lubrificação ou deslizamento metal a metal. (DAVIS, 2001)

Budinski (1998) propõe uma classificação de acordo com o mecanismo físico de remoção de material, dividido em quatro subcategorias: Abrasão, Erosão, Adesão e Fadiga da Superfície, como ilustrado pelo organograma da Figura 6. Davis (2001) concorda com esta classificação, mas descreve que existe uma grande dificuldade em se distinguir os mecanismos, pois muitas vezes estes atuam simultaneamente.

No desgaste a abrasão, há a necessidade de partículas duras agindo sobre uma superfície menos dura. Na erosão, há a ação de fluídos sobre a superfície. Na

adesão, ocorre a interação entre superfícies conformadas. E no desgaste por fadiga da superfície são aplicados esforços repetitivos de tensão compressiva. (DAVIS, 2001)

Como o objetivo principal do trabalho é determinar o efeito do pré-aquecimento na perda de massa de revestimentos duros, através de um ensaio de desgaste abrasivo, apenas o mecanismo de desgaste abrasivo será apresentado mais detalhadamente.

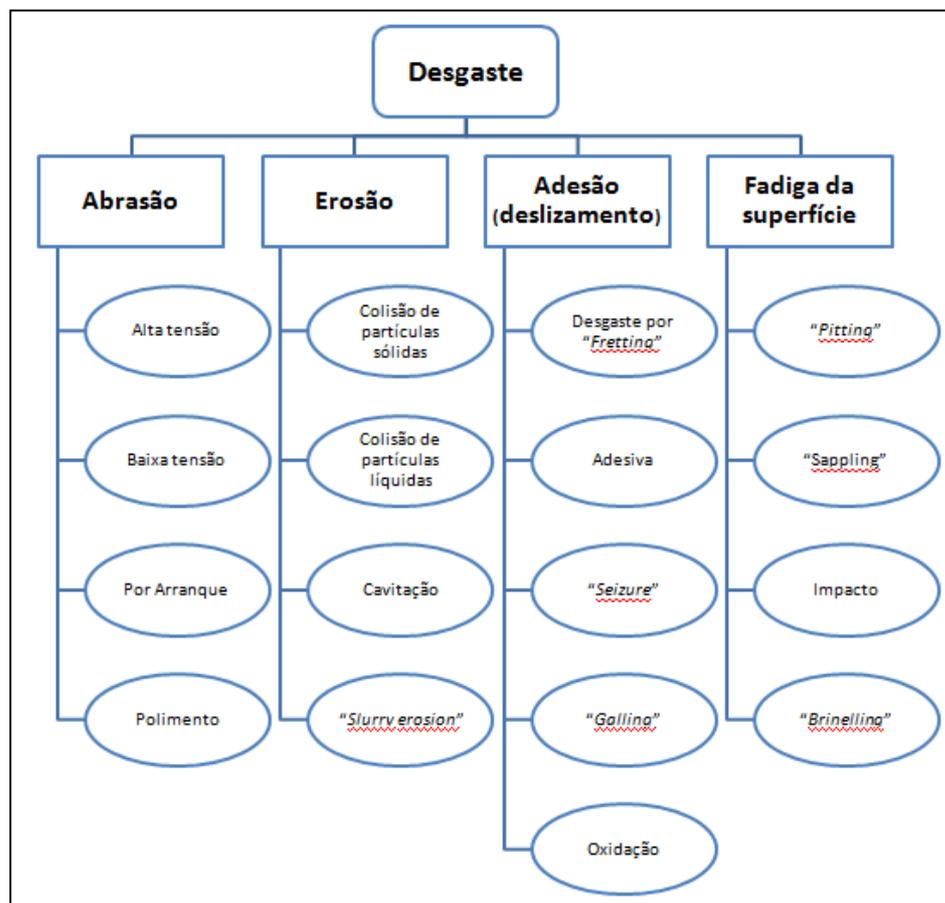


Figura 6 - Classificação do desgaste proposta por Budinski (1998)

2.3.2 Desgaste Abrasivo

A definição de desgaste abrasivo pela norma ASTM G40-09 (1992) é “a perda de massa resultante da interação de partículas soltas ou asperezas duras que são forçadas e movidas em relação a superfície de um sólido.”

Existem diversas formas de qualificar a abrasão. Uma delas é usualmente utilizada de acordo com o tipo e ambiente de contato presentes no desgaste abrasivo. A divisão é feita em abrasão a dois corpos e a três corpos, como mostrado na Figura 7. (HUTCHINGS, 1992)

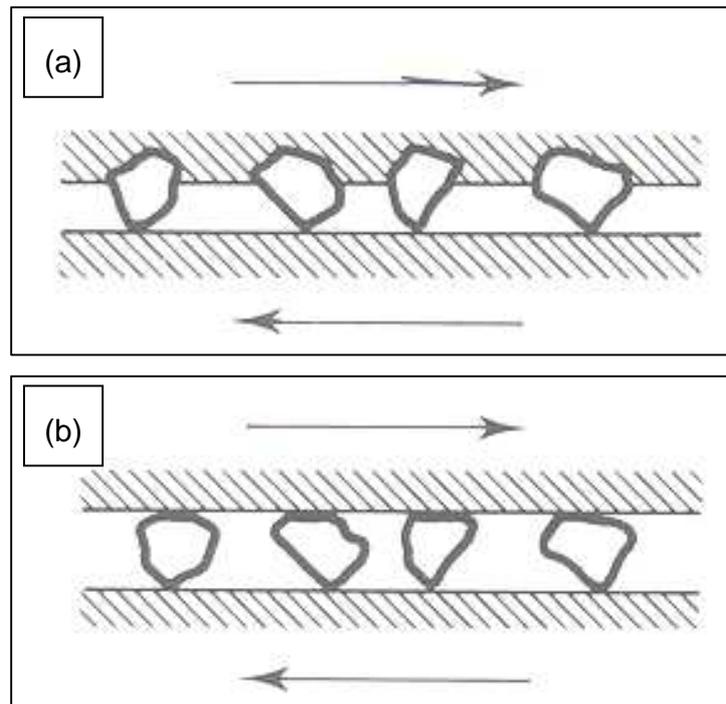


Figura 7 - Situações do desgaste abrasivo. (a) Abrasão a dois corpos e (b) Abrasão a três corpos.

Fonte: Hutchings, 1992

A abrasão a dois corpos ocorre quando o desgaste é causado por protuberâncias ou partículas presas em uma das superfícies deslizando sobre a outra. Já a abrasão a três corpos ocorre quando as partículas abrasivas estão livres para rolar e deslizar entre as duas superfícies deslizantes. (HUTCHINGS, 1992)

Davis (2001) propõe que a taxa que uma superfície é desgastada por abrasão depende da presença de abrasivos entre as superfícies, a velocidade de contato entre elas e alguns fatores do seu meio operacional. A partir disso, pode-se concluir que as taxas de resistência ao desgaste não são características intrínsecas de um material, mas dependem de fatores externos.

A classificação do desgaste abrasivo proposta por Davis (2001) é de acordo com a quantidade de dano exercido sobre a superfície em: Abrasão a baixa tensão, Abrasão a alta tensão, Abrasão por arranque e Polimento, conforme ilustrado na Figura 8.



Figura 8 - Classificação do desgaste abrasivo proposta por Davis (2001)

A abrasão a baixa tensão ou riscamento é definida pelo desgaste que ocorre entre pequenas partículas abrasivas em contato com o metal, levando a um sulcamento da superfície, como ilustrado pela Figura 9a. O critério estabelecido para a abrasão a baixa tensão é que as forças devem ser suficientemente baixas para evitar o esmagamento do abrasivo. (DAVIS, 2001)

A abrasão a alta tensão é um tipo de abrasão no qual as tensões aplicadas são suficientes elevadas para esmagar os abrasivos, neste caso ocorre o aumento da dureza por deformação na superfície, conforme Figura 9b. (DAVIS, 2001)

Abrasão por arranque é caracterizada pela ação de impacto das partículas abrasivas sobre o metal. Devido as elevadas tensões pode resultar em arrancamento ou remoção do material, conforme Figura 9c. O endurecimento causado pela deformação plástica é um dos fatores dominantes nesse tipo de abrasão. (DAVIS, 2001)

O Polimento é uma forma muito suave de abrasão na qual o mecanismo de desgaste envolve abrasão por partículas numa escala muito fina, como mostrado na Figura 9d. As superfícies sujeitas a esta forma de abrasão apresentam superfícies brilhantes e suaves causados pela remoção de material. (DAVIS, 2001)

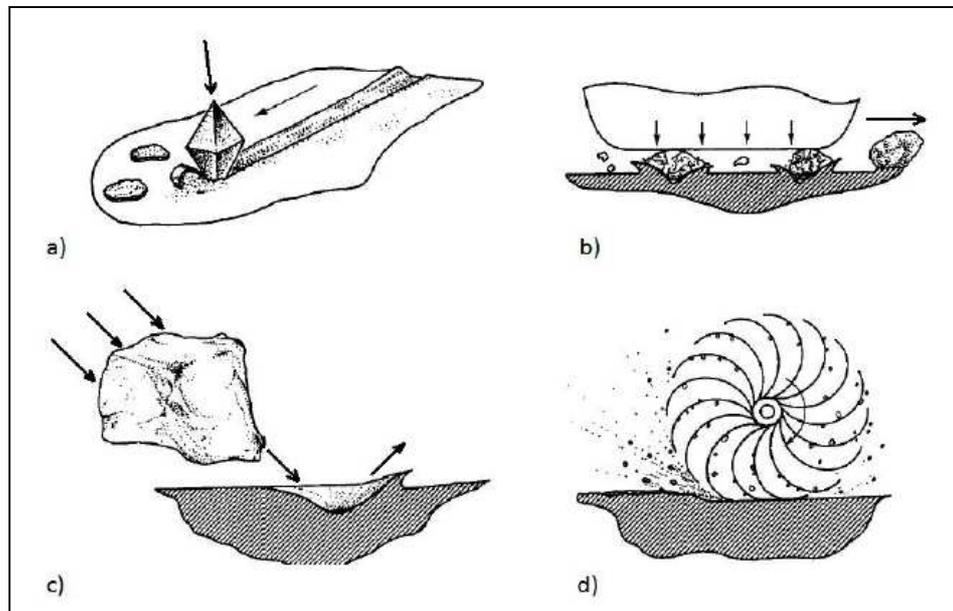


Figura 9 - Ilustração esquemática dos quatro tipos de desgaste abrasivo: (a) Abrasão a baixa tensão, (b) Abrasão a alta tensão, (c) Abrasão por arranque e (d) Polimento

Fonte: Davis, 2001

2.3.3 Mecanismos de desgaste abrasivo

Os mecanismos de desgaste abrasivo podem ser divididos em desgaste abrasivo por deformação plástica, chamados de microsulcamento e de microcorte. Estes mecanismos podem remover material ou não da peça submetida ao desgaste. A outra forma é o desgaste abrasivo por fratura frágil, chamado de microtrincamento conhecido também como lascamento. (DAVIS, 2001)

No microsulcamento ocorre a interação entre a partícula e o abrasivo em condições dúcteis provocando o deslocamento total do volume de material causando deformação plástica para as laterais do sulco e formando saliências, como mostrados pela Figura 10a e Figura 10b. Durante a primeira etapa do microsulcamento não há perda efetiva de material, entretanto em casos mais extremos deste mecanismo de desgaste as simultâneas e sucessivas interações das partículas abrasivas podem levar a um acúmulo de material e ocasionar a perda de material. (DAVIS, 2001)

No microcorte, ilustrado pela Figura 10c, a perda de massa ocorre devido ao corte do material pelo abrasivo. As condições de desgaste neste mecanismo como

tensões atuantes e ângulo entre abrasivos e superfície promovem remoção de material com volume igual ao volume do risco produzido. (DAVIS, 2001)

No microtrincamento típico de condições frágeis de desgaste, a interação entre partícula e o metal leva ao desprendimento de grandes fragmentos os quais podem ser maiores que a dimensão dos riscos, mostrado pela Figura 10d. Nesse caso, há a formação e a propagação de trincas abaixo da região deformada plasticamente causada pela passagem das partículas abrasivas. As trincas se propagam até a superfície do metal e ocasionam o destacamento de pedaços do metal. (DAVIS, 2001)

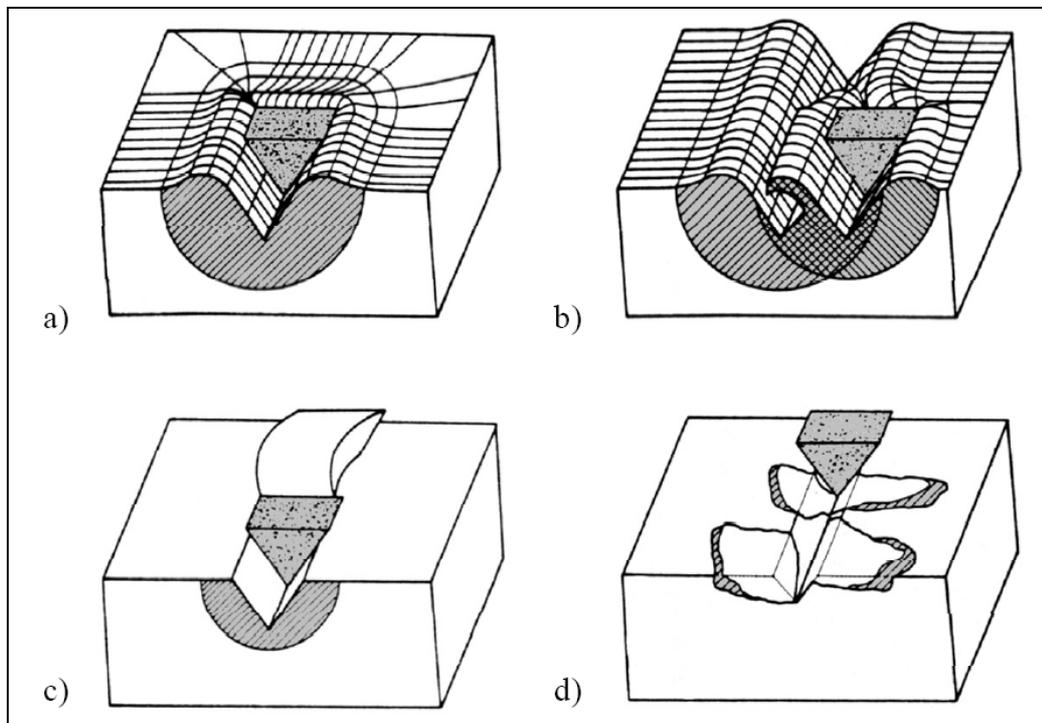


Figura 10 - Mecanismos de desgaste abrasivo: (a) e (b) Microsulcamento (c) Microcorte e (d) Microtrincamento

Fonte: Zum Gahr, 1998

2.3.4 Avaliação do desgaste à abrasão

Por se tratar de um fenômeno complexo que envolve diversos fatores, existe uma dificuldade na comparação dos resultados experimentais obtidos em trabalhos de pesquisa de resistência ao desgaste. O que é feito geralmente é a análise da

influência das características mais significativas no fenômeno e planejar ensaios para cada condição. (NOBLE, 1984)

Para o caso de desgaste à abrasão, os equipamentos utilizados para ensaio são conhecidos como abrasômetros. Em geral, o desgaste abrasivo é medido na forma de perda de massa, medindo-se os corpos de prova antes e após os ensaios. A norma ASTM G65-04 (2010) rege que o volume de material desgastado também pode ser calculado para comparação do resultado entre materiais diferentes.

