



**ANDRÉ LUIS GONÇALVES COSTA**

**VIABILIDADE TÉCNICA DE REVESTIMENTO  
DURO POR SOLDAGEM FCAW EM FACAS DE  
CORTE DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**LAVRAS – MG**

**2019**

**ANDRÉ LUIS GONÇALVES COSTA**

**VIABILIDADE TÉCNICA DE REVESTIMENTO DURO POR  
SOLDAGEM FCAW EM FACAS DE CORTE DE  
CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães (UFLA)

Orientador

Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro (CEFET-MG)

Coorientador

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo (UFLA)

Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2019**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Costa, André Luis Gonçalves

Viabilidade técnica de revestimento duro por soldagem  
FCAW em facas de corte de cana-de-açúcar / André Luis Gon-  
çalves Costa. - 2019.

150 p.

Orientador(a): Ricardo Rodrigues Magalhães.

Coorientador(a): Carlos Alberto Carvalho Castro, Giovanni  
Francisco Rabelo.

Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2019.  
Bibliografia.

1. Faca de corte basal. 2. Revestimento duro. 3. Abrasão. I.  
Magalhães, Ricardo Rodrigues. II. Castro, Carlos Alberto Carvalho.  
III. Rabelo, Giovanni Francisco. IV. Título.

**ANDRÉ LUIS GONÇALVES COSTA**

**VIABILIDADE TÉCNICA DE REVESTIMENTO DURO POR  
SOLDAGEM FCAW EM FACAS DE CORTE DE  
CANA-DE-AÇÚCAR  
TECHNICAL FEASIBILITY OF HARD COATING BY FCAW  
WELDING IN SUGARCANE CUTTING KNIVES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 14 de junho de 2019.

Dr. Prof. Américo Scotti	University West
Dr. Prof. Fábio Lúcio Santos	UFLA
Dr. Prof. Giovanni Francisco Rabel	UFLA
Dr. Prof. Carlos Alberto Carvalho Castro	CEFET-MG

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães (UFLA)  
Orientador

Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro (CEFET-MG)  
Co-Orientador

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo (UFLA)  
Co-Orientador

**LAVRAS – MG  
2019**

*Em memória ao meu pai Lair Andrade Costa.  
À minha mãe Margarida pelas orações, carinho e pelo apoio.  
À minha esposa Alessandra que não hesitou em me ajudar.  
Aos meus filhos Ana Luisa e Thiago que são os frutos que alimentam  
minha alma.*

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade.

À CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao CEFET - MG unidade de Varginha, por ceder o espaço, estrutura e apoio técnico do Laboratório de Soldagem e em especial ao Professor Carlos Alberto Castro e ao Técnico de Laboratório Eduardo Pereira da Silva.

Aos Técnicos de Laboratório da UFLA Bruno Vicentini e Fabiano José Ferreira, pelo apoio, paciência e dedicação.

Ao Professor Ricardo Rodrigues Magalhães, pela orientação, paciência e apoio.

Ao Professor Giovanni Francisco Rabelo, pelas orientações e apoio.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da UFLA e em especial ao Professor Eduardo Alves por ter cedido os equipamentos e as Técnicas Elisa de Melo Castro e Aline Norberto Ferreira pelo apoio.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Óptica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSJ, por ceder o espaço, estrutura e apoio técnico e em especial a Professora Roseli Marins Balestra.

Ao Laboratório de Raios X do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - UFMG em especial ao Técnico Samuel Barbosa Lima e ao Professor Vicente Tadeu Lopes Buono que cedeu o equipamento para as análises.

Ao Laboratório de do Departamento de Ciências dos Alimentos da UFLA, em especial a Professora Elisângela Elena Nunes Carvalho por ceder os equipamentos e apoio técnico.

Ao Departamento de Ciências da Computação da UFLA.

À empresa COMASO INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE ELETRODOS ESPECIAIS em nome de seu diretor Frederico, pelo apoio técnico e ter cedido o arame de soldagem.

À empresa AGRICORTE, em nome do seu diretor Moacyr Luiz Milanez, por cederem material revestido de revestimento duro.

À empresa Moinho Gerais em nome do seu diretor Ogmar Castele Panzera e colaboradores Cleison Moreira Batista e Edivaldo de Souza Fernandes, por ceder a areia utilizada nos ensaios de abrasão, e apoio técnico.

À empresa Metalúrgica Lavras em nome do seu diretor José Carlos Rodrigues, pelo apoio técnico e serviços prestados.

A empresa Cachaça Bocaina em nome de seu diretor Antônio Claret Sales, pelo material cedido e apoio técnico.

[...] A todos os colaboradores e professores de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFLA.

Aos Professores Paulo José Modenesi e Américo Scotti, por toda ajuda e orientações.

Ao Professor José Guilherme Lembi Ferreira Alves, por toda ajuda e orientações.

À minha mãe Margarida pelo amor e apoio incondicional, em todas as decisões, nas diferentes etapas de minha vida, aos meus irmãos Francisco José e Christiane.

À minha esposa Alessandra, pelo companheirismo, amor, apoio e incentivo.

**MUITO OBRIGADO!**

## RESUMO

A agroindústria canavieira ocupa 10.184.340 hectares de terras aráveis no Brasil. Para colher esta safra, são necessários equipamentos cada vez mais tecnológicos e a cana-de-açúcar utiliza um sistema de corte basal com facas. Neste caso, as facas apresentam rápida deterioração devido ao processo de abrasão considerando a sílica contida no solo. Requer a aplicação de revestimento duro em facas. Os revestimentos duros geralmente possuem adição de cromo em sua composição química. O cromo é usado para aumentar a vida útil dos componentes da máquina agrícola. A partir da necessidade de reduzir os níveis de elementos químicos presentes em solos agrícolas, prejudiciais aos seres humanos e animais, torna-se necessário o uso de alternativas para a substituição de cromo em ligas de revestimento duro. Este trabalho tem como objetivo propor uma alternativa para o uso de pasta de carboneto de tungstênio (WC), que utiliza cromo em sua composição, por um revestimento à base de carboneto de titânio, sem a adição de cromo. Para este propósito, foi utilizado o processo de soldagem por arame tubular (FCAW), contendo elementos de liga que proporcionavam resistência à abrasão e aumento da vida útil. Para determinar os parâmetros de soldagem, foi utilizada a otimização de resposta simultânea. Para fins de validação, testes de desgaste por abrasão foram realizados usando uma máquina de roda de borracha e areia seca para comparar a resistência à abrasão entre o material proposto e o usado em facas comerciais. Resultados obtidos por meio de testes de desgaste acelerado mostraram que o revestimento proposto, sem a adição de cromo, apresentou desempenho 48% superior ao revestimento WC. Isso possibilita investigações adicionais no campo para um novo processo de deposição de revestimentos duros via processo de soldagem FCAW sem a adição de cromo.