O equipamento mais utilizado para ensaio de desgaste abrasivo é o abrasômetro de Roda de Borracha, regido pela norma ASTM G65-04 (2010). Como se observa na Figura 11, o princípio de funcionamento envolve esmerilhar um corpo de prova de dimensões padrões com areia cujo tamanho e composição são controlados. Os grãos abrasivos são introduzidos entre o corpo de prova e uma roda de borracha de Clorobutino com rotação conhecida. Os corpos de prova são pressionados contra a roda de borracha. A pressão exercida contra a roda de borracha e o tempo de duração variam de acordo com especificações da norma conforme os procedimentos A a E previstos pela norma ASTM G65-04 (2010).

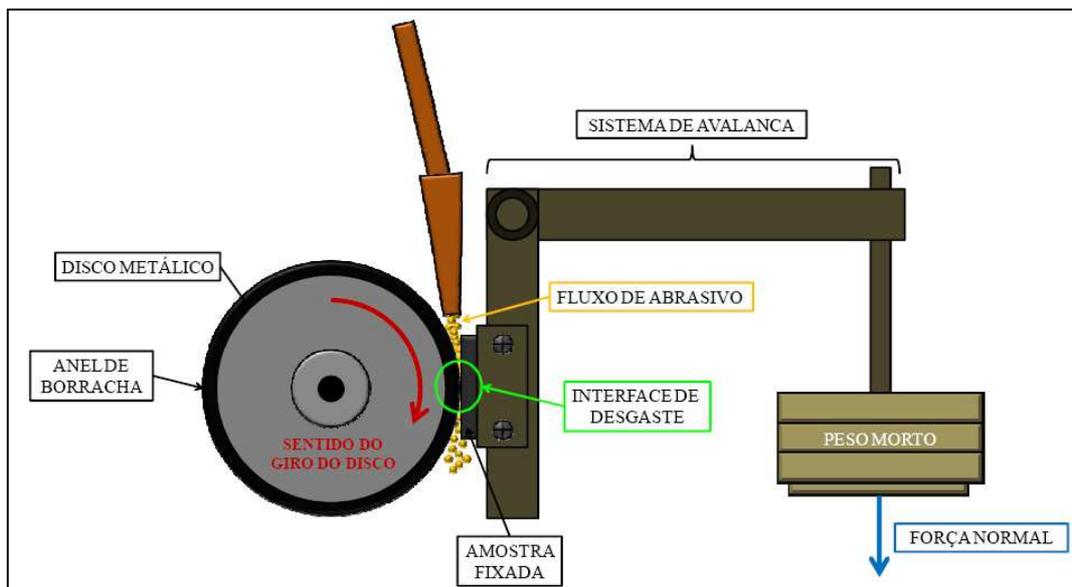


Figura 11 - Ilustração esquemática do funcionamento do abrasômetro Roda de Borracha
Fonte: Carmona, 2011

2.4 Revestimentos duros

A prevenção do desgaste abrasivo é possível através da seleção apropriada de materiais e a aplicação de tratamentos térmicos de superfície. Uma variedade de materiais demonstra boa resistência à abrasão, como cerâmicas ou revestimentos duros com alto teor de elementos de carbonetos. No presente trabalho será dado foco aos revestimentos duros.

No passado, a aplicação de revestimentos duros era utilizada somente na manutenção corretiva, ou seja, na restauração de peças danificadas ou desgastadas. Atualmente pode ser empregado para garantir maior vida útil a peças e superfícies que sofram com o desgaste abrasivo. (LINCOLN ELECTRIC, 2011)

A aplicação de revestimentos duros é um método de proteção aplicado a superfícies com o objetivo de reduzir o desgaste do material e minimizar as perdas de material por abrasão, impacto, erosão ou cavitação. Estes revestimentos são depositados por diversos processos de soldagem dentre eles os mais comuns são: a soldagem a arco, a soldagem oxicombustível ou a soldagem a laser. (ASM HANDBOOK, 1993)

Os materiais de revestimento duro podem ser: ligas com base de ferro, carbonetos, ligas com base de cobalto, ligas com base de Níquel ou aços inoxidáveis com alto teor de Silício. (ASM HANDBOOK, 1993)

Os requisitos básicos para caracterizar metais de revestimento duro são que possuam excelente resistência ao desgaste abrasivo, resistência à corrosão, elevada dureza e, além disso, mantenha as propriedades mecânicas a altas temperaturas. Considerando-se que a corrosão e a modificação das propriedades mecânicas de um material a elevadas temperaturas influenciam diretamente na taxa de desgaste, então, estas são consideradas como fatores de interesse do engenheiro mecânico para a seleção adequada de materiais para o projeto de peças sujeitas a estes esforços. (ASM HANDBOOK, 1993)

Lembrando-se que o desgaste abrasivo ocorre somente na superfície do material, ao invés de produzir uma peça inteira com um metal resistente à abrasão,

há a possibilidade de se utilizar um metal de base mais barato e dessa forma apenas aplicar o revestimento duro na superfície que sofrerá com o desgaste. Sabe-se que os materiais de revestimento duros são mais caros que os do metal de base, dessa forma reduzir-se-iam os gastos do projeto em questão. (LINCOLN ELECTRIC, 2011)

O uso dos revestimentos duros abrangem diversas aplicações desde severo desgaste abrasivo como, por exemplo, na lapidação de pedras e na pulverização, até aplicações em que o objetivo principal é evitar o desgaste entre duas superfícies metálicas como no caso das válvulas de controle onde o mínimo desgaste abrasivo é intolerável, pois pode comprometer a funcionalidade da válvula. Estes materiais podem ser usados também em ferramentas de escavação e em máquinas agrícolas, em áreas onde ocorre o desgaste crítico do equipamento. (ASM HANDBOOK, 1993)

2.4.1 Revestimentos duros com ferros com alto teor de cromo

Dentre os diversos tipos de revestimentos, os revestimentos duros com ferro com alto teor de cromo vêm sendo utilizados como uma boa solução para aplicações em que exista a necessidade de materiais resistentes à abrasão. Por possuírem como característica principal a dureza elevada, os eletrodos de ferro com alto teor de cromo são considerados excelentes materiais para aplicações contra o desgaste. (CHANG *et. al.*, 2010)

Os revestimentos duros com ferro com alto teor de cromo são preferíveis, pois são materiais com boa resistência ao desgaste abrasivo, apresentam relativo baixo custo quando comparados a outros revestimentos duros ricos em Tungstênio ou Vanádio e ainda apresentam a vantagem de possuir boa resistência à corrosão. (CHANG *et. al.*, 2010)

Os revestimentos duros com ferro com alto teor de cromo abrangem uma vasta quantidade de materiais com diversas composições químicas nas quais os teores de cromo podem variar desde 6% até 35% em peso e os teores de carbono podem variar desde 2% até 6% em peso. A principal característica deste revestimento é que forma carbonetos, geralmente M_7C_3 em sua microestrutura, que pode estar em uma matriz austenítica, martensítica ou perlítica. A microestrutura

destes materiais é diretamente influenciada pela sobreposição de material, pelas mudanças na composição devido a perdas no arco de soldagem e pela taxa de resfriamento obtida no processo. (ASM HANDBOOK, 1993)

No escopo de aplicações industriais destes revestimentos duros com alto teor de cromo, os ferros hipoeutéticos, com baixo teor de carbono (2 a 4% em peso de carbono), são utilizados em situações de moderado impacto e moderado desgaste à abrasão. Já para ferros hipereutéticos, com alto teor de carbono (4 a 6% em peso de carbono), são usados em aplicações envolvendo abrasão severa e pouco ou quase nenhum impacto como, por exemplo, revestimento de bombas ou martelos britadores. (ASM, 1993)

2.4.2 Revestimentos duros soldados pelo processo de soldagem com arame tubular

O processo de soldagem com arame tubular é muito semelhante ao processo de soldagem a arco submerso em vários aspectos, com a grande diferença de não ser necessário depositar o fluxo sobre a área de soldagem, por isso produz pouca ou quase nenhuma escória. A maioria dos materiais pode ser depositada pelo processo de soldagem com arame tubular sem nenhum pré-aquecimento. (ASM HANDBOOK, 1993)

Este processo apresenta algumas desvantagens: é um processo que não utiliza um gás inerte e tampouco é coberto por um fluxo de soldagem sobre a área onde o revestimento será aplicado. Dessa forma, o processo tende a apresentar uma quantidade razoável de respingos e porosidade. Pode-se dizer que a quantidade de trincas transversais e a distorção presentes nos cordões depositados por este processo são comparáveis a outros processos de soldagem a arco. (ASM HANDBOOK, 1993)

2.4.3 Influência da dureza no desgaste abrasivo

Cada material reage de uma maneira diferente quando solicitado ao desgaste abrasivo, dependendo de suas propriedades mecânicas e características da sua

microestrutura. A seguir serão citados como a dureza está correlacionada com o desgaste abrasivo.

Estudos recentes são unânimes em afirmar que a dureza influencia diretamente na resistência ao desgaste abrasivo. Na maioria dos casos, quanto maior a dureza, maior será a resistência ao desgaste.

Chang *et. al.* (2010) realizaram um experimento correlacionando as características de resistência à abrasão com a microestrutura de uma liga Fe-Cr-C com diferentes percentuais de carbono aplicados pelo processo de soldagem TIG. Foi observado que durezas superficiais mais elevadas apresentavam melhores resistências ao desgaste, conforme ilustrado na Figura 12a e Figura 12b. A partir destas figuras, pode-se concluir também que quanto maior o percentual de carbono presente, mais duras eram as amostras e foram obtidos melhores resultados na resistência à abrasão.

Kirchgaßner *et. al.* (2006) também realizaram ensaios para avaliar o comportamento de diferentes revestimentos duros com ferro sob desgaste abrasivo e puderam concluir que existe uma relação entre a dureza e a resistência ao desgaste. Em geral quanto maior a dureza melhor o resultado obtido nos ensaios. No entanto, Kirchgaßner *et. al.* (2006) afirmaram que a dureza é apenas um dos fatores a serem observados, pois diferentes mecanismos de abrasão exigem diferentes propriedades características do material a ser ensaiado.

Chatterjee *et. al.* (2003) afirmam que a dureza de um material pode apenas apresentar uma estimativa do quão resistente à abrasão um material pode ser, no entanto, não é possível ter uma precisão tão acurada. Variações na composição química e alterações microestruturais nos materiais de revestimento duro possuem a mesma importância da dureza para avaliar o efeito no desgaste abrasivo.

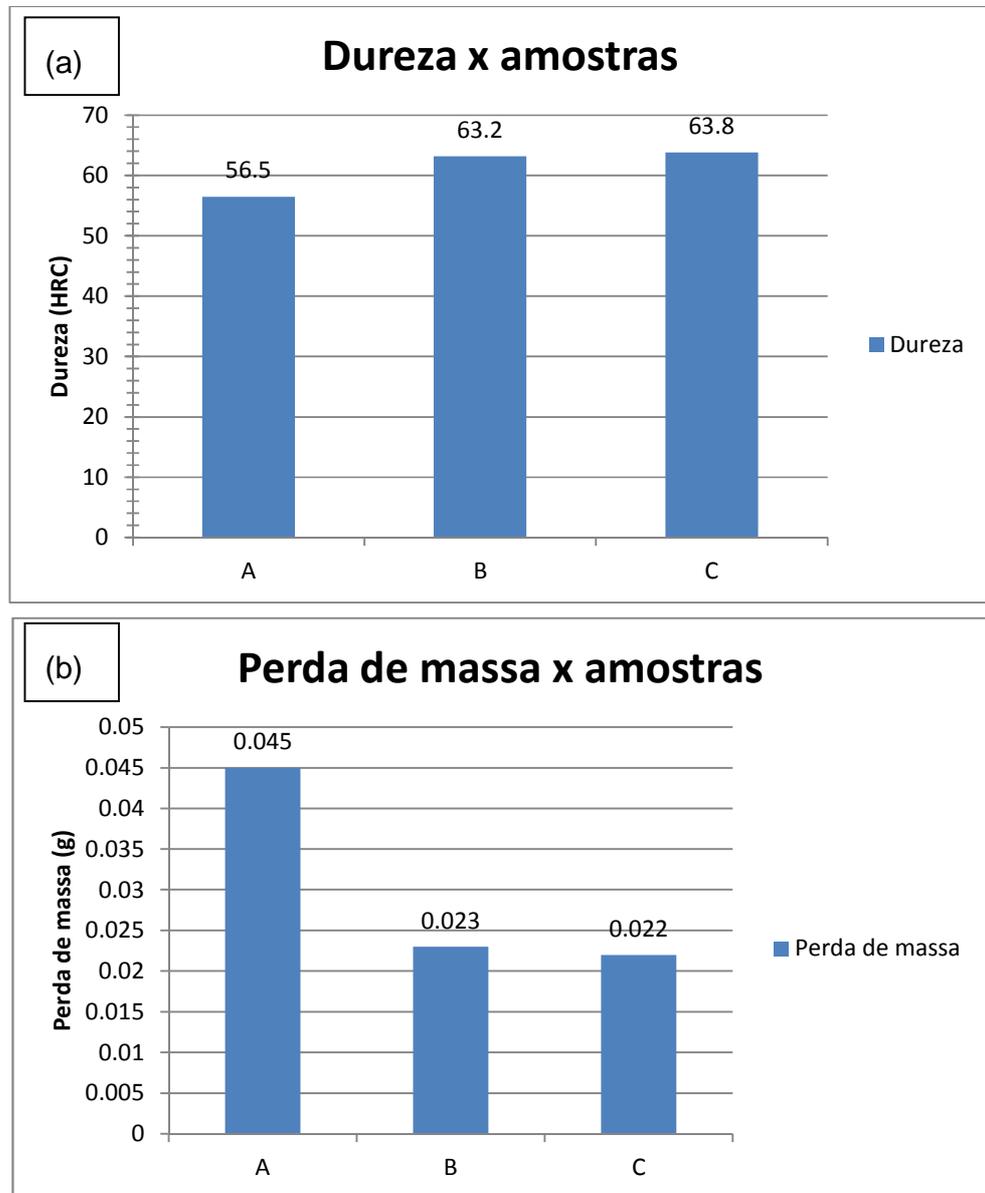


Figura 12- Resultados para: (a) Dureza e (b) Perda de material para os materiais com: (A) Baixo, (B) Médio e (C) Alto teor de C

Fonte: Adaptado de Chang *et. al.*, 2010

2.4.4 Influência das trincas no desgaste abrasivo

Em soldagem, assim como nos demais processos de fabricação, peças produzidas estão sujeitas a possuir defeitos mecânicos de formação, de uma forma geral, os defeitos mais comuns em soldagem são as trincas, a porosidade ou as inclusões nos cordões de solda.