**Palavras-chave:** Facas de corte basal. Revestimento duro. Abrasão.

## ABSTRACT

The sugarcane agroindustry occupies 10,184,340 hectares of arable land in Brazil. In order to harvest this crop, increasingly technological equipment is required and sugarcane uses a basal cutting system with knives. In this case, knives present fast deterioration due to abrasion process considering the silica contained in the soil. It requires the application of hard coating in knives. Hard coatings generally has the addition of chromium in its chemical composition. Chromium is used to increase the service life of agricultural machine components. From the need to reduce levels of chemical elements present in agricultural soils, harmful to humans and animals, studies involving alternatives for the chromium replacement in hard coating alloys becomes necessary. This work is aimed to propose an alternative for the use of tungsten carbide paste (WC), which uses chromium in its composition, by a coating based on titanium carbide, without the addition of chromium. For this purpose, Flux-cored arc welding (FCAW) process was used, containing alloy elements that provided abrasion resistance and service life increasing. In order to determine welding parameters, simultaneous response optimization was used. For validation purposes, abrasion wear tests were performed by using a rubber wheel machine and dry sand in order to compare the abrasion resistance between the proposed material and that used in commercial knives. Results obtained by means of accelerated wear tests showed that the proposed coating, without the addition of chromium, had performance 48% higher than WC coating. This enable further investigations in the field for a new process of hard coating deposition via FCAW welding process without the addition of chromium.

**Keywords:** Basking Cutter Knives. Hard Coating. Abrasion.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 5.1 – Mapa das áreas onde se encontram as plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade. . . 29
- Figura 5.2 – Colheita mecanizada sem pré-queimada de cana-de-açúcar: alto custo associado . . . . . 32
- Figura 5.3 – Perda de cana-de-açúcar "estilhaçada" no campo, em razão de não existir controle da qualidade do processo de colheita da cana-de-açúcar, sendo fundamental para reduzir as perdas. . . . . 33
- Figura 5.4 – Desperdício de cana devido à colheita incorreta. . . . . 33
- Figura 5.5 – Geometria de contato entre uma partícula abrasiva cônica idealizada e uma superfície: (a) vista em perspectiva; (b) seção em elevação; (c) seção na vista de planta. . . . . 39
- Figura 5.6 – Representação esquemática do abrasômetro de três corpos usado em testes. . . . . 41
- Figura 5.7 – (A) Superfície inicial do revestimento de WC-12% Co com pulverização térmica ( $1.200 \pm 200$  HV30). (B) Mesmo revestimento usando sílica com tamanho de grão de 0,19 mm, em um teste de três corpos. Observe várias ranhuras. (C) O mesmo revestimento usando alumina com tamanho de grão de 0,26 mm. Observe o corte e deformação plástica. As ranhuras na Figura (C) são mais largas que os carbonetos . . . . . 42

Figura 5.8 – Ilustração esquemática de cinco métodos comuns usados para medir as taxas de desgaste abrasivo dos materiais: (a) pino no disco abrasivo; (b) pino na placa abrasiva; (c) pino no tambor abrasivo; (d) teste de abrasão da roda de borracha; e) Ensaio de abrasão em microescala. . . . .	44
Figura 5.9 – Abrasômetro Pino sobre Disco. . . . .	44
Figura 5.10 – Esquema do equipamento de ensaio de abrasão de borracha de rodas com Areia seca. . . . .	47
Figura 5.11 – Determinação da classificação dos métodos de engenharia de superfície. . . . .	48
Figura 5.12 – Representação esquemática do processo Arames Tubulares: a) com proteção gasosa e b) autoprotégido. . .	51
Figura 5.13 – Comparação entre os perfis de cordões de solda efetuados com arames sólidos (maciços) e tubulares. . . . .	54
Figura 5.14 – Representação esquemática da seção transversal do revestimento soldado. Onde P - penetração, Ad - área do metal depositado e Af - área fundida. . . . .	55
Figura 5.15 – Fotos de facas de corte basal desgastadas. . . . .	59
Figura 5.16 – Revestimento da faca corte de base em carboneto de tungstênio. Máquina de Indução JAMO. . . . .	59
Figura 5.17 – Facas desfibradoras desgastadas e recuperadas com o processo de deposição de metal duro com o processo de soldagem FCAW. . . . .	60
Figura 5.18 – Chapa de testes e região de extração dos corpos de prova (CP de desgaste) para avaliação de desgaste de dimensões 10 x 25 x 55 mm. . . . .	61

Figura 5.19 – Vista de uma Faca Picadora. (a) Perfil e dimensões do bisel. (unidade mm); (b) Detalhe de uma faca após aplicação do revestimento de dimensões de 24 x 180 x 580 mm. . . . .	61
Figura 5.20 – Abrasômetro Roda de borracha: (a) esquema padronizado pela ASTM (2000) e (b) equipamento construído por Stevenson e Hutchings (1996). . . . .	62
Figura 5.21 – Percentagem de amostras com concentrações acima do valor de referência inferior nas amostras LUCAS de terras agrícolas. . . . .	66
Figura 5.22 – Percentagem de amostras com concentrações acima do valor de referência mais elevado em amostras LUCAS de terras agrícolas. . . . .	68
Figura 5.23 – Mapas interpolados da razão entre as concentrações de amostras de solo Cr em solo agrícola - Ap (a) e solo de pastagem - Gr (b). . . . .	69
Figura 6.1 – Fluxograma das etapas do projeto . . . . .	70
Figura 6.2 – Fonte de Soldagem Marca Lincoln Electric , Modelo Idealarc CV 420, com cabeçote tracionador de arame Modelo LF33 . . . . .	71
Figura 6.3 – Método experimental – 1ª Fase . . . . .	72
Figura 6.4 – Método experimental – 2ª Fase . . . . .	72
Figura 6.5 – Representação esquemática do delineamento composto central rotacional (DCCR). . . . .	75
Figura 6.6 – Bancada experimental. (1) bancada, (2) Carro deslocador da tocha , (3) Suporte de posicionamento da tocha, (4) Tocha de Soldagem, (5) Cabo Terra, (6) Amostra, (7) Fonte de soldagem e Cabeçote alimentador. . . . .	76

Figura 6.7 – Amostra para soldagem, chapa de aço carbono SAE 1020 com dimensões 100 x 25,4 x 6 mm. . . . .	77
Figura 6.8 – Painel de controle do cabeçote alimentador de arame, onde: (1) Visor digital A; (2) Visor Digital V; (3) Botão de Controle WFS; (4) Botão de Controle da Tensão de Saída; (5) EURO Socket; (6) Interruptor Local/Remoto; (7) Botão de Controle de Velocidade Lenta do Alimentador; (8) Botão de Controle do tempo de Burnback; (9) Interruptor do Modo da Tocha; (10) Interruptor Cold Inch / Gas de Purga; (11) Motor de impulsionar (Driver) do Arame; (12) Suporte da bobina de arame eletrodo; (13) Conector de Amphenol; (14) Conector de gás; (15) Conector de potência de entrada e (16) Acoplamento de conectores rápidos. . .	79
Figura 6.9 – Painel de controle do carro deslocador linear da tocha: (1) Interruptor de acionamento do carro deslocador em ambas direções, (2) Potenciômetro controlador da velocidade de deslocamento linear e (3) Chave de acoplamento do motor do carro deslocador. . . . .	80
Figura 6.10 – Gabarito de controle de distância bico de contato peça (DBCP). . . . .	80
Figura 6.11 – Posicionamento da tocha de soldagem para a realização da soldagem da amostra: (1) Berço de soldagem; (2) Tocha de soldagem; (3) Suporte ajustável; (4) Carro deslocador linear. . . . .	81
Figura 6.12 – Deposição do revestimento duro sobre a amostra: (1) Amostra; (2) Revestimento duro. . . . .	82
Figura 6.13 – Trincas transversais ao revestimento duro. . . . .	83
Figura 6.14 – Fluxograma do processo de preparo metalográfico . . .	84

Figura 6.15 – Fluxograma do ensaio de dureza do revestimento duro sem a adição de cromo (Cr): (1) Amostra com revestimento duro com a superfície lixada; (2) Durômetro marca Petri, modelo F-26/1RNSB; (3) Tabela de uso Escalas Rockwell Normal (Escala Rockwell C - Penetrador de Diamante, Pré-Carga de 10 kg e Carga de 150 kg) e (4) Aplicação da pre-carga e carga do ensaio de dureza HRC. . . . .	86
Figura 6.16 – Foto macrográfica indicando as regiões da solda (AD - área depositada e ZF - área da zona fundida) e o substrato (MB) . . . . .	88
Figura 6.17 – Fluxograma da preparação metalográfica do revestimento duro sem a adição de cromo (Cr) para análise macrográfica (dimensional de solda): (1) Policorte, marca Arotec; (2) Embutidora, marca Arotec PRE 30Mi; (3) Amostra embutida no baquelite; (4) Politriz arotec; (5) Amostra polida pronta para o ensaio macroográfico. . . . .	89
Figura 6.18 – Análise macrográfica da amostra do revestimento duro sem a adição de cromo (Cr), utilizando o software NIS: (1) Altura do revestimento duro; (2) Penetração do revestimento duro; (3) Largura do revestimento duro; (4) Área do revestimento duro e (5) Área da zona fundida . . . . .	90
Figura 6.19 – Foto do Microscópio metalográfica do LABSIT: (1) Microscópio; (2) Micrografia do revestimento duro sem a adição de Cr; (3) Micrografia da região de transição (revestimento duro - substrato e zona de transição). . . . .	91

Figura 6.20 –Foto do Microdurômetro do Laboratórios da Área de Materiais - UFSJ: (1) Microdurômetro; (2) Endentação na multifaces de uma liga Ni-Cr-Mo-Ti, com ampliação de 400 X (BAUER et al., 2006). . . . .	91
Figura 6.21 –Esquema das regiões de endentação do ensaio de micro dureza a mostra com revestimento de revestimento duro sem a adição de Cr. Onde: (1) Endentação da amostra na região próximo a superfície do revestimento duro, (2) Endentação da amostra na região de transição entre o revestimento duro e a zona fundida no centro do revestimento duro; (3) Endentação da amostra na região na região de transição entre o revestimento duro e a zona fundida na extremidade esquerda do revestimento duro; (4) Endentação da amostra na região de transição. . . . .	91
Figura 6.22 –Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura do Laboratórios de Microscopia Eletro-nica e Análise Estrutural (LME) do Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras (UFLA) . . . . .	93
Figura 6.23 –Máquina de ensaio de abrasão de roda de borracha com areia seca: (1) Equipamento em construção; (2) Equipamento finalizado; (3) Parte de acionamento com inversor de frequência. . . . .	94
Figura 6.24 –Sistema de aplicação de carga da máquina de abrasão de roda de borracha com areia seca, onde: (1) Berço de apoio da amostra; (2) Amostra a ser ensaiada; (3) Anteparo do dinamômetro; (4)Dinamômetro registrando a força aplicada de aproximadamente 130 N na região da amostra com a roda de borracha. . . . .	95

Figura 6.25 – Mesa vibratória com as peneiras de 300 $\mu\text{m}$ (50#) e 212 $\mu\text{m}$ (70#) para a classificação granulométrica da areia a ser utilizada no ensaio de abrasão, conforma ASTM G65-16 (ASTM, 2016), onde: (1) Imagem da morfologia da areia de Ottawa (25 vezes de aumento) (ASTM, 2016) e (2) Imagem da areia utilizada no ensaio de abrasão (25 vezes de aumento). . . . .	96
Figura 6.26 – Fluxo de areia: (1) Fluxo uniforme e (2) Fluxo de- suniforme e (3) fluxo uniforme da areia utilizada no ensaio de abrasão. . . . .	97
Figura 6.27 – Amostra de referência para calibração da máquina de abrasão de borracha com areia seca: aço H13 (Certi- ficado do material Anexo D). . . . .	98
Figura 6.28 – Fluxograma do procedimento do tratamento térmico de têmpera para o material de referencia: aço H13. . . . .	98
Figura 6.29 – Forno de tratamento térmico. . . . .	99
Figura 6.30 – Equipamento para medir rugosidade da superfície das superfícies a ser submetido a ensaio de abrasão: (1) Rugosímetro; (2) Padrão de superfície de rugosidade ( $R_a = 6,0 \mu\text{m}$ ). . . . .	99
Figura 7.1 – Amostra preparada (lixado) para ensaio de dureza, in- dicando as endentações do penetrador do durômetro na escala Rockwell C [HRC] após ensaio. . . . .	105
Figura 7.2 – Amostra lixada e polida para análise macrográfica do revestimento duro, diluição e microdureza. . . . .	106
Figura 7.3 – Foto retirada do programa NIS-Elements D, do seção transversal da solda: (a) macrografia da solda e (b) dimensional do revestimento duro. . . . .	106

Figura 7.4 – Gráfico de efeito da energia de soldagem na diluição e na dureza do metal de solda depositado sem a adição de cromo. . . . .	109
Figura 7.5 – Esquema das regiões de endentação do ensaio de microdureza da amostra com revestimento de revestimento duro sem a adição de Cr. . . . .	115
Figura 7.6 – Gráfico de microdureza média distribuída por região, conforme Figura 7.5 . . . . .	116
Figura 7.7 – Imagem da amostra com deposição do revestimento duro sem a adição de Cr, adquirida pelo MEV, com ampliação de 1000 vezes, identificando a região de deposição, região de transição revestimento depositado e substrato e a região do substrato. . . . .	116
Figura 7.8 – Imagem capturada do MEV na região de deposição do revestimento duro sem adição, com ampliação de 1000 vezes indicando as fases constituintes do revestimento depositado. . . . .	117
Figura 7.9 – Imagem capturada do MEV na região de deposição do revestimento duro de WC com Cr com ampliação de 1000 vezes indicando as fases constituintes do revestimento depositado. . . . .	118
Figura 7.10 – Imagem capturada do MEV indicando a região de leitura do EDS, com a tabela de elementos químicos com as porcentagens em massa e atômica e o espectro do EDS para o revestimento duro sem adição de Cr, depositado pelo processo de soldagem FCAW. . . . .	119

Figura 7.11 – Imagem capturada do MEV indicando a região de leitura do EDS, com a tabela de elementos químicos com as porcentagens em massa e atômica e o espectro do EDS para o revestimento duro WC, depositado pelo processo de sinterização. . . . .	120
Figura 7.12 – Imagem capturada do MEV indicando o mapa de regiões onde os elementos químicos da amostra estão presentes para o revestimento duro WC, depositado pelo processo de sinterização. . . . .	121
Figura 7.13 – Imagem capturada do MEV indicando o mapa de regiões onde os elementos químicos da amostra estão presentes para o revestimento duro sem adição de Cr, depositado pelo processo FCAW. . . . .	122
Figura 7.14 – Foto da máquina de ensaio de abrasão com roda de borracha e areia seca, conforme norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016), instalada no Laboratório de Automação na UFLA. . . . .	122
Figura 7.15 – Gráfico da relação entre a taxa de perda de massa [g] da amostras revestidas de WC e a amostras com revestimento duro sem adição de cromo depositado pelo processo de soldagem FCAW. . . . .	125
Figura 7.16 – Imagens da trilha de desgaste por microscopia ótica (aumento de 50X) da região de ensaio de abrasão, conforme norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016), referentes à amostra sinterizada (a) e à amostra soldada com revestimento duro sem adição de cromo (b). . . .	127