As trincas transversais, um tipo de trinca a frio, ocorrem perpendicularmente ao eixo em que a solda foi realizada. Geralmente, sua formação ocorre durante o resfriamento da solda a temperaturas abaixo de 200°C, podendo acontecer também algumas vezes até mesmo horas após o resfriamento. Estes defeitos geralmente ocorrem em função da elevada dureza do material depositado, do conteúdo de hidrogênio e das tensões residuais presentes nas direções longitudinais em relação à solda. (LEE, 2006)

Lee (2006) obteve em seu experimento no qual analisava os efeitos do teor de hidrogênio na soldagem com arame tubular de placas grossas que a dureza na solda em metais sem pré-aquecimento era maior do que nas amostras com pré-aquecimento. Fato explicado pela elevada taxa de resfriamento nas amostras sem o tratamento térmico que gerou microestruturas mais duras.

Lee (2006) concluiu que nas amostras em que a temperatura de pré-aquecimento e de interpasse foram insuficientes gerou-se maiores contrações térmicas no metal durante o resfriamento e, como resultando ocorreu o aparecimento de trincas.

Coronado *et. al.* (2009) obtiveram resultados semelhantes com relação a presença de trincas na sua pesquisa em que depositaram diferentes revestimentos duros com diferentes processos de soldagem. Conforme mostrado pela Tabela 1, a amostra A possuía maior dureza, mas obteve maior perda de massa, conforme ilustrado pela Figura 13.

Tabela 1 - Resultados obtidos por Coronado *et. al.* (2009)

Processo de soldagem	Número de passes	Aporte térmico	Perda de massa	Resistência ao desgaste abrasivo	Microdureza Vickers (19.6N)
		[kJ/cm]	[mg]	[mg/m] ⁻¹	
FCAW A	1	12.5	2563.33	1.68	695
FCAW B	1	17.5	1206.67	3.57	597

Coronado *et. al.* (2009) justificaram que esta maior perda de massa de fato ocorreu, pois o revestimento aplicado pelo processo de soldagem FCAW A apresentou trincas conforme observado na Figura 13 e pelo fato das trincas

produzirem uma estrutura mais fragilizada e susceptível a quebra, ocorreram fraturas frágeis gerando desprendimento de material. Isto causou maior perda de massa na amostra e, portanto, maior desgaste abrasivo. A presença de trincas no processo FCAW A causou um efeito negativo na perda de massa neste experimento, conforme observado no gráfico da Figura 14.

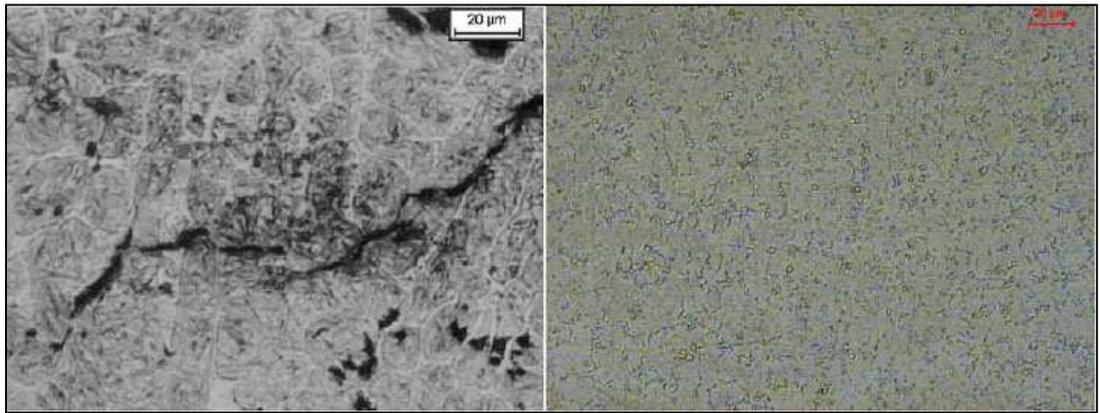


Figura 13 - Microestruturas dos processos de soldagem FCAW A e FCAW B obtidos por Coronado *et. al.* (2009)

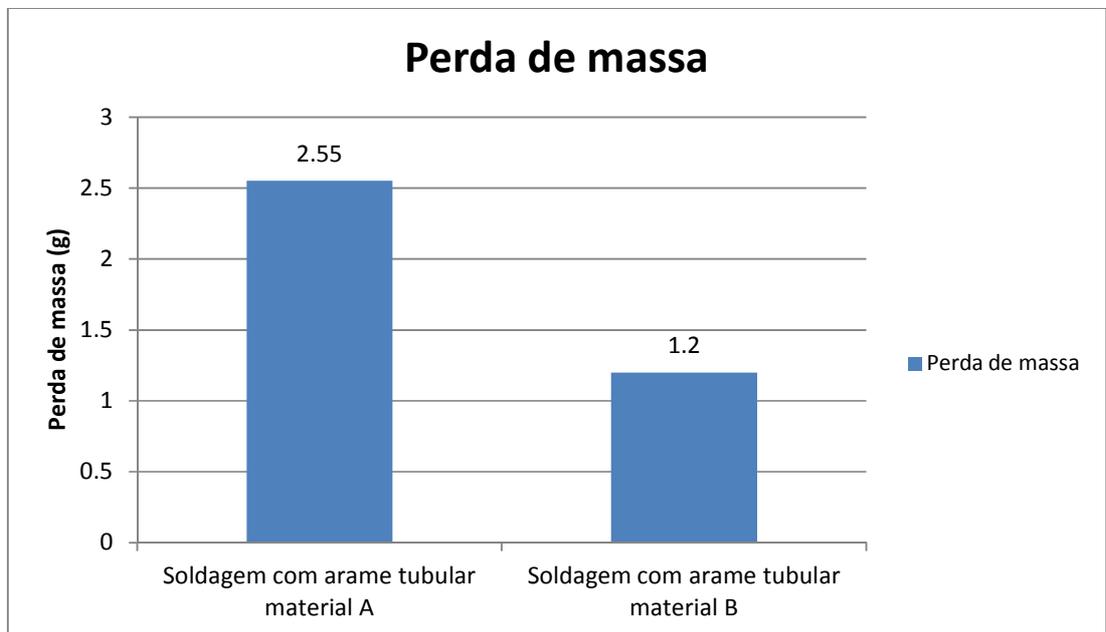


Figura 14 - Perda de massa relacionada ao processo de soldagem

Fonte: Adaptado de Coronado *et. al.*, 2009

Da mesma forma como Coronado *et. al.* (2009), Buchely *et. al.* (2005) também obtiveram trincas em um de seus corpos de prova. Buchely *et. al.* (2005) realizaram a

aplicação de revestimentos reforçados com carbonetos de cromo, carbonetos complexos e ainda carbonetos de tungstênio.

Buchely *et. al.* (2005) afirmam que os principais mecanismos de desgaste nas amostras de FeCrC foram o microcorte e microsulcamento. Buchely *et. al.* (2005) ainda concluíram que houve maior perda de massa nas amostras que apresentaram trincas, pois houve o desprendimento de partículas por fratura frágil.

A superfície após o desgaste está mostrada na Figura 15. A presença de trincas no material soldado afeta diretamente no desgaste abrasivo e pode causar maiores perdas de material. Estas perdas ocasionam maiores gastos com reparos e reposições. (BUCHELY *et. al.*, 2005)

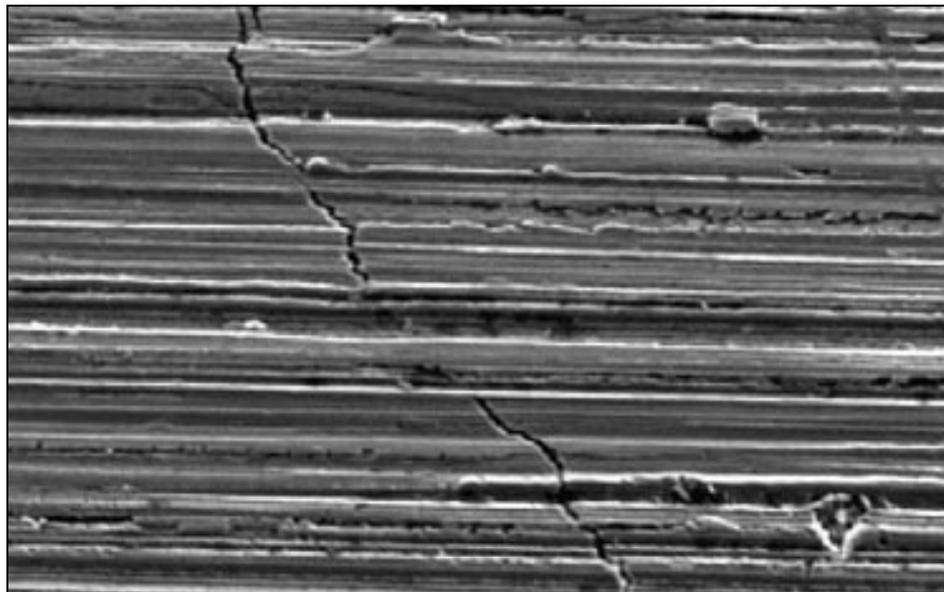


Figura 15 - Superfície da amostra de um cordão de FeCrC
Fonte: Buchely *et. al.*, 2005

2.4.5 Influência da porosidade no desgaste abrasivo

A porosidade é uma descontinuidade estrutural causada pelo aprisionamento de gases durante a solidificação da solda. A porosidade pode ocorrer de diversas formas, distribuída, agrupada ou em linha, conforme mostrado na Figura 16. Ela geralmente apresenta a forma de esferas, embora poros alongados, também chamados de vermiculares, podem ser formados. (MARQUES, 2002)

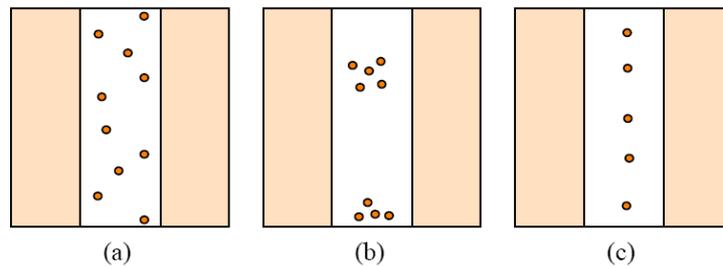


Figura 16 – Porosidade (a) distribuída, (b) agrupado e (c) em linha.
 Fonte: Modenesi et. al., 2001.

As principais causas da porosidade são contaminações causadas por: umidade retida nos eletrodos seja no fluxo ou presente no gás de proteção, contaminação de óleos, ferrugem, dentre outras impurezas presentes na região da solda. Pequenas quantidades de porosidade são toleráveis e não causam nenhum problema, no entanto, porosidades excessivas podem afetar as propriedades mecânicas das juntas ou dos materiais soldados. (MARQUES, 2002)

Buchanan *et. al.* (2007) em um estudo comparativo do mecanismo de desgaste abrasivo de ferro com alto teor de cromo, constataram que a formação de trincas ocorria nos contornos de inclusões e nas bordas das trincas, como mostrado pela Figura 17.

Desprendimentos foram causados pela remoção de inclusões de óxidos e pelo alargamento dos poros. Portanto, Buchanan *et. al.* (2007) concluíram que a porosidade e a presença de inclusões de óxidos foram dominantes em controlar a quantidade de perda de massa nos ensaios de desgaste.

Carmona (2011) em seu experimento de diferentes revestimentos duros aplicados pelo processo de soldagem com arame tubular também obteve trincas e porosidade em algumas de suas amostras de FeCrC + Nb, conforme mostrado pela Figura 18.

Carmona (2011) afirmou que as partículas abrasivas podem adentrar nas trincas e nas porosidades combinando com a pressão exercida pelo disco de borracha causando um desgaste maior na saída das partículas. A seta indica o fluxo

das partículas, onde pode-se observar que o desgaste é mais acentuado próximo aos poros e às trincas.

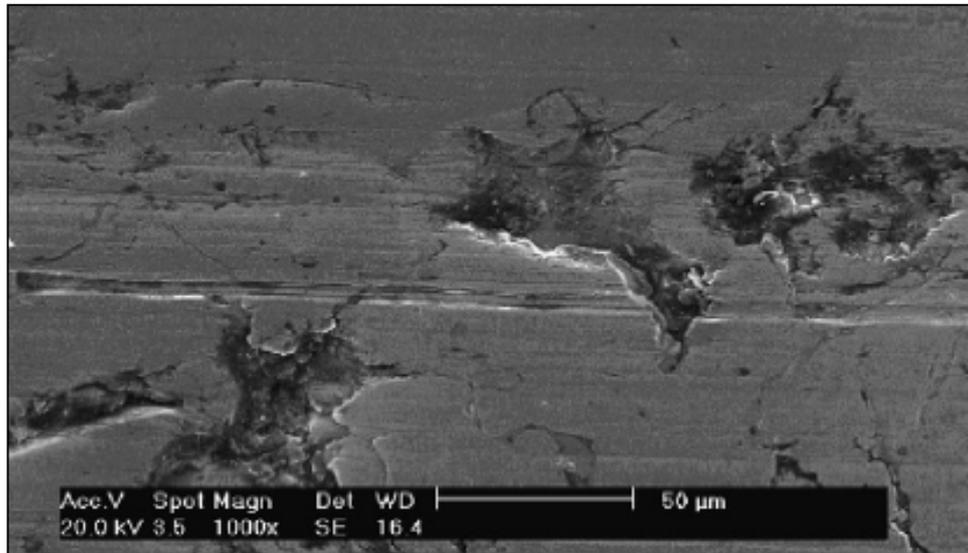


Figura 17 - Superfície desgastada no experimento de Buchanan *et. al.* (2007)

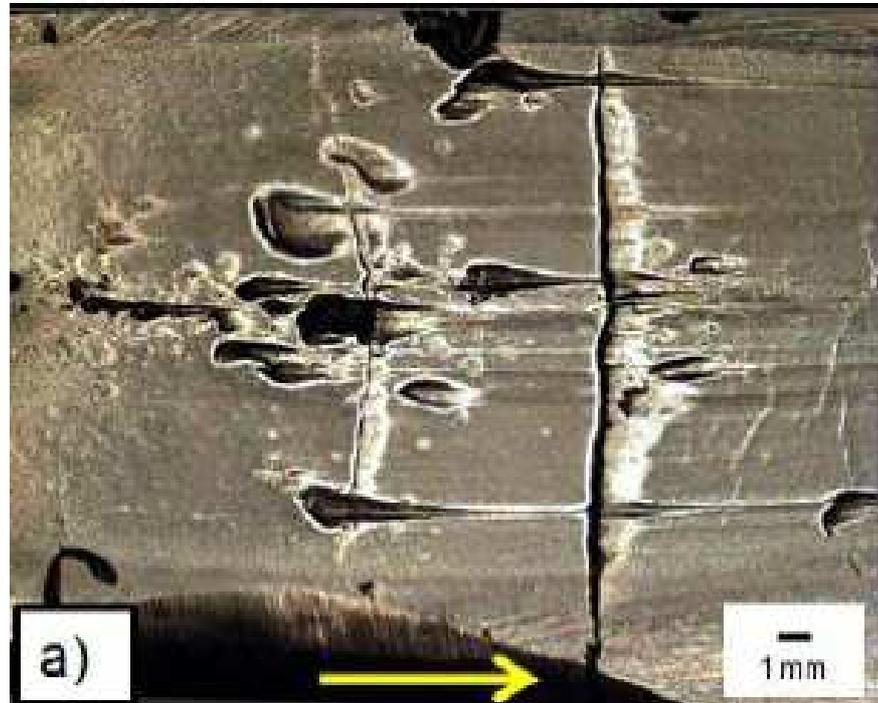


Figura 18 - Superfície desgastada de revestimento duro com FeCrC + Nb
Fonte: Carmona, 2011

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos de forma organizada e detalhada os materiais utilizados e métodos empregados para o desenvolvimento e realização deste projeto de pesquisa.

3.1 Materiais

3.1.1 Material do substrato

O material selecionado como substrato necessitava apresentar características de alta temperabilidade de forma que a aplicação de um pré-aquecimento neste pudesse alterar suas características após o processo de soldagem.

Dentre as várias opções disponíveis no mercado, optou-se por utilizar um aço ABNT 1045 laminado a quente. Este material com médio teor de carbono possui característica de média soldabilidade, com a necessidade da aplicação de um tratamento térmico pós-soldagem para alívio de tensões.

Foram utilizadas chapas laminadas de aço-carbono ABNT 1045 com a seguinte composição, conforme a SAE (*Society of Automotive Engineers*) e a AISI (*American Iron and Steel Institute*) mostrado na Tabela 2. As chapas utilizadas para a pesquisa possuíam dimensões de 150 x 100 x 6,35 mm e ao todo foram utilizadas nove chapas.

Tabela 2 - Composição do aço 1045 SAE-AISI

Fonte: TOTTEN, 2007.

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

O médio teor de carbono da chapa utilizada como substrato tende a deslocar as curvas TTT para a direita e retardar o início das curvas de transformação de fase. Isto faz com que este material esteja mais predisposto a formação de uma microestrutura martensítica.

3.1.2 Material do arame eletrodo

Para a seleção do material do arame eletrodo, foi considerado que este deveria apresentar a formação de uma superfície com elevada dureza e boa resistência ao desgaste. Para possibilitar uma melhor análise dos efeitos do pré-aquecimento, o material deveria também possuir uma boa quantidade de elementos formadores de carboneto, como o Cromo ou o Titânio, em sua composição química.

O eletrodo de arame tubular utilizado para soldagem foi o UTP AF Ledurit 60 que é um arame eletrodo de revestimento duro com ferro com alto teor de cromo cuja composição química está mostrada na Tabela 3. No catálogo do fabricante também está especificado que se trata de um arame autoprotetido, ou seja, não necessita a utilização de gás de proteção.

A bitola do arame de soldagem foi de 1,6 mm com uso recomendado para tensões de soldagem entre 22 e 29 Volts e corrente entre 150 e 300 Ampéres. O fabricante recomenda utilizar a técnica de soldagem “puxando” com a posição de soldagem plana e aproximadamente 25 a 30 mm de arame *stickout*.

Tabela 3 - Composição química do arame eletrodo UTP AF Ledurit 60

Fonte: Catálogo UTP

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

3.2 Equipamento

3.2.1 Equipamento de soldagem com arame tubular

Para a realização do projeto de pesquisa foi utilizado o equipamento de soldagem disponível no laboratório de soldagem e aspensão térmica da UTFPR, como mostrado na Figura 19. O equipamento de soldagem com arame tubular utilizado para a deposição dos revestimentos é semelhante ao equipamento de soldagem MIG, sendo este composto por fonte de corrente contínua de soldagem, alimentador de arame e a tocha de soldagem.



Figura 19 - Equipamento de soldagem com arame tubular utilizado para os ensaios

3.3 Metodologia

3.3.1 Parâmetros adotados na soldagem

Após a seleção dos materiais do substrato e do arame, o próximo passo foi definir os parâmetros de soldagem a serem utilizados. Primeiramente, consultou-se o catálogo do fabricante para verificar a faixa de tensão e corrente recomendados.

A variável no processo de soldagem será a temperatura de pré-aquecimento, para se avaliar melhor o efeito deste na perda de massa, na dureza e na presença de defeitos de formação nos cordões depositados.

Com os parâmetros recomendados fornecidos pelo catálogo do fabricante do arame foi possível se obter um cordão de revestimento duro com aspecto superficial e dimensões adequadas apresentando diversas trincas durante sua deposição à temperatura ambiente. Os parâmetros utilizados para a soldagem estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 4- Parâmetros de soldagem utilizados para os ensaios

Parâmetros de soldagem utilizados		
Arame <i>stickout</i>	25	mm
Ângulo da tocha com a vertical	15	°
Voltagem <i>set up</i>	25,0	V
Corrente de soldagem	150	A
Velocidade de alimentação do arame	3,0	m/min.
Velocidade de soldagem	2,5	mm/s
Comprimento soldado	130	mm

3.3.2 Determinação das temperaturas de pré-aquecimento

Conforme citado no capítulo 2, a temperatura de pré-aquecimento pode vir a ocasionar mudanças microestruturais, diminuição na quantidade de falhas de formação no material depositado e estas mudanças vêm a causar efeito direto na perda de massa.

Definindo-se a variável a ser empregada, a próxima etapa a ser realizada foi determinar a amplitude desta variação, de modo que as mudanças nas condições do processo de revestimento pudessem destacar o efeito da variável escolhida, no caso o pré-aquecimento.

Na literatura não foram encontrados valores de pré-aquecimento utilizados para a soldagem do arame tubular de ferro com alto teor de cromo, então, como forma alternativa, foi-se utilizado as equações de início de formação de martensita para o aço ABNT 1045, material utilizado com metal de base.

Para o cálculo da temperatura de início de formação de martensita foram utilizadas a equação 5 proposta por Svendlin e Ness (1997) e a equação 6 por Andrews (1965), utilizando as composições em percentual em peso e utilizando os valores para composição química da Tabela 2.

$$M_s(^{\circ}C) = 520 - 320C - 50Mn - 30Cr - 20[Ni + Mo] - 5[Cu + Si] \quad \text{Equação 5}$$

$$M_s(^{\circ}C) = 539 - 423C - 30,4Mn - 17,7Ni - 12,1Cr - 11,0Si - 7,0Mo \quad \text{Equação 6}$$

Foram calculados os valores para a temperatura de início de formação de martensita para a composição química mínima, com valores de 0,42%C e 0,6Mn; a

composição química média, com 0,435%C e 0,75%Mn e para a composição química máxima, com 0,45%C e 0,9%Mn. Os resultados dos cálculos estão apresentados na Tabela 5

Tabela 5 - Temperaturas de início de formação de martensita obtidas pelas Equações propostas por Andrews (1965) e Sverdling e Ness (1997).

	Composição química mínima	Composição química média	Composição química máxima
Andrews (1965)	343,1°C	332,2°C	321,3°C
Sverdling e Ness (1997)	355,6°C	343,3°C	331,0°C

A temperatura de início de formação de martensita utilizada foi a de 350°C, proposta por Sverdling e Ness (1997) na condição de composição química mínima, para garantir que a temperatura de início de formação de martensita fosse obtida. Para análise do efeito do pré-aquecimento, a determinação da terceira condição de soldagem foi de 100°C acima da temperatura de formação da martensita, ou seja, uma temperatura de 450°C, dessa forma, assegurando teoricamente a formação de uma microestrutura menos propensa à formação de trincas.

3.3.3 Nomenclatura dos corpos de prova

Para melhor análise da resistência ao desgaste e dureza, o número de experimentos a ser realizados foi determinado de tal forma que para cada temperatura de pré-aquecimento seriam necessários três corpos de prova. Portanto, para cada uma das três temperaturas, foram soldados três corpos de prova, totalizando nove amostras, conforme nomeados na Tabela 6.

As amostras foram nomeadas como sendo sem pré-aquecimento recebeu a nomenclatura "S", pré-aquecidas a 350°C a nomenclatura "T" e a 450°C nomeada como "U", conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Nomenclatura dos experimentos de acordo com a variável de soldagem utilizada.

Temperatura	Amostras		
T = 25°C	S1	S2	S3
T = 350°C	T1	T2	T3
T = 450°C	U1	U2	U3

3.3.4 Propriedades Avaliadas

A perda de massa foi considerada como a principal propriedade para avaliação, pois os revestimentos duros são empregados em aplicações que exigem muita resistência ao desgaste abrasivo e dependem da quantidade de massa perdida. A dureza e a quantificação da porosidade também foram selecionadas para análise, pois em diversos artigos foi apresentado que estas propriedades causam efeito direto na resistência ao desgaste.

Além disso, a presença de trincas e de falhas no material também poderia influenciar na resistência ao desgaste abrasivo, podendo causar fratura frágil, afetando os resultados para a perda de massa.

As propriedades analisadas durante o processo foram:

- a) Trincas superficiais;
- b) Dureza;
- c) Resistência ao desgaste abrasivo;
- d) Quantidade de porosidade;
- e) Mecanismo de desgaste abrasivo.

3.3.5 Preparação dos corpos de prova

A preparação da superfície do metal de base para aplicação do revestimento pelo processo de soldagem foi realizada somente na porção central da face na qual o material seria depositado, em uma faixa de aproximadamente 70 mm de largura. A remoção da carepa de laminação foi realizada de forma mecânica com a utilização de uma esmerilhadeira com disco abrasivo.

3.3.6 Aplicação do pré-aquecimento

A aplicação do pré-aquecimento foi feita utilizando-se um maçarico de soldagem oxi-gás e o combustível utilizado foi o acetileno. Para evitar o excesso de oxigênio presente na combustão da chama, foi realizada a aplicação do pré-aquecimento com uma chama neutra, ou seja, aquela em que o volume de comburente e de combustível são ideais, conforme mostrado pela Figura 20. Para a verificação da temperatura de pré-aquecimento e uniformidade da temperatura na superfície da peça, utilizou-se um pirômetro com visor digital conforme ilustrado na Figura 21.



Figura 20 - Aplicação do pré-aquecimento com tocha



Figura 21 - Medição da temperatura para início da soldagem

3.3.7 Execução do revestimento

O deslocamento da tocha de soldagem foi realizado por um dispositivo semiautomático de maneira a padronizar os ensaios, mantendo a velocidade de soldagem constante, dessa forma, evitando-se grandes disparidades na deposição dos cordões de revestimento duro.

Para controlar a distância do arame até a peça e o ângulo da tocha de soldagem foi utilizado um dispositivo com ângulo e altura reguláveis. A distância do arame até a peça foi medida com um paquímetro analógico e para a medição do ângulo de inclinação do bocal foi utilizado um goniômetro.

As chapas a serem soldadas foram presas à mesa por um pequeno gabarito como mostrado na Figura 22. O dispositivo é regulável por dois parafusos para compensar irregularidades da superfície ou diferenças de nível e garantir que a distância percorrida pelo dispositivo semiautomático seja constante. Este gabarito tem como principais funções: a fixação; garantir a rigidez da chapa durante a soldagem e também serve para evitar ou reduzir o efeito do empenamento devido às tensões de contração durante o resfriamento dos cordões de solda.

Foi necessária a realização de quatro ou cinco cordões de solda para cada condição de soldagem para obter-se a largura mínima de 25,4mm, necessária para a

confeção dos corpos de prova para ensaio de desgaste Roda de Borracha, conforme a norma ASTM G-65 (2010). Como observado na Figura 22, há a formação de escória e outras impurezas na superfície do cordão de solda e entre a deposição de um cordão e outro, foi necessário realizar a limpeza das amostras com o auxílio de uma esmerilhadeira com disco rotativo do tipo escova de aço antes da deposição do próximo cordão do revestimento.



Figura 22 - Gabarito utilizado para fixação das amostras

Para a condição sem pré-aquecimento, a temperatura ambiente se manteve constante a 23°C. Para as condições pré-aquecidas. Ao atingir-se a temperatura de pré-aquecimento desejada em toda a superfície da chapa, foi depositado o primeiro cordão de solda. Após a deposição, chapa foi limpa com uma esmerilhadeira com disco rotativo do tipo escova de aço e, então, mediu-se a temperatura da chapa e caso a temperatura fosse menor que a pré-estabelecida um novo aquecimento na chapa seria realizado antes da deposição do segundo cordão. Esse procedimento foi repetido até que os cordões de solda depositados tivessem uma espessura de pouco mais que 25,4mm para confecção dos corpos de prova para ensaio de desgaste de Roda de Borracha.