Figura 7.17 – Imagens por microscopia eletrônica de varredura (aumento de 1000X) da região de ensaio de abrasão, conforme norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016), referentes à amostra soldada com revestimento duro sem adição de Cr (a) e à amostras de WC sinterizado (b). . . . 127

Figura 7.18 – Imagens da por microscopia eletrônica de varredura (aumento de 1000X) das amostras de WC sinterizado (a) e à amostra soldada com revestimento duro sem adição de cromo (b), mostrando a morfologia dos carbonetos duro na matriz dos revestimentos. . . . . 128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra 2017/2018. . . . .	31
Tabela 5.2 – Especificações AWS de arames tubulares . . . . .	53
Tabela 5.3 – Limites e e valores de referência para metais em solos MEF (2007) . . . . .	64
Tabela 6.1 – Tabela de Variáveis Controladas . . . . .	74
Tabela 6.2 – Tabela de Variáveis Resposta . . . . .	74
Tabela 6.3 – Tabela do resumo do experimento . . . . .	74
Tabela 6.4 – Tabela Tipos de Pontos do experimento . . . . .	74
Tabela 6.5 – Tabela de fatores e níveis de operação a serem testados	75
Tabela 6.6 – Parâmetro de testes da máquina de abrasão de roda de borracha com areia seca . . . . .	94
Tabela 6.7 – Limites de precisão para o Procedimento B (Material de Referência H13) em perda de volume (mm <sup>3</sup> ) . . .	102
Tabela 7.1 – Matriz de Planejamento fatorial 2 <sup>3</sup> completo com DCCR e resultados da geometria e diluição de duas seções transversais da amostra do revestimento duro e a dureza média do revestimento. . . . .	103
Tabela 7.2 – Ensaio de visual de solda da superfície do revestimento duro . . . . .	104
Tabela 7.3 – Tabela de valores p referentes a regressão das variáveis respostas do planejamento de experimento. . . .	107
Tabela 7.4 – Tabela de valores de aderência (AD) e valor p para o gráfico de resíduo referentes a regressão para as variáveis respostas do planejamento de experimento. . .	108

Tabela 7.5 – Tabela dos modelos estatísticos e do ajuste do modelo $R^2$ referentes a regressão para as variáveis respostas, após a retiradas dos fatores e interações não significantes estatisticamente. . . . .	108
Tabela 7.6 – Correlação entre as variáveis: Diluição, Dureza e Energia de Soldagem. . . . .	110
Tabela 7.7 – Tabela referente ao exame da relação monotônica entre as variáveis (Spearman): Diluição, Dureza e Energia de Soldagem. . . . .	110
Tabela 7.8 – Tabela de Otimização da Resposta. . . . .	111
Tabela 7.9 – Tabela de resultados das interações obtidas na otimização das respostas máximas de penetração, largura , altura , diluição e dureza do revestimento duro, obtidos seguindo as restrições descritas na Tabela 7.8. . . .	112
Tabela 7.10 – Amplitudes de Variáveis após análises dos gráficos de contorno. . . . .	113
Tabela 7.11 – Otimização de respostas com os intervalos obtidos com a análise de superfície de resposta. . . . .	113
Tabela 7.12 – Solução da otimização simultânea para as variáveis respostas de penetração, largura, diluição e dureza do revestimento duro, após análise dos gráficos de contornos das superfícies de respostas. . . . .	113
Tabela 7.13 – Tabela do Desvio Relativo [%] entre os resultados dos parâmetros da otimização simultânea e a média dos resultados das variáveis respostas na deposição do revestimento duro sem Cr pelo processo de soldagem FCAW. . . . .	114
Tabela 7.14 – Tabela da microdureza distribuída por região (carga de 300 g e tempo de 15 s), conforme Figura 6.21. . . .	115

Tabela 7.15 – Microconstituintes identificados nos revestimentos sem a presença de Cr (soldado), Anexo E e do revestimento duro com a presença de Cr (sinterizado), Anexo F. . . . .	121
Tabela 7.16 – Tabela de relação entre a perda de massa do material de referência H13 encontrado na norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016) Tabela X1.3, Anexo E e o valor encontrado durante a calibração da máquina de abrasão de borracha com areia seca. . . . .	123
Tabela 7.17 – Resultado do ensaio de perda de massa comparando as amostras soldadas sem a adição de cromo, amostras sinterizadas de WC e metal das facas comerciais de 3 fornecedores distintos de faca de corte basal. . . . .	124
Tabela 7.18 – Tabela dos resultados de perda de massa de Lima e Ferraresi (2010). . . . .	126
Tabela 1 – Tabela de fases constituintes do revestimento de metal duro sem a adição de Cr, depositado pelo processo de soldagem FCAW, conforme espectro de difração de raio X do revestimento. . . . .	147
Tabela 2 – Tabela de fases constituintes do revestimento de metal duro de WC, depositado pelo processo de sinterização, conforme espectro de difração de raio X do revestimento. . . . .	149
Tabela 3 – Tabela X3.1 referente aos valores típicos de perda de massa, ensaio de abrasão com roda de borracha com areia seca, norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016) . . .	150

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>25</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>META</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>HIPÓTESE</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>28</b>
<b>5.1</b>	<b>Produção de cana-de-açúcar</b>	<b>28</b>
<b>5.2</b>	<b>Colheita mecanizada de cana-de-açúcar</b>	<b>32</b>
<b>5.3</b>	<b>Desgaste das partes da colhedora de cana-de-açúcar durante o processo de colheita</b>	<b>34</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Desgaste de facas de corte basal</b>	<b>37</b>
<b>5.3.1.1</b>	<b>Desgaste abrasivo</b>	<b>38</b>
<b>5.3.1.2</b>	<b>Mecanismos de desgaste abrasivo de materiais metálicos</b>	<b>39</b>
<b>5.3.1.3</b>	<b>Métodos e testes para avaliação de desgaste</b>	<b>42</b>
<b>5.3.1.4</b>	<b>Engenharia de Superfície</b>	<b>48</b>
<b>5.3.1.5</b>	<b>Deposição de material pelo processo de soldagem com Arame Tubular</b>	<b>50</b>
<b>5.3.1.6</b>	<b>Diluição e resistência ao desgaste</b>	<b>54</b>
<b>5.3.1.7</b>	<b>Variáveis operacionais no processo de soldagem de revestimento</b>	<b>56</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Deposição de material em facas de colhedora mecanizadas de Cana-de-açúcar</b>	<b>58</b>
<b>5.4</b>	<b>Utilização de Metais Pesados e Ligas Metálicas em facas do corte basal</b>	<b>62</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Adição de cromo em revestimentos de facas do corte basal</b>	<b>66</b>