3.3.8 Confecção dos corpos de prova para ensaio de desgaste

A confecção dos corpos de prova para ensaio de desgaste foi realizada da seguinte forma, primeiramente, as amostras foram cortadas numa serra fita na direção ilustrada na Figura 23, o metal de base excedente foi descartado.

Em seguida, as amostras foram levadas ao laboratório de materiais da UTFPR e cortadas por uma cortadeira metalográfica, em dimensões muito próximas das exigidas pela norma.

O produto final foi o corpo de prova semiacabado para ensaio de desgaste abrasivo e as partes um e dois, conforme mostrado pela Figura 23. As partes um e dois foram devidamente marcadas e, posteriormente, poderiam ser utilizadas para a obtenção das amostras para metalografia.

Foi necessário usinar os corpos de prova até as dimensões requeridas pela norma. A retificação da superfície dos cordões foi realizada até que a superfície dos revestimentos duros atingisse a uniformidade. Os corpos de prova finalizados estavam com as dimensões de 25 x 76mm e com a espessura dentro os valores especificados pela norma.

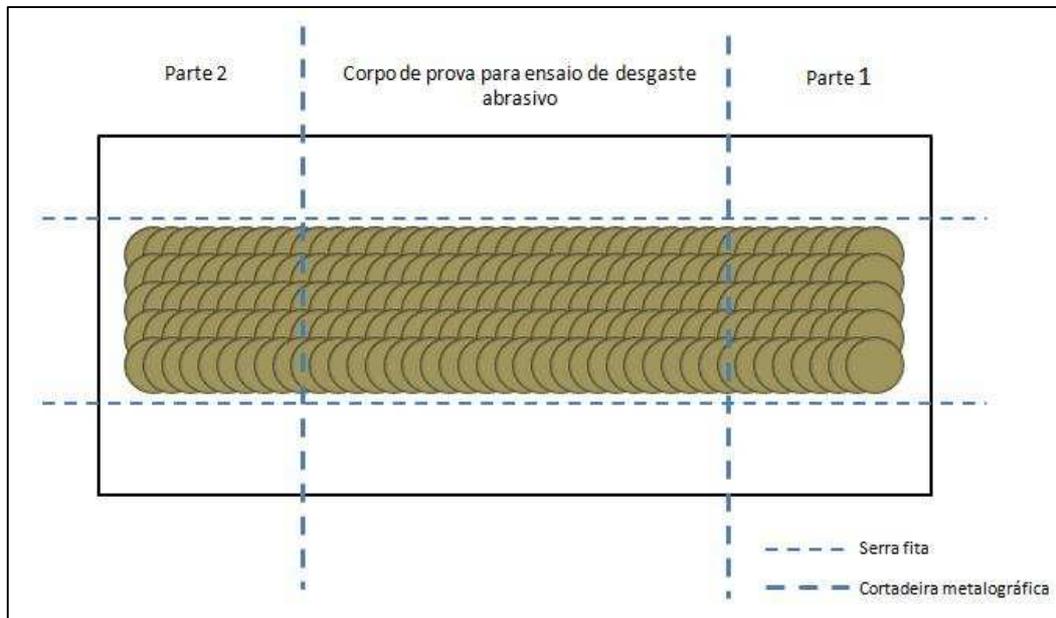


Figura 23 - Esquema representativo dos cortes realizados na amostra soldada

3.4 Ensaios realizados

Após a etapa de deposição dos cordões de revestimento duro, todos os corpos de prova foram fotografados e catalogados. Então, foi possível controlar os corpos de prova em função das variáveis aplicadas permitindo uma análise da superfície de cada cordão.

3.4.1 Ensaio por Líquido penetrante

Ao término da soldagem de todos os cordões, foi observado se os corpos possuíam trincas superficiais visíveis. Logo depois, foi realizado o ensaio por líquido penetrante.

O ensaio por líquido penetrante foi realizado para que os defeitos superficiais fossem destacados. Primeiramente todos os corpos de prova foram limpos com o auxílio de uma esmerilhadora com escova rotativa, de forma a remover partículas e impurezas presentes na superfície dos corpos de prova após a soldagem. Em seguida, os corpos foram limpos com o auxílio de um pano com uma solução líquida para remoção de pequenas impurezas.

Após a devida limpeza dos corpos de prova, foi aplicado o líquido penetrante sobre a superfície das amostras para que penetrasse nas imperfeições. Após dez minutos, as superfícies das amostras foram limpas com o auxílio de um pano úmido para remover o excesso de líquido penetrante.

Enfim, aplicou-se o líquido revelador e então os defeitos superficiais foram detectados. Logo após a aplicação do líquido revelador, foram tiradas fotos para análise dos defeitos superficiais. Após a retirada das fotos, as amostras foram limpas novamente com um pano úmido para remoção do líquido revelador e do líquido penetrante remanescente.

3.4.2 Quantificação da porosidade

A porosidade também foi selecionada como uma das propriedades a serem avaliadas na influência da perda de massa dos corpos de prova. Para obter uma medição com certa precisão da quantidade de porosidade na superfície dos corpos de prova, foi utilizado um *software* de análise de imagens, o *ImageProPlus*. Para a análise, foi necessária a digitalização de imagens com as superfícies dos corpos de prova antes da realização dos ensaios de desgaste e de dureza.

Todos os nove corpos de prova tiveram suas superfícies digitalizadas através de um *scanner* e foram devidamente nomeados. Então, com o auxílio do *software* para análise de imagens, foi possível realizar as medições necessárias. O procedimento utilizado foi isolar um retângulo numa seção do corpo de prova e então foram marcadas as porosidades presentes dentro desta seção. Ao todo, foram realizadas oito medições para cada corpo de prova, totalizando 72 medições, diminuindo a chance de erros.

Os resultados foram exportados do *software ImageProPlus* para tabelas do *software Microsoft Excel*. Esses dados foram trabalhados e reorganizados para que pudesse ser feita uma comparação quantitativa da porosidade à perda de massa. Os valores das porosidades marcadas e divididos pela área do retângulo da seção, obtendo-se um valor percentual.

3.4.3 Ensaio de desgaste em roda de borracha

Depois de realizado o ensaio não destrutivo por líquido penetrante, as amostras devidamente marcadas foram cortadas e usinadas para a confecção dos corpos de prova para a realização de ensaios de desgaste no abrasômetro de roda de borracha. Os ensaios foram realizados no abrasômetro de roda de borracha situado no laboratório de soldagem e aspersão térmica da UTFPR, ilustrado pela Figura 24.

O ensaio de desgaste em abrasômetro de roda de borracha foi realizado seguindo-se as recomendações da norma ASTM G65-04:2010. Na norma em questão, especifica-se que para a realização dos ensaios, os corpos de prova deveriam possuir dimensões de 25 por 76 mm e espessura entre 3,2 até 12,7 mm.



Figura 24 - Abrasômetro de roda de borracha utilizado para os ensaios

Após a confecção dos corpos de prova, iniciaram-se os procedimentos para o ensaio de desgaste. Foi necessário limpar a superfície dos corpos de prova com um aparelho de limpeza por ultrassom, como mostrado na Figura 25, durante cinco minutos, para remoção de impurezas. Em seguida, os corpos de prova foram secados durante cinco minutos, para remoção da umidade.

O próximo passo foi pesar os corpos de prova com uma balança com precisão de 0,001g, ou seja, um miligrama, conforme ilustrado pela Figura 26. Foram realizadas três medições para cada corpo de prova para garantir que a massa anotada fosse a mais correta possível.

Antes da realização do ensaio de desgaste, foi necessário realizar o dressamento da roda de borracha, ou seja, desgastar parte da superfície do disco de borracha para garantir a homogeneidade da superfície, para que o disco exerça a mesma pressão sobre os corpos durante o desgaste. Antes da realização do ensaio de desgaste, foi necessária a realização da medição do diâmetro da roda com um paquímetro.



Figura 25 - Equipamento de limpeza por ultrassom.



Figura 26 - Balança utilizada para medição da massa dos corpos de prova

Os ensaios foram conduzidos utilizando o procedimento E da norma ASTM G65-2010 que prevê a duração do ensaio para cinco minutos, sob a ação de uma força de 130N a rotação da roda de borracha de 200rpm. Para cada novo ensaio, foi necessário novo dressamento da roda de borracha e nova medição do diâmetro da roda, pois os resultados de perda de massa levam em consideração o número de rotações durante o ensaio.

Após o ensaio, os corpos de prova foram limpos novamente por ultrassom durante cinco minutos, secados durante mais cinco minutos e enfim a massa dos corpos foi medida novamente. O procedimento foi repetido para todos os corpos de prova. Os resultados foram anotados na forma de perda de massa em gramas, mostrado pela Equação 7.

$$\textit{Perda de massa (g)} = \textit{Massa inicial CP (g)} - \textit{Massa final CP (g)} \quad \text{Equação 7}$$

Pelo fato do diâmetro da roda de borracha diminuir a cada ensaio, é necessário realizar uma correção no valor da perda de massa. O índice PMC (Perda de massa corrigida) indica a perda média de massa após os ensaios e pode ser calculado segundo a Equação 8.

$$\textit{PMC} = (\textit{Perda de massa}) \times \frac{228,6 \text{ mm}}{\textit{diâmetro da roda de borracha após o uso (mm)}} \quad \text{Equação 8}$$

Os resultados foram devidamente anotados e utilizados para análise após a finalização dos ensaios.

3.4.4 Ensaio de dureza

Após os ensaios de desgaste em roda de borracha, ainda foram realizados ensaios de dureza na superfície dos corpos de prova de revestimento duro. As medições foram realizadas em áreas da superfície dos corpos de prova que não foram desgastadas pelo ensaio em roda de borracha.

As superfícies das amostras foram limpas por ultrassom durante 5 minutos e depois secadas. Ao todo, foram realizadas cinco medições para cada amostra, totalizando 45 medições, sendo 15 para cada condição de soldagem.

Três medições foram realizadas utilizando uma distância de aproximadamente cinco milímetros entre cada medição, sendo a primeira medição realizada a aproximadamente cinco milímetros da marca de desgaste conforme ilustrado pela Figura 27. Mais duas medições foram realizadas, sendo estas realizadas a uma distância de aproximadamente oito milímetros das três primeiras medições.

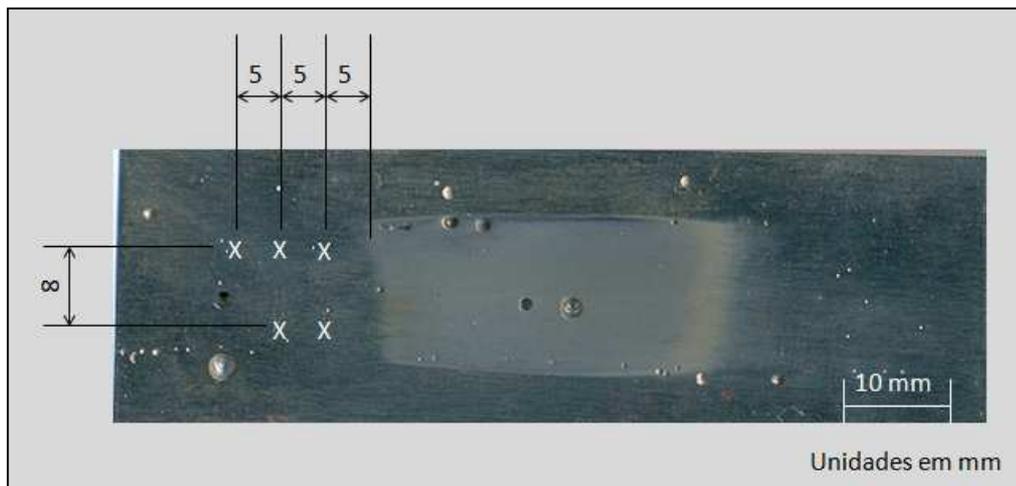


Figura 27 - Pontos onde a dureza foi avaliada

Os ensaios de dureza foram realizados num durômetro Emco, com os parâmetros de teste. O ensaio foi realizado utilizando-se o método Vickers HV30, aplicando-se uma carga de 30kgf, durante um tempo de 10s. Os resultados na escala

Vickers foram anotados e também foram convertidos pelo próprio *software* do durômetro para a escala HRC.

3.4.5 Análise do mecanismo de desgaste

Após a realização dos ensaios de desgaste abrasivo de roda de borracha, foi analisado o mecanismo de desgaste ocorrido nas superfícies. Como citado no capítulo 2, dependendo do mecanismo de desgaste abrasivo presente pode ocorrer uma maior perda de massa por arranque ou desprendimento de partículas por isso essa análise fez-se necessária.

As superfícies dos corpos de prova foram digitalizadas e as superfícies foram observadas em microscópios para observação dos mecanismos de desgaste. A porosidade e as trincas também foram analisadas para entender o efeito destas sobre a perda de massa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios e imagens obtidas analisando os seguintes fatores: a presença de defeitos superficiais nos corpos de prova, a quantidade de porosidade, a microestrutura gerada pelo processo, a dureza das amostras e a perda de massa obtida após os procedimentos experimentais.

4.1 Ensaio por líquido penetrante

A análise dos defeitos superficiais foi realizada através de um ensaio não destrutivo de líquido penetrante sobre todos os corpos de prova, após a deposição dos cordões de revestimento duro e resfriamento das amostras.

Nas amostras sem pré-aquecimento foram obtidos cordões que em sua superfície apresentaram diversas trincas transversais e porosidade, como se observa na Figura 28.