<b>6</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS . . . . .</b>	<b>70</b>
<b>6.1</b>	<b>Procedimento de Soldagem . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Inspeção visual de solda . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Preparação metalográfica das amostras soldadas com revestimento duro sem a adição de cromo . . . . .</b>	<b>83</b>
<b>6.1.3</b>	<b>Ensaio de dureza da superfície do revestimento duro sem a adição de cromo . . . . .</b>	<b>83</b>
<b>6.1.4</b>	<b>Análise Macrográfica do revestimento duro sem a adição de cromo . . . . .</b>	<b>87</b>
<b>6.1.5</b>	<b>Análise Micrográfica e Microdureza do revestimento duro sem a adição de cromo . . . . .</b>	<b>89</b>
<b>6.1.6</b>	<b>Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) do revestimento duro sem a adição de cromo . . . . .</b>	<b>92</b>
<b>6.1.7</b>	<b>Análise de desgaste por abrasão . . . . .</b>	<b>92</b>
<b>6.1.7.1</b>	<b>Calibração da máquina de teste de abrasão de roda de borracha com areia seca, construída para realizar as análises de desgaste. . . . .</b>	<b>93</b>
<b>7</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>103</b>
<b>7.1</b>	<b>Avaliação das características geométricas, diluição e dureza . . . . .</b>	<b>103</b>
<b>7.1.1</b>	<b>Avaliação da deposição de revestimento duro . . . . .</b>	<b>104</b>
<b>7.1.2</b>	<b>Ensaio Dureza e Macrografia . . . . .</b>	<b>105</b>
<b>7.1.3</b>	<b>Ensaio de microdureza, Microscopia eletrônica de Varredura (MEV) e energia dispersiva de raios X (EDS) . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>7.1.3.1</b>	<b>Ensaio de microdureza . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>7.1.3.2</b>	<b>Microestrutura dos revestimentos . . . . .</b>	<b>117</b>
<b>7.2</b>	<b>Ensaio de abrasão com roda de borracha e areia seca. . . . .</b>	<b>121</b>
<b>8</b>	<b>DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>129</b>

<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>131</b>
<b>10</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>132</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>133</b>
	<b>ANEXO A – Folha de dados dos testes da máquina de abrasão de roda de borracha com areia seca. . . . .</b>	<b>139</b>
	<b>ANEXO B – Certificado de qualidade do metal base. .</b>	<b>143</b>
	<b>ANEXO C – Certificado de qualidade da borracha. . .</b>	<b>144</b>
	<b>ANEXO D – Certificado de qualidade do metal de referência H13. . . . .</b>	<b>145</b>
	<b>ANEXO E – Espectro de difração de raio X para o revestimento de metal duro sem a adição de Cr, depo- sitado pelo processo de soldagem FCAW. . . . .</b>	<b>146</b>
	<b>ANEXO F – Espectro de difração de raio X para o revestimento de metal duro de WC, depositado pelo processo de sinterização. . . . .</b>	<b>148</b>
	<b>ANEXO G – Tabela de valores típicos de perda de massa, ensaio de abrasão com roda de borracha com areia seca, norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016) . . . .</b>	<b>150</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é cultivada numa extensa área territorial, apresentando melhor comportamento nas regiões quentes. O clima ideal é aquele que apresenta duas estações distintas, quente e úmida, para proporcionar a germinação, perfilhamento e desenvolvimento vegetativo, seguido de outra fria e seca, para promover a maturação e consequente acúmulo de sacarose nos colmos.

Solos profundos, pesados, bem estruturados, férteis e com boa capacidade de retenção são os ideais para a cana-de-açúcar que, devido à sua rusticidade, se desenvolve satisfatoriamente em solos arenosos e menos férteis, como os de cerrado. O desgaste prematuro de componentes agrícolas, como é o caso das facas de corte basal de cana-de-açúcar, independem do tipo de solo, porém as partes ativas (facas) que entram em contato com o solo diretamente, sofrem mais com o desgaste abrasivo causado pelas partículas de sílica presente nos solos agrícolas.

A mecanização da colheita das lavouras canavieiras está em plena ascensão, entretanto, o maior gargalo para o sistema de colheita encontra-se no desgaste prematuro das de corte basal. Neste caso, o grande desafio está em desenvolver um sistema de corte basal (corte da cana-de-açúcar na região da base, próximo ao solo), capaz de reduzir os índices de danos nas soqueiras durante o processo de corte mecanizado da cana-de-açúcar, os quais estão diretamente associados ao desgaste prematuro das facas.

Uma solução que vem sendo empregada no mercado para aumentar a vida útil da ferramenta, é o revestimento duro em facas de corte basal por meio da deposição por processo de soldagem. Entretanto, o desafio está em desenvolver ligas metálicas utilizadas para o aumento da resistência ao desgaste na região de corte basal, considerando a eliminação de elementos químicos nocivos ao ambiente, entre eles, o cromo. O cromo é normalmente adicionado nas ligas quando o material está sujeito à desgast-

tes de natureza abrasiva, podendo contaminar o solo e alimentos, por meio da sedimentação das partes do revestimento que vão sendo desgastada e ou deslocadas das facas de corte basal durante o processo de colheita. Por esse motivo, entidades internacionais relacionadas a agricultura vem se esforçando para eliminar o cromo nas operações de colheita.

Neste sentido, novas pesquisas devem ser desenvolvidas para otimizar a colheita mecanizada das lavouras de cana-de-açúcar, reduzindo o tempo de parada de troca de ferramentas de cortes da colhedora (facas), no intuito de garantir o corte basal da cana de açúcar sem a deposição de cromo nas ligas de revestimento duro existentes. Portanto, este projeto tem como objetivo principal avaliar a deposição do revestimento duro sem adição de cromo em facas de corte basal e comparar com modelos comerciais via testes de abrasão.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar um novo processo de deposição de revestimento duro sem a presença de cromo por soldagem, com arame tubular auto protegido – FCAW (Flux-Cored Arc Welding), no intuito de aumentar a vida útil de facas de corte basal de colhedoras de cana-de-açúcar.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Verificar se a formulação de arame tubular, sem a presença de cromo (Cr), é capaz de promover um maior desempenho na vida útil de sistemas de cortes de cana-de-açúcar, assim como os atuais metais de adição utilizados comercialmente com a presença de cromo;
- Verificar os parâmetros de soldagem que proporcionam uma nova concepção de facas de corte basal com revestimento de metal duro sem a adição do cromo;
- Comparar a resistência à abrasão entre o revestimento duro sem a adição de cromo com revestimentos duros com presença de cromo, utilizados atualmente na confecção de facas de corte basal da cana-de-açúcar.

### **3 META**

Desenvolver um novo conceito de faca de corte basal a partir da deposição de metal duro sem cromo, obtendo melhor desempenho (vida útil de trabalho) em relação às facas comerciais atualmente utilizadas na colheita de cana-de-açúcar.

#### **4 HIPÓTESE**

Depositando o revestimento duro sem a adição do cromo na região de corte e na parte inferior da faca de corte basal, com os parâmetros de solda adequados e a utilização de uma lâmina de aço estrutural em substituição ao aço ferramenta, atualmente utilizado nas confecções das facas basal comerciais, haverá um aumento na vida útil da faca de sistemas de corte da cana-de-açúcar.

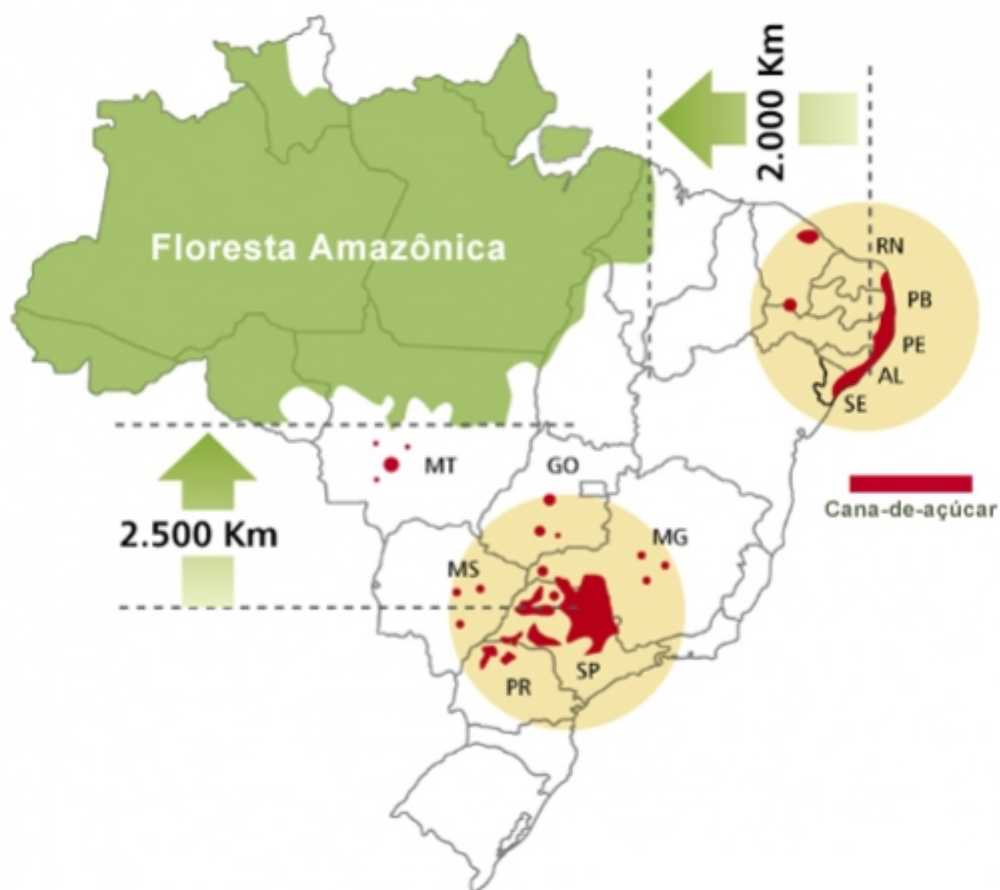
## **5 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **5.1 Produção de cana-de-açúcar**

O Brasil lidera o ranking de produção de cana-de-açúcar respondendo por quase metade da produção mundial: cerca 20% da produção de cana e 40% das exportações mundiais de açúcar, 30% da produção e 60% das exportações mundiais de etanol. Segundo a União da Indústria de cana-de-açúcar (UNICA, 2018), o setor gera quase 1 milhão de empregos diretos em 25 estados brasileiros e a cadeia sucroenergética reúne cerca de 70 mil fornecedores de cana. Na safra 2017/2018, 400 unidades funcionaram no País (COPERSUCAR, 2018).

A produção de cana-de-açúcar concentra-se nas regiões Centro-Sul e Nordeste do Brasil. As áreas onde concentram as plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade, segundo dados UNICA (2018) estão representadas na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Mapa das áreas onde se encontram as plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade.



Fonte: UNICA (2018)

Os dados referentes a safra 2017-2018 estratificado em toneladas de cana-de-açúcar, colhida a produção de açúcar e etanol conforme dados da UNICA (2018) estão representados na Tabela 5.1. A cana-de-açúcar sempre teve um papel importante na economia brasileira, desde o período dos engenhos coloniais. Não é de hoje que especialistas vêm buscando maneiras de aprimorar o cultivo da planta, tornando-a mais produtiva e resistente, entre outras vantagens agrônômicas. Desta forma, torna-se imprescindível o aprofundamento dos estudos sobre a mecanização deste cultivar com o objetivo de atender as normas trabalhistas e o aumento da produção.

No processo de produção da cana, a colheita destaca-se pelos altos custos envolvidos e dificuldades operacionais, seja ela conduzida de forma manual, semimecanizada ou mecanizada. A adoção do sistema mecanizado na colheita de cana-de-açúcar já é o principal método de corte utilizado nas regiões produtoras e, principalmente, unanimidade nas áreas de expansão, não só por promover aumento da capacidade operacional como também adequação à legislação ambiental, por dispensar a queima prévia do canavial (SILVA; SILVA; MAGALHÃES, 2014). A mecanização nas áreas de expansão, como nos estados de São Paulo, Goiás e Mato Grosso, onde os canaviais se encontram em áreas planejadas, praticamente 100% da área é colhida mecanicamente (UNICA, 2018).

Tabela 5.1 – Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra 2017/2018.

Estados	Cana-de-açúcar	Açúcar	Etanol (mil m <sup>3</sup> )			
	<i>mil toneladas</i>	<i>mil toneladas</i>	Anidro	Hidratado	Total	
Região Centro-Sul	Espírito Santo	2.381	127	80	11	90
	Goiás	70.622	2.235	1.323	3.295	4.618
	Mato Grosso	16.134	411	539	960	1.499
	Mato Grosso do Sul	46.940	1.492	878	1.754	2.632
	Minas Gerais	64.886	4.237	1.067	1.642	2.708
	Paraná	37.047	2.921	570	699	1.269
	Rio de Janeiro	1.062	35	0	46	46
	Rio Grande do Sul	45	0	0	2	2
	Santa Catarina	0	0	0	0	0
	São Paulo	357.142	24.591	5.963	7.260	13.223
Região Norte-Nordeste	Acre	0	0	0	0	0
	Alagoas	13.734	1.072	219	112	331
	Amapá	0	0	0	0	0
	Amazonas	222	12	0	5	5
	Bahia	3.540	160	75	106	181
	Ceará	0	0	0	0	0
	Maranhão	2.220	23	143	20	163
	Pará	977	46	43	8	52
	Paraíba	5.900	159	184	187	370
	Pernambuco	10.863	757	92	229	321
	Piauí	850	63	20	1	20
	Rio Grande do Norte	2.516	161	32	45	77
	Rondônia	78	0	0	4	4
	Roraima	0	0	0	0	0
	Sergipe	1.719	96	24	46	70
	Tocantins	2.188	0	116	61	176
<b>Região Centro-Sul</b>	<b>596.260</b>	<b>36.048</b>	<b>10.419</b>	<b>15.669</b>	<b>26.088</b>	
<b>Região Norte-Nordeste</b>	<b>44.806</b>	<b>2.548</b>	<b>947</b>	<b>823</b>	<b>1.771</b>	
<b>Brasil</b>	<b>641.066</b>	<b>38.596</b>	<b>11.366</b>	<b>16.492</b>	<b>27.859</b>	

Fonte: UNICA (2018)

## 5.2 Colheita mecanizada de cana-de-açúcar

A colheita de cana-de-açúcar atualmente é realizada por quase em sua totalidade pelo sistema mecanizado, Figura 5.2, devido a erradicação da queima pré-colheita no Brasil. Por isso, é imprescindível o desenvolvimento de alternativas para a implementação da mecanização da colheita, reduzindo as perdas inerentes nesse processo.