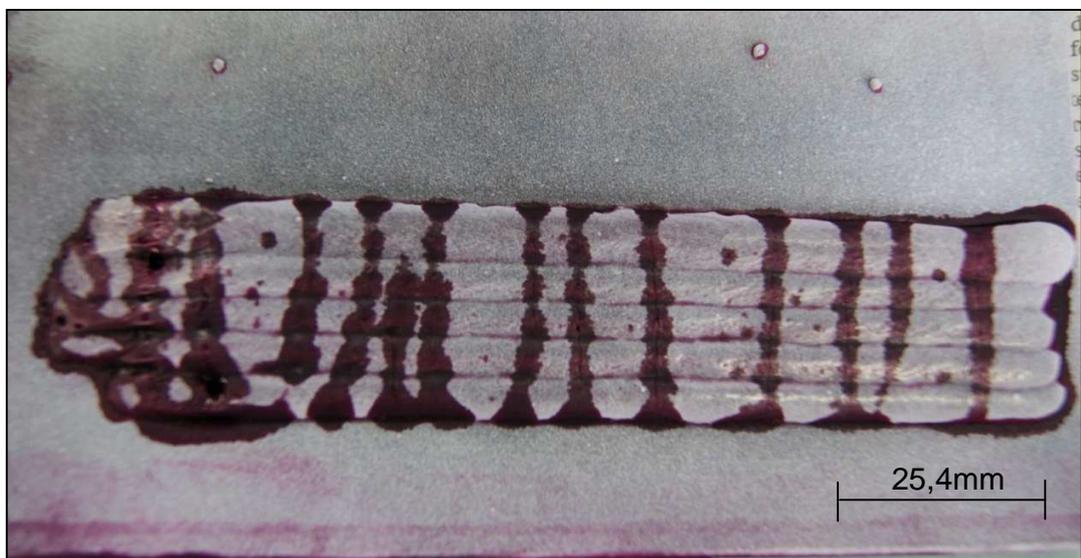


Figura 28 – Corpo de prova sem pré-aquecimento

Analisando as imagens da Figura 29 e da Figura 30, as amostras com temperatura de pré-aquecimento de 350°C e as amostras com pré-aquecimento de 450°C não apresentaram trincas superficiais. A amostra com pré-aquecimento a

350°C apresentou porosidade dispersa em sua superfície, no entanto, a quantidade de poros é menor quando comparada às amostras sem pré-aquecimento. A amostra pré-aquecida a 450°C apresentou menos porosidade ainda quando comparada às demais amostras.



Figura 29 – Corpo de prova com pré-aquecimento a 350°C

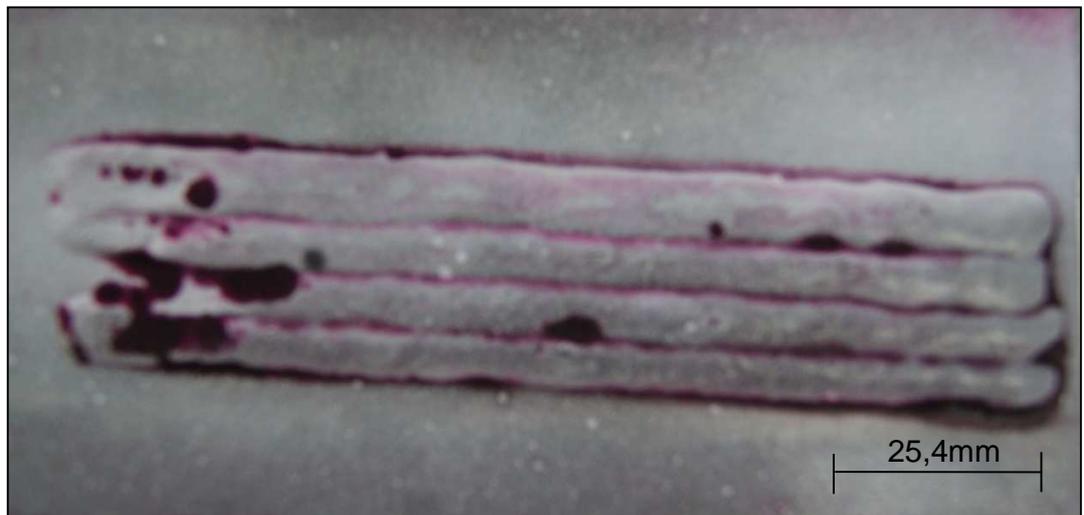


Figura 30 – Corpo de prova com pré-aquecimento a 450°C

As amostras com pré-aquecimento a 350°C e a 450°C não apresentaram trincas. Nesses dois casos a temperatura inicial da chapa foi maior devido ao pré-aquecimento e conforme as curvas de ciclo térmico de soldagem houve uma velocidade de resfriamento menor e uma diminuição nas contrações térmicas do material.

A Tabela 7 apresenta o resultado da comparação qualitativa das três amostras da análise das imagens obtidas pelos ensaios por líquidos penetrantes quanto a presença de trincas e porosidade.

Tabela 7 - Análise qualitativa da presença de trincas e porosidade superficial das amostras

Amostras	Trincas	Porosidade
T = 25°C	sim	maior
T = 350°C	não	médio
T = 450°C	não	menor

4.2 Porosidade

Durante a confecção dos corpos de prova para os ensaios de desgaste no abrasômetro de roda de borracha, foi detectada uma grande quantidade de porosidade. Conforme consta no *ASM Handbook* (1993), é comum obter-se uma quantidade razoável de porosidade e respingos em processos de soldagem com arame tubular autoprotégidos, pois estes não utilizam gases de proteção, tampouco utilizam um fluxo de soldagem, O Apêndice A mostra as medições da porosidade medida dos corpos de prova.

É possível observar uma diminuição na quantidade de porosidade com o aumento da temperatura de pré-aquecimento, como ilustrado pela Figura 31. Para a condição sem pré-aquecimento foi obtido uma média de 9% de porosidade, para a temperatura de pré-aquecimento de 350°C foi obtido 5% de média e para a condição de pré-aquecimento a 450°C foi mensurado 3% de média de porosidade. Os desvios padrões não foram altos, o que informa que as variações entre as medições não foram grandes.

A diminuição na porosidade pode ser explicada ao aplicar o pré-aquecimento há uma diminuição na velocidade de resfriamento e um aumento na temperatura de pico. Esses fatores fazem com que haja mais tempo para que o gás escape para a atmosfera antes da total solidificação do material. Portanto, quanto maior a temperatura de pré-aquecimento, menor a quantidade de porosidade obtida.

Nota-se claramente que um aumento na temperatura de pré-aquecimento gera menos porosidade, conforme mostrado na Figura 32. A porosidade nas três amostras se encontra na forma linear e com formato esférico.

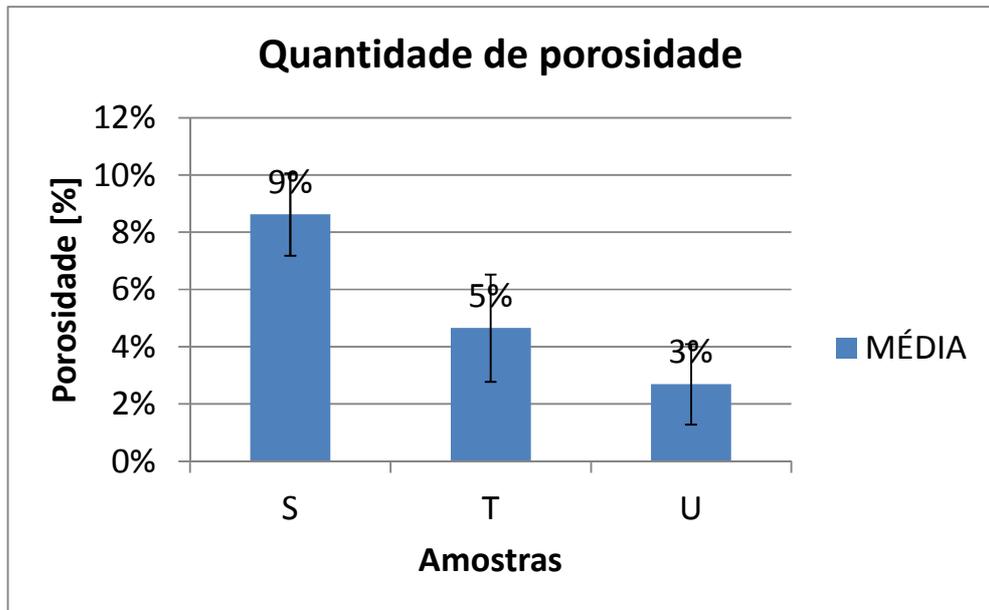


Figura 31 - Quantidade de porosidade

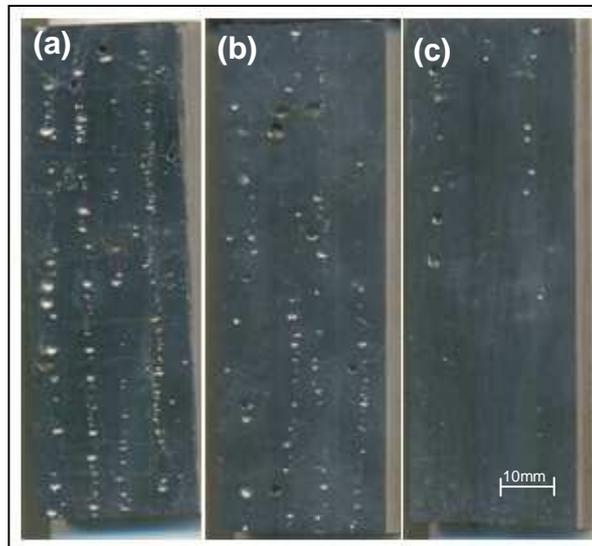


Figura 32 – Imagem em campo escuro das amostras: (a) sem pré-aquecimento, (b) pré-aquecimento a 350°C e (c) pré-aquecimento a 450°C

4.3 Dureza

Os resultados obtidos para todas as amostras nos ensaios de dureza nas escalas Rockwell C e Vickers estão representados no Apêndice B. O gráfico da Figura 33 mostra os valores médios obtidos durante os ensaios. As amostras sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento a 350°C e a 450°C obtiveram durezas superficiais de 60HRC, 57HRC e 53HRC, respectivamente. O catálogo do fornecedor do arame previa uma dureza entre 56HRC a 58HRC. (UTP, 2005)

Comparando os valores obtidos pelos ensaios realizados aos especificados em catálogo do fornecedor, não houve diferenças significativas para as amostras sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento a 350°C. No entanto, o valor obtido de 53HRC obtido pela amostra a 450°C foi consideravelmente menor que os valores obtidos para as outras amostras e pelo catálogo.

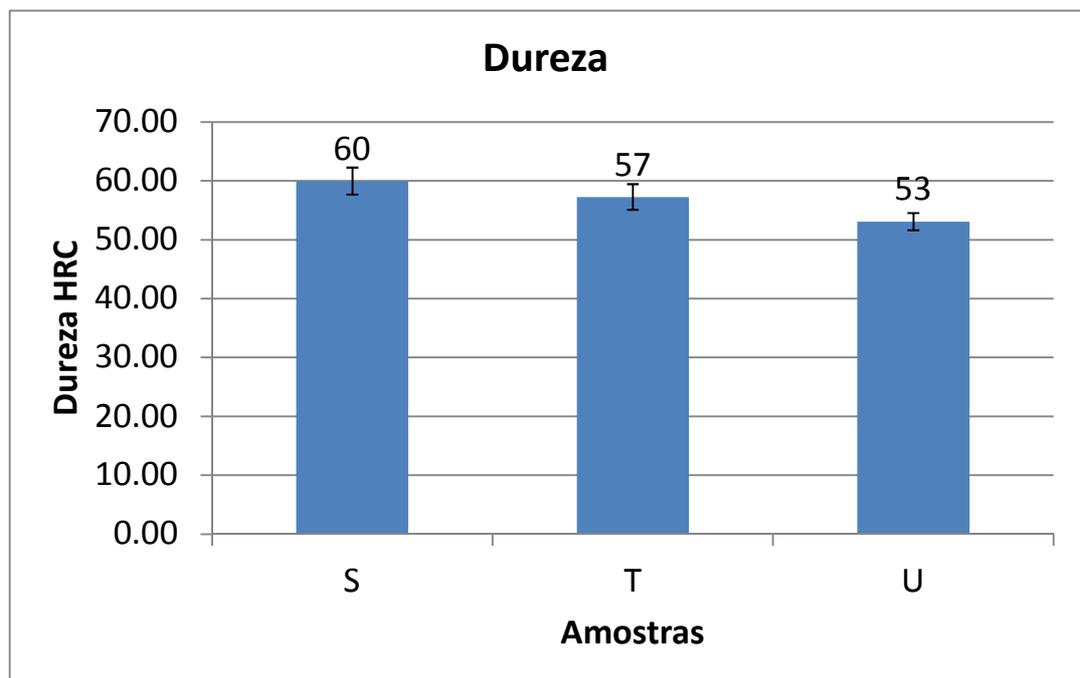


Figura 33- Dureza média obtida

As amostras sem pré-aquecimento com dureza 60 ± 2 HRC teve resultado semelhante ao comparar-se com a amostra pré-aquecida a 350°C, com 57 ± 2 HRC. A amostra pré-aquecidas a 450°C teve uma dureza menor em comparação às demais

amostras o que ocorre possivelmente devido a um aumento na temperatura de pico ocasionado uma diminuição na velocidade de resfriamento, gerando uma microestrutura menos dura e menos frágil.

4.4 Perda de massa

Os resultados dos ensaios de desgaste em roda de borracha em termos de perda de massa para todas as amostras estão mostrados no Apêndice C. A amostra sem pré-aquecimento obteve a maior perda de massa 0,233g, a maior perda de massa. A amostra com pré-aquecimento a 450°C obteve a menor perda de massa 0,21g e a amostra pré-aquecida a 350°C teve desempenho intermediário com uma perda de massa de 0,23g, conforme ilustrado no gráfico da Figura 34.

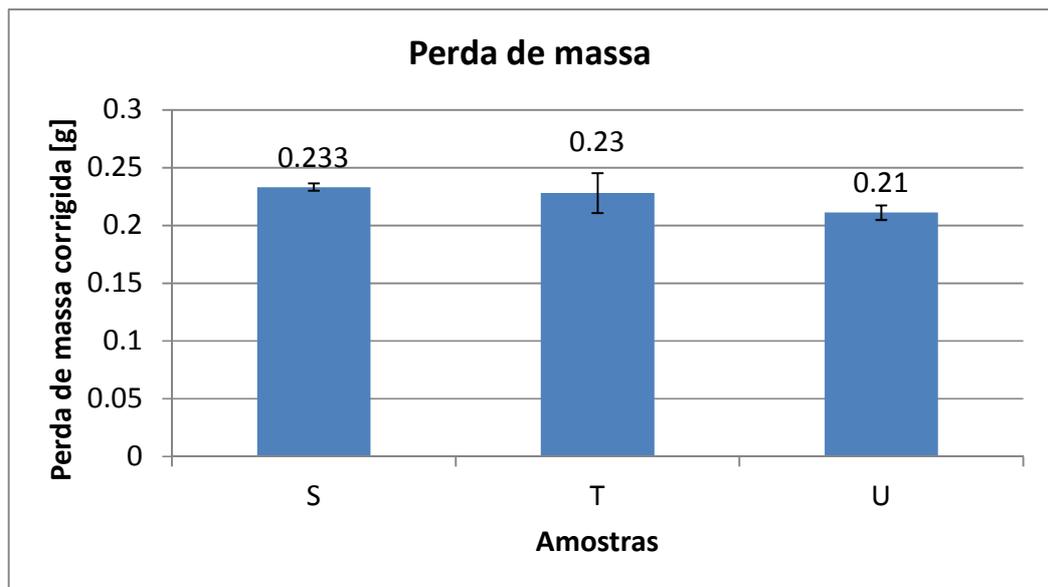


Figura 34 – Gráfico de barras com a representação da perda de massa.