Figura 5.2 – Colheita mecanizada sem pré-queimada de cana-de-açúcar: alto custo associado



Fonte: Voltarelli et al. (2014)

Para garantir condições agronômicas propícias para que haja a rebrota dos canaviais sem a diminuição da produtividade das próximas safras, um dos fatores a serem observados durante a colheita mecanizada é a qualidade do corte de base da cana-de-açúcar. Um corte de base realizado com qualidade, poderá assegurar o melhor aproveitamento da lavoura, bem como menores índices de danos (Figuras 5.3 e 5.4), abalos nas soqueiras e de contaminações da matéria prima.

Segundo Voltarelli et al. (2014), diversos estudos têm apontado o mecanismo de corte basal como responsável por uma boa qualidade da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, além de proporcionar a incorporação de impurezas minerais (sílicas), devido ao contato das lâminas com

o solo, tem associado a isso, o desgaste prematura das facas de corte que podem influenciar no aumento dos índices de danos e abalos causados nas soqueiras, podendo este ser um dos fatores principais destes problemas. Porém, no mercado brasileiro existem diversos tipos de modelos de facas para a realização do corte basal, cada um com suas peculiaridades específicas.

Figura 5.3 – Perda de cana-de-açúcar "estilhaçada" no campo, em razão de não existir controle da qualidade do processo de colheita da cana-de-açúcar, sendo fundamental para reduzir as perdas.



Fonte: Furukawa (2013)

Figura 5.4 – Desperdício de cana devido à colheita incorreta.



Fonte: Nassif (1999)

Segundo Cassia et al. (2014), as detecções de variações durante a execução de uma determinada operação agrícola estão relacionadas ao controle da qualidade, que utilizam padrões específicos, para comparar os indicadores pré-selecionados, inibindo a ocorrência de falhas, o que diminui desperdícios com ações corretivas durante as operações. Cassia et al. (2014) ainda cita diversos trabalhos que enumeram estes indicadores da qualidade para a operação de colheita mecanizada na cana-de-açúcar, e este monitoramento segundo Peloia, Milan e Romanelli (2010), aumentam o nível de confiabilidade do processo, mantendo a operação dentro dos padrões especificados.

### **5.3 Desgaste das partes da colhedora de cana-de-açúcar durante o processo de colheita**

Durante a etapa de colheita, além do próprio atrito da cana-de-açúcar e suas folhas, vários outros elementos (areias, terra, pedras etc.), deterioram as partes da colhedora responsável pelo corte basal, elevação e transporte até as carretas transportadoras de cana para a Usina. Segundo Buchanan, Shipway e McCartney (2007), partes da colhedora e das máquinas, na própria usina, sofrem muito desgaste, o que acarreta paradas de máquinas, redução da produtividade e aumenta o custo da produção. Entretanto, Prisco (1993) relata que através de revestimento por soldagem com ligas especiais se chega a um tipo de revestimento preventivo que protege e aumenta a durabilidade do rolo. Até a década de 70 as moagens diretas eram realizadas em rolos de ferro fundido ou aço SAE 1045 que funcionavam no máximo até a metade da safra o que obrigava a parada da produção para a troca ou recuperação das peças deterioradas. Hoje, com rolos revestidos, os equipamentos duram até uma safra inteira, que gira em torno de sete meses.

Ainda, segundo Prisco (1993), os equipamentos críticos são divididos em dois grupos, os que apresentam desgaste mecânico e os que predominam o desgaste corrosivo. Durante a entressafra, muitas usinas no Brasil param o processo de moagem devido desgaste excessivo, desmontam os equipamentos e realizam manutenção corretiva com o processo de soldagens onde se aplica na superfície sujeita ao desgaste um revestimento duro, que tem características de resistência superior as do metal base.

A soldagem dentro das usinas de açúcar e álcool, que antes eram usadas apenas para o caráter de emergência e muitas vezes não qualificadas, tem levado as indústrias a se especializarem e qualificarem os procedimentos de soldagem, o que acarreta num crescimento das manutenções com a deposição de metais duros para evitar o desgaste prematuro das peças. Porém, ainda existem indústrias desse segmento que optam por não utilizar soldas de recondicionamento e sim trocam peças que estejam trincadas ou desgastadas por novas peças.

Paranhos e Mello (1998) afirmam que a soldagem ganhou uma importância significativa no aumento da vida útil dos equipamentos usados na indústria sucroalcooleira. Isso se dá porque muitas peças são recuperadas por soldagem como os eixos que acionam as moendas, engrenagens de acionamento, bagaceiras, bagaceiras, tubulações em toda a usina e a fabricação de equipamentos como caldeiraria.

Ainda de acordo com Paranhos e Mello (1998), a tecnologia da soldagem evoluiu a ponto que ligas especiais resistentes ao desgaste foram desenvolvidas e são usadas nos revestimentos destas peças, o que aumenta a vida útil em até dez vezes mais ao metal de base ou do aço ou mesmo ferro fundido sem esse revestimento.

Um dos procedimentos mais utilizados, nesse setor, é a realização de revestimentos por solda durante o próprio trabalho, antes que a peça seja substituída após o desgaste total, o que faz aumentar a durabilidade e

vida útil. Esse tipo de procedimento é denominado chapisco, que é a aplicação de revestimento nos rolos de moendas durante seu funcionamento.

Esse procedimento é realizado utilizando aspersione térmica a base de carboneto de cromo e ferro que é o jateado em forma de spray, depositando metal duro sobre a peça, o que aumenta a rugosidade da superfície e proporciona maior atrito com o bagaço da cana. Esse tipo de manuseio permite que a moenda trabalhe durante toda safra.

Habitualmente, as operações de revestimento são definidas como a deposição de metal de aporte sobre a superfície de um metal base, com o propósito de prover as propriedades e/ou dimensões requeridas da peça em condições de serviço. Existem várias categorias de revestimentos que são utilizadas de acordo com as propriedades que se desejem obter, conforme descrito a seguir:

- revestimento de aços inoxidáveis (*cladding*): são utilizados, geralmente, para depositar uma capa de metal de aporte sobre um aço ao carbono de baixa liga com o propósito de prover na superfície uma proteção contra a corrosão ambiental, quando em geral, a resistência do revestimento não é incluída no projeto do componente. Esse tipo de revestimento pode ser aplicado para resistir à corrosão localizada (*pitting*), gretas de corrosão, corrosão intergranular e corrosão de baixas tensões. A resistência à corrosão do revestimento, em muitos casos, é o fator limitante na vida do componente, sendo, portanto, a primeira consideração a ser levada em conta para selecionar a liga, o processo de soldagem e o procedimento a utilizar (CONDE, 1986);

- revestimentos de reconstrução (*build up*): refere-se à adição de metal por soldagem, na superfície do metal base, com o objetivo de restaurar as dimensões originais no componente. A resistência da solda é um importante pré-requisito que deve ser considerado no projeto (CONDE, 1986);

- amanteigamento (*buttering*): aplicação de um ou mais passes de solda na face da junta. A diferença do caso anterior está no fato de ser usado por razões metalúrgicas e não por controle dimensional. Um exemplo clássico é a deposição de ligas de alto níquel sobre uma base de aço de baixa liga. A parte amanteigada pode ser usada na condição como soldada ou sofrer tratamento térmico posterior para a obtenção de propriedades especiais (CONDE, 1986);

- revestimentos duros (*hardfacing*): segundo Hutchings (1994), entende-se por revestimento duro, uma liga homogeneamente depositada por soldagem, na superfície de um material mole, geralmente um aço de baixo ou médio carbono, com o propósito de aumentar a sua dureza e resistência ao desgaste, sem provocar perda significativa de ductilidade e tenacidade do substrato. Conde (1986) afirma que os revestimentos duros são empregados com o fim de reduzir o desgaste por abrasão, erosão, impacto ou cavitação.

Tais revestimentos são aplicados, usualmente, pelos processos de soldagem Oxiacetileno (OFW) a Arco Elétrico com Eletrodos Revestidos (SMAW), MIG/MAG (GMAW), Arco Submerso (SAW) e Arames Tubulares (FCAW). Os eletrodos revestidos são utilizados devido ao seu baixo custo e facilidade de aplicação, enquanto os arames tubulares têm sido preferidos pela alta produtividade aliada à alta qualidade de solda.

### **5.3.1 Desgaste de facas de corte basal**

Segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2017), entende-se por desgaste a deterioração ou dano de uma superfície sólida, geralmente com perda de material devido ao movimento relativo desta superfície em contato com outra ou com outras substâncias. Já Stoeterau (2004) apresenta o significado de desgaste como a indesejável e cumulativa mudança de dimensões motivada pela remoção gradual de

partículas discretas da superfície em contato e com movimento relativo, devido, predominantemente, às ações mecânicas.

Visto sua complexidade, faz-se necessário estabelecer classificações para os vários tipos de desgastes. Budinski (1991) faz a seguinte classificação: desgaste por brasão, erosão, adesão ou fricção e fadiga térmica.

Lima e Ferraresi (2006) destacam que, em ambientes industriais, o desgaste e respectiva porcentagem de ocorrência podem-se apresentar como: abrasão (50%), adesão (15%), erosão (8%), fricção (8%) e corrosão (5%). Compreende-se, também que a resistência à solicitação de desgaste não é propriedade intrínseca de um material, mas sim, característica do sistema ou do equipamento ao qual o componente está ligado mecanicamente e do seu meio operacional.

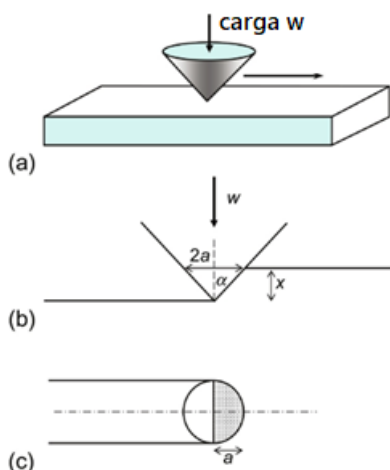
### **5.3.1.1 Desgaste abrasivo**

Segundo Hutchings e Shipway (2017), o estudo de processos de desgaste envolvendo partículas duras podem envolver abrasão (na qual as partículas deslizam ou rolam sobre a superfície) ou erosão (que envolve impacto de partículas). As propriedades das partículas no processo de abrasão são: dureza, forma e tamanho. Mecanismos de desgaste abrasivo podem envolver deformação plástica e fratura frágil. Em algumas circunstâncias, a deformação plástica pode ocorrer sozinha, mas ambos frequentemente ocorrem juntos, mesmo em materiais convencionalmente considerados como idealmente frágeis. Modelos para desgaste abrasivo por cada tipo de mecanismo isoladamente foram desenvolvidos, os quais geralmente ignoram a possibilidade do outro. Para entender o desgaste abrasivo em termos simples, deve-se também separar os dois grupos de mecanismos e examinar nas seções a seguir os modelos de desgaste abrasivo por deformação plástica e por fratura frágil.

### 5.3.1.2 Mecanismos de desgaste abrasivo de materiais metálicos

Um modelo simples para o desgaste abrasivo envolve a remoção do material por deformação plástica. A Figura 5.5 apresenta uma partícula abrasiva, idealizada como um cone de semi-ângulo, sendo arrastada através da superfície de um material dúctil que flui sob uma pressão de indentação. Isso faz com que forme uma ranhura no material e presume-se que o desgaste ocorra pela remoção de alguma proporção do material que é deslocado pela partícula da ranhura. A carga normal transportada pela partícula é suportada pelo fluxo de material abaixo da partícula, o que causa uma pressão para atuar sobre a área de contato entre a partícula e a superfície. Como o cone está em movimento e, portanto, em contato apenas sobre sua superfície frontal, o volume de material deslocado da ranhura pelo cone ao deslizar uma distância ao longo da superfície é dado pela distância e a profundidade da ranhura.

Figura 5.5 – Geometria de contato entre uma partícula abrasiva cônica idealizada e uma superfície: (a) vista em perspectiva; (b) seção em elevação; (c) seção na vista de planta.



Fonte: Hutchings e Shipway (2017)

Segundo Pintaude, Albertin e Sinatora (2005), o uso de dureza como propriedade do material para determinar a resistência ao desgaste

está bem estabelecido. Esta relação foi consolidada com os modelos de Archard (1953) e Rabinowicz, Dunn e Russell (1961) para taxa de desgaste. Estes modelos dependem de três hipóteses principais:

- O comportamento mecânico do material gasto é assumido como plástico;
- O comportamento da partícula abrasiva não é considerado, ou seja, as partículas abrasivas são tomadas como dentes rígidos, não sujeitos a fratura, deformações ou alterações de propriedades e geometria;
- Finalmente, um único mecanismo, o corte, causa o desgaste.

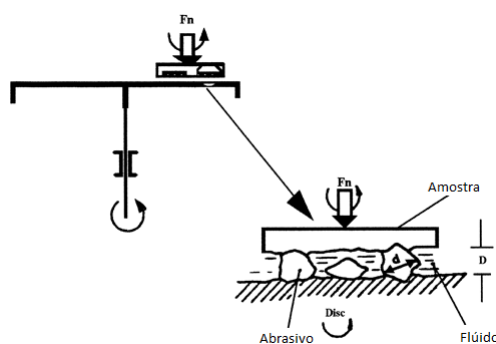
Mulhearn e Samuels (1962) melhoraram gradativamente a compreensão do papel do mecanismo de corte, o que introduziu o conceito do ângulo crítico de ataque. Este conceito permite uma avaliação mais realista da contribuição do mecanismo de corte para o desgaste. Uma vez que o corte se torna o mecanismo de operação apenas para ângulos abrasivos de ataque superiores a um ângulo crítico, os efeitos da geometria abrasiva e dos movimentos são levados em consideração.

Segundo Richardson (1968) e Torrance (1981), a contribuição das propriedades abrasivas ao desgaste foi contabilizada por meio da relação entre a dureza abrasiva ( $HA$ ) e a dureza do material desgastado ( $H$ ). Está bem estabelecido que esta razão ( $HA / H$ ) se correlaciona em muitos casos com o regime de desgaste abrasivo, leve ou severo. Um valor típico de 1,2 é usado para indicar a transição entre esses regimes. Um suporte teórico para este número é obtido considerando-se o comportamento mecânico