Houve um desvio padrão elevado para a amostra pré-aquecida a 350°C. A elevada quantidade de poros pode ter ocasionado esta variação, uma vez que, eles podem ocasionar mecanismos de desgaste diferentes. Há uma tendência para a diminuição na perda de massa conforme se aumenta a temperatura de pré-aquecimento.

A condição sem pré-aquecimento e a condição pré-aquecida a 350°C apresentaram durezas semelhantes e perdas de massa semelhantes. A variação nesta perda de massa pode ter sido ocasionada pela presença de trincas e uma elevada quantidade de porosidade. A elevada dureza e a presença de trincas pode ter ocasionado desprendimento por fratura frágil durante os ensaios de desgaste. Além disso, a quantidade de porosidade pode ter resultando em maiores perdas de massa.

A amostra pré-aquecida a 450°C obteve melhores resultados nos ensaios de desgaste em roda de borracha, a porosidade foi a menor entre as amostras, a dureza também foi menor e não apresentou trincas superficiais.

4.5 Mecanismo de desgaste

Após análise nas três amostras desgastadas no abrasômetro de Roda de Borracha foi possível concluir que as três amostras apresentaram o mesmo tipo de mecanismo de desgaste, microcorte, como mostrado pelas Figura 35, Figura 36 e Figura 37.

As figuras ilustram os corpos de prova e no detalhe qual a região onde as fotos foram tiradas para análise. Para as três condições é possível observar que as imagens obtidas pelo microscópio aumentadas em 200 vezes são muito semelhantes, apresentando diversos riscos em sua superfície. As setas apontam a direção do fluxo de abrasivos durante o ensaio de desgaste Roda de Borracha.

As três condições apresentaram mecanismos de desgaste abrasivo de microcorte em suas superfícies, no entanto, a quantidade de riscos observada foi diferente para as amostras. As superfícies da amostras sem pré-aquecimento, Figura 35, e pré-aquecida a 350°C, Figura 36, apresentaram um número menor de riscos quando comparadas à superfície da amostra pré-aquecida a 450°C, Figura 37.

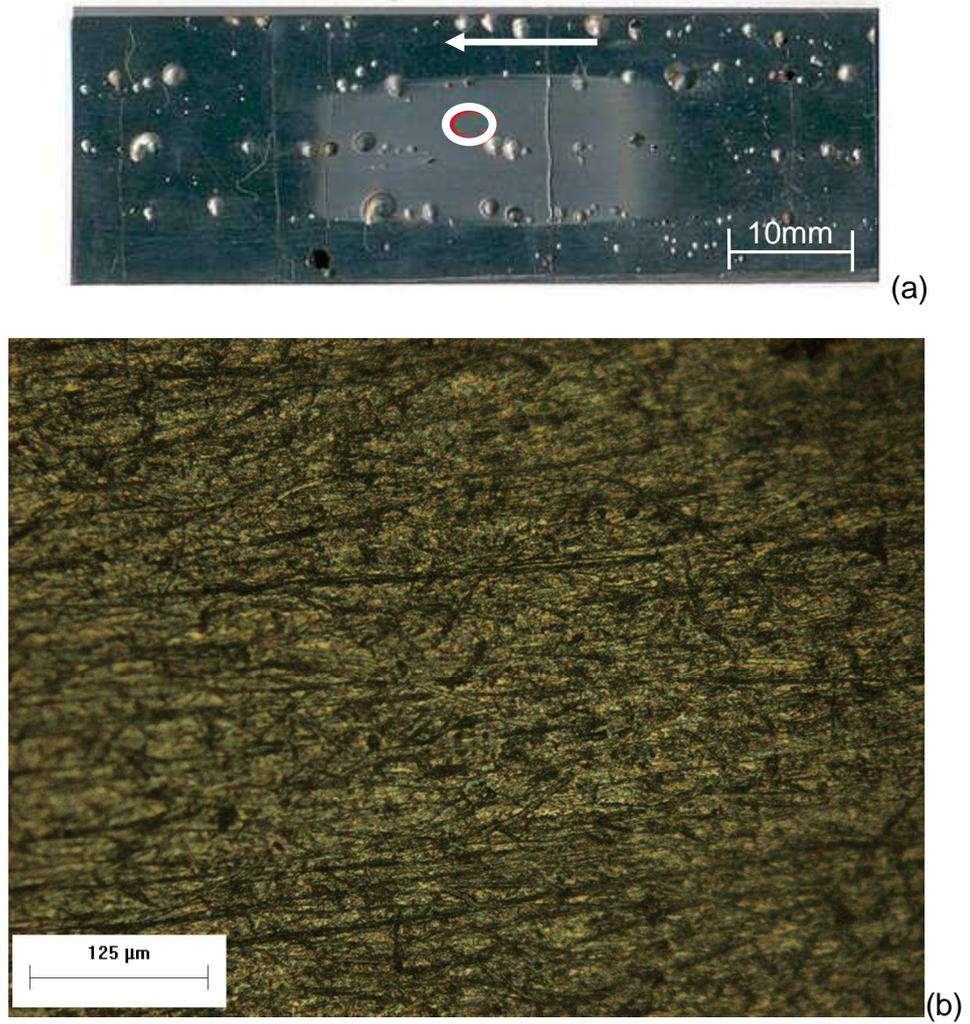


Figura 35 – Corte na superfície do corpo de prova S3 sem pré-aquecimento após desgaste no abrasômetro. (a) Imagem em campo escuro. (b) Imagem no microscópio com aumento de 200 vezes.

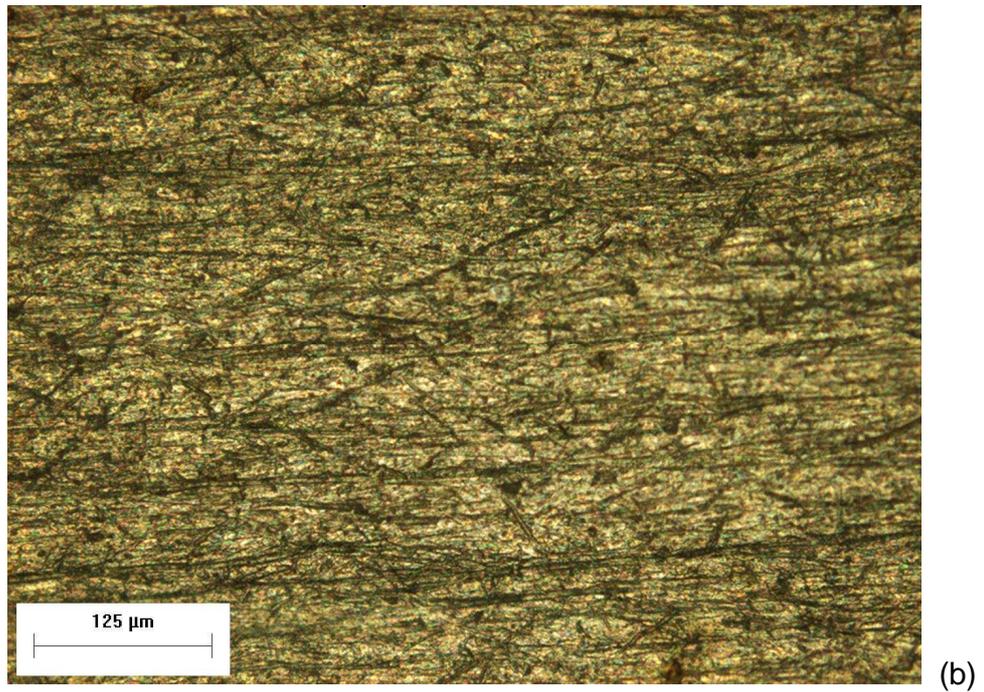
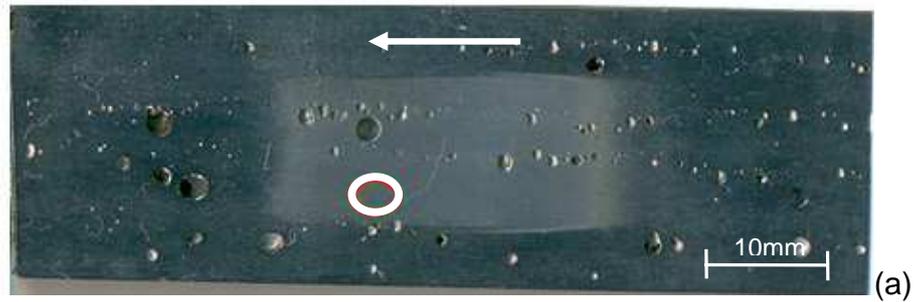


Figura 36 – Corte na superfície do corpo de prova T1 pré-aquecida a 350°C após desgaste no abrasômetro. (a) Imagem em campo escuro. (b) Imagem obtida no microscópio com aumento de 200 vezes.

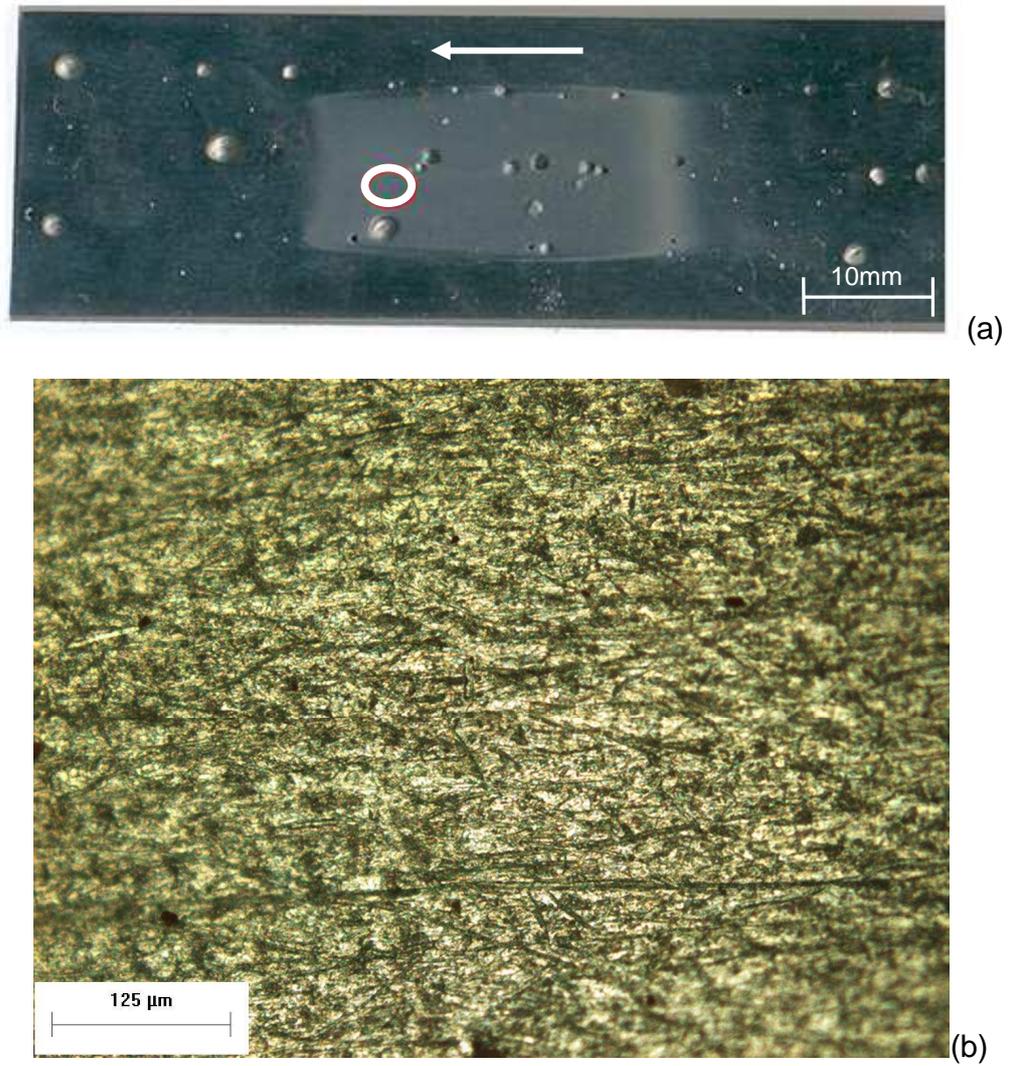


Figura 37 - Corte na superfície do corpo de prova U1 pré-aquecida a 450°C após desgaste no abrasômetro. (a) Imagem em campo escuro. (b) Imagem obtida no microscópio com aumento de 200 vezes.

A porosidade assim como as trincas apresenta efeito semelhante, como observado pela Figura 38b. Nesta imagem pode-se observar que dois pequenos pedaços de metal estão se desprendendo do metal base, confirmando o que Buchanan *et. al.* (2007) afirma em sua pesquisa.

Concordando com Carmona (2011), a presença de trincas afeta diretamente na perda de massa, pois como se pode observar na Figura 38c pequenos fragmentos de material se destacam do metal. Esses fragmentos de metal que se desprendem causam uma perda de massa mais acentuada.

As trincas e a porosidade aumentaram a perda de massa devido ao desprendimento de partículas, o que confere com os resultados inscritos na Tabela 8. Conforme a quantidade de porosidade aumentou, observou-se uma maior quantidade de perda de massa.

Tabela 8 - Relação presença de trincas, quantidade de porosidade, dureza e perda de massa obtidas após ensaio de abrasão Roda de Borracha

Amostras	Trincas	Porosidade [%]	Dureza [HRC]	Perda de massa [g]
T = 25°C	Sim	9	60	0,233
T = 350°C	Não	5	57	0,23
T = 450°C	Não	3	53	0,21

Chang *et. al.* (2005) propuseram que quanto maior a dureza de um revestimento melhor seria seu desempenho no desgaste abrasivo, as amostras com maior dureza apresentaram maiores perdas de massa e a amostra com menor dureza apresentou menor perda de massa. Se o mecanismo de desgaste abrasivo gerado fosse apenas de microcorte, levaria a obedecer à relação de que quanto maior a dureza do material, menor a perda de massa. Portanto, houve fratura frágil em conjunto ocasionando maiores perdas de massa.

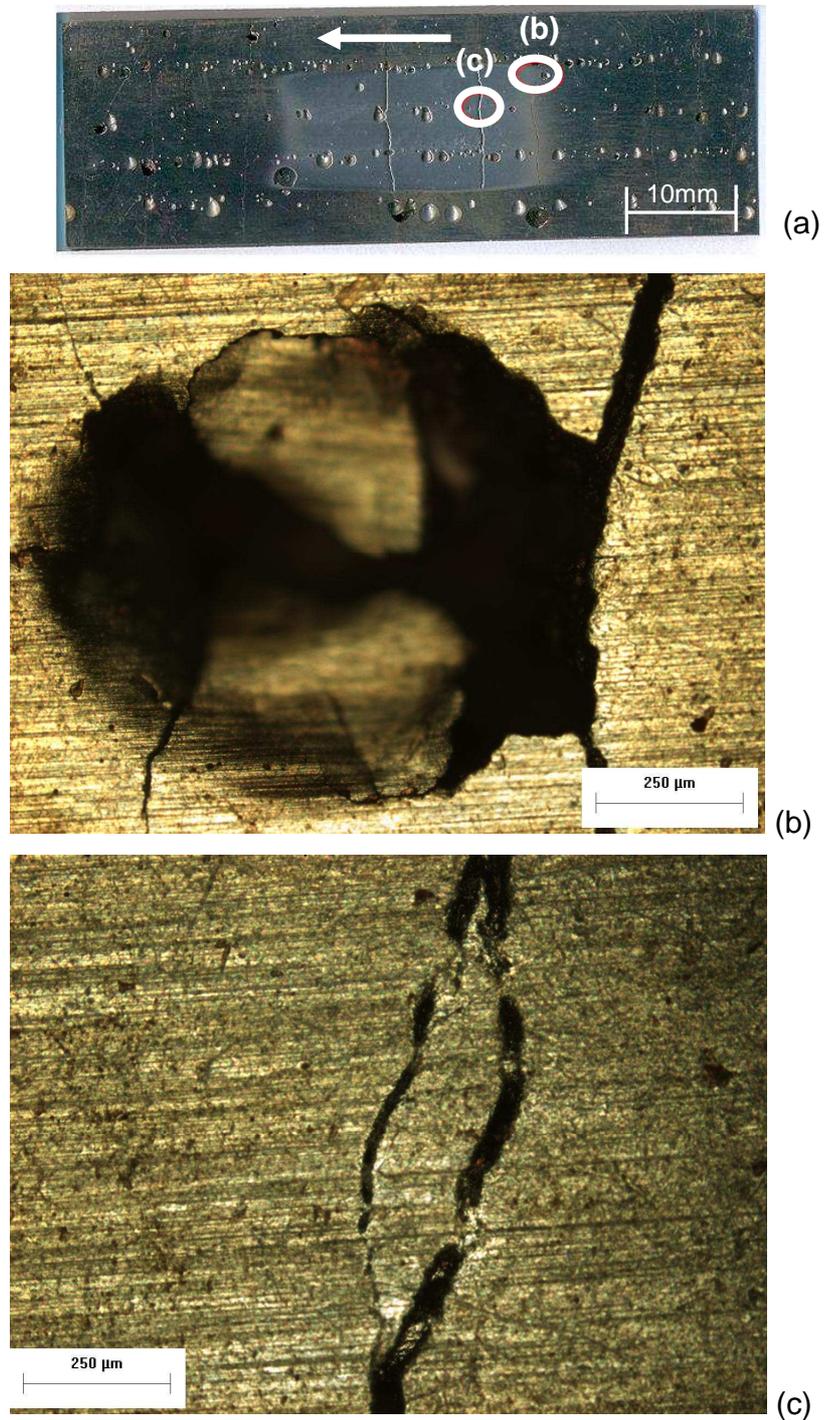


Figura 38 – Detalhe do desprendimento de pedaços do corpo de prova da amostra S1 sem pré-aquecimento. (a) Imagem em campo escuro. (b) Detalhe do poro e (c) Detalhe da trinca.

5 CONCLUSÕES

Para os parâmetros de soldagem utilizados e as variações nas temperaturas de pré-aquecimento das amostras, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- O pré-aquecimento evitou o aparecimento de trincas superficiais nos materiais submetidos às condições pré-aquecidas;
- O pré-aquecimento causou a redução de porosidade. Nas amostras obtidas, quanto maior o pré-aquecimento menor a quantidade de porosidade superficial obtida;
- Quanto maior a temperatura de pré-aquecimento, menor a dureza obtida;
- O mecanismo de desgaste abrasivo observado para todas as amostras foi o de microcorte. Nas trincas e na porosidade, o mecanismo observado foi o desprendimento de partículas por fratura frágil, que gerou maiores perdas de massa.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar análise detalhada da microestrutura. Analisar o tamanho, distribuição de carbonetos e a diluição do revestimento;
- Variar os parâmetros de soldagem, como a corrente e tensão para verificar os efeitos destas sobre a perda de massa dos materiais;
- Realizar uma análise com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura para melhor detalhamento dos mecanismos de desgaste;
- Relacionar a microestrutura dos cordões com os mecanismos de desgaste;
- Determinar as tensões residuais geradas e relacionar com os mecanismos de desgaste abrasivo, perda de massa, dureza e microestrutura obtidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM); *METALS HANDBOOK VOL. 6; Welding, Brazing and Soldering*. 1993.

American Society for Testing and Materials (ASTM). **ASTM G65: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**. Pennsylvania, 2010.

ANDREWS, K.W. *Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures*. **Journal of the Iron and Steel Institute**, Vol. 203, p.721-727, Jul. 1965.

BUCHANAN, V.E.; MCCARTNEY, D.G.; SHIPWAY, P.H.; *A comparison of the abrasive wear behavior of iron-chromium based hardfaced coatings deposited by the SMAW and electric arc spraying*. **Wear**. Vol. 264 p. 542 – 549. Abril 2007. Disponível em: <www.sciencedirect.com> Acesso em: 20.10.2012

BUCHELY, M. F.; GUTIERREZ, J. C.; LÉON, L.M.; TORO, A. *The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys*. **Wear**. Vol.256. 1^a-6^a Edições. Ago/2005. p. 52-61. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em 15.10.2011

BUDINSKI, K. G.; **Wear Modes**. USA: Editora Prentice Hall, 1998.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering – An Introduction**. 7^a Edição. Nova Iorque: John Willey and Sons, Inc, 2007.

CARMONA, D. G. **Aplicação de revestimento duro utilizando o processo arame tubular com e sem adição de arame não energizado para diferentes tipos de consumíveis**. 2011. 120p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – MG, Brasil.

CHANG, Chia-Ming; CHEN, Yen-Chun; WU, Weite. *Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe-Cr-C hardfacing alloy*. **Tribology International**. Vol.43. 5^a e 6^a Edições. p.929-934. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X0900382X>>. Acesso em: 17.10.2011

CHATTERJEE, S.; PAL TK. *Wear behavior of hardfacing deposits on cast iron*. **Wear**. Vol. 255. P. 417-425. Abril, 2003. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 01.05.2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7ª Edição. ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo, 2008.

CORONADO, John J.; CAICEDO, Holman F.; GÓMEZ, Adolfo L.. *The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits*. **Tribology Internacional** Vol.42. 5ª Edição. p.745-749. mai. 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X08002211>>. Acesso em 20.10.2011.

DAVIS, J.R.; Davis & Associates. *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. **ASM International**. USA, 2001.

HUTCHINGS, I.M.; **Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials**. Editora Butterworth Heinemann. Oxford, 1992.

KIRCHGAßNER, M.; BADISCH, E.; FRANEK, F.. *Behavior of iron-based harfacing alloys under abrasion and impact*. **Wear**. Vol. 265. P. 772-779. Março, 2008. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 20.02.2012.

LEE, H. W. *Weld metal hydrogen-assisted cracking in thick steel plate weldments*. **Material Science and Engineering A**. Volumes 445-446. p.328-335. Fev. 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509306020302>>. Acesso em: 18.10.2011.

LIMA, Aldemi Coelho; FERRARESI, Valtair Antônio. Análise da microestrutura e da resistência ao desgaste de revestimento duro utilizado pela indústria sucroalcooleira. **Soldagem e Inspeção**. São Paulo, Vol. 14, No. 2, p.140-150, jun. 2009. Disponível em: <<http://abs-soldagem.org.br/s&i>>. Acesso em: 19.10.2011.

LINCOLN ELECTRIC; **Hardfacing Guide Product and procedure selection**. Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com>>. Acesso em: 19.10.2011.

MARQUES, Paulo Villani. **Tecnologia da soldagem**. 1ª Reimpressão. Belo Horizonte: Editora “O LUTADOR”, 2002.

MARQUES, Paulo Villani; LEITE, Ricardo V. de Melo. Estudo comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares. **Revista Soldagem e Inspeção**. São Paulo, Vol. 14, No. 4, p. 239-335. Out/Dez, 2009. Disponível em: <<http://abs-soldagem.org.br/s&i>> Acesso em: 19.10.2011

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

NOBLE, D. N.; *Factor which affect Abrasive Wear Resistance of Hardfacing Weld Deposits - A review of Literature*. **The Welding Institute**. 26p. Outubro, 1984.

SVERDLIN, A.V.; NESS, A.R. *The Effects of alloying elements on the Heat Treatment of Steel*. **Steel Heat Treatment Handbook**. Nova Iorque, 1997.

TOTTEN, E. George. **Steel Heat Treatment Handbook. Second Edition**. 2ª Edição. Editora Taylor & Francis Group, 2007.

UTP. **UTP Manual**. 2005.

ZUM GAHR, K. H.; *Wear by Hard Particles*. **Tribology International**. Vol. 31, No. 10, p. 586-596. Outubro, 1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X98000796>> Acesso em: 20.10.2012.

APÊNDICE A – TABELA QUANTITATIVA DA POROSIDADE

Medição	AMOSTRAS								
	S			T			U		
	T = 23°C			T= 350°C			T= 450°C		
	S1	S2	S3	T1	T2	T3	U1	U2	U3
1	7.6869%	5.9607%	9.4286%	2.9281%	5.0942%	5.3602%	5.4186%	3.3805%	5.7818%
2	8.0680%	8.7331%	10.2381%	8.5492%	5.3338%	2.6301%	1.5879%	2.0337%	1.9214%
3	8.4679%	8.5133%	9.1488%	6.2477%	6.5474%	6.1607%	2.4220%	2.3973%	2.4948%
4	6.5676%	8.8823%	7.7917%	3.1691%	4.0893%	3.0017%	3.3859%	4.0337%	1.9214%
5	9.0400%	11.9326%	8.3988%	5.0849%	2.3080%	3.4591%	3.1140%	1.4141%	2.0633%
6	9.0400%	9.6472%	7.0060%	5.4163%	5.6424%	1.9392%	5.0108%	0.5926%	1.0050%
7	7.1056%	11.9270%	7.7917%	5.9826%	2.6664%	7.8895%	3.9790%	0.5724%	1.8859%
8	8.3472%	9.5326%	7.8036%	4.3439%	6.2670%	1.6223%	2.6437%	3.4209%	2.0633%
MÉDIA	9%			5%			3%		
DESV. PAD	1%			2%			1%		
	9±1			5±2			3±1		

APÊNDICE B – TABELAS QUANTITATIVAS DE DUREZA

Amostras	S1	S2	S3	T1	T2	T3	U1	U2	U3
	23°C	23°C	23°C	350°C	350°C	350°C	450°C	450°C	450°C
	[HRC]	[HRC]	[HRC]	[HRC]	[HRC]	[HRC]	[HRC]	[HRC]	[HRC]
1	62.7	62.0	61.4	60.8	56.7	58.4	53.9	54.7	55.1
2	60.8	61.0	59.2	60.5	56.1	57.7	53.8	53.9	54.0
3	62.6	57.8	58.2	59.5	55.0	57.2	53.6	53.7	53.6
4	62.6	57.2	57.6	59.2	54.7	55.3	50.6	51.6	53.3
5	62.3	56.6	57.5	58.6	54.2	55.0	50.5	51.1	52.6
Média	62.2	58.92	58.78	59.72	55.34	56.72	52.5	53.0	53.7
Média	60			57			53		
Desvio	2			2			1		
	60±2			57±2			53±1		

Amostras	S1	S2	S3	T1	T2	T3	U1	U2	U3
	23°C	23°C	23°C	350°C	350°C	350°C	450°C	450°C	450°C
	[HV30]	[HV30]	[HV30]	[HV30]	[HV30]	[HV30]	[HV30]	[HV30]	[HV30]
1	766	746.0	731	715	628	663	576	591	598
2	716	719.0	680	709	617	649	574	575	578
3	764	650	650	686	596.0	638	571	572	571
4	762	638	646	680	590	603	522	538	565
5	755	626	644	667	583	596.0	520	530	553
Média	753	676	670	691	603	630	553	561	573
Média	700			641			562		
Desvio	53			44			24		
	700±53			641±44			562±24		

APÊNDICE C – TABELA QUANTITATIVA DA PERDA DE MASSA

Amostras	Início [g]	Fim [g]	Diferença [g]	Diâmetro Roda [mm]	Diferença corrigida [g]	Média [g]	Média [g]	Desvio padrão
S2	126.6252	126.3961	0.2291	221.78	0.2361	0.2362	0.233	0.003
	126.6252	126.3960	0.2292		0.2362			
	126.6252	126.3961	0.2291		0.2361			
S3	122.1456	121.9223	0.2233	221.52	0.2304	0.2304		
	122.1456	121.9223	0.2233		0.2304			
	122.1454	121.9221	0.2233		0.2304			
T2	101.4784	101.2419	0.2365	221.7	0.2439	0.2439		
	101.4783	101.2418	0.2365		0.2439			
	101.4783	101.2418	0.2365		0.2439			
T3	112.5175	112.3118	0.2057	221.42	0.2124	0.2123		
	112.5175	112.3118	0.2057		0.2124			
	112.5173	112.3118	0.2055		0.2122			
U1	101.5964	101.3970	0.1994	221.88	0.2054	0.2054		
	101.5965	101.3972	0.1993		0.2053			
	101.5966	101.3971	0.1995		0.2055			
U2	114.4080	114.1970	0.211	221.58	0.2177	0.2177		
	114.4081	114.1971	0.211		0.2177			
	114.4081	114.1970	0.2111		0.2178			
U3	114.2536	114.0554	0.1982	221.36	0.2047	0.2047		
	114.2536	114.0554	0.1982		0.2047			
	114.2535	114.0552	0.1983		0.2048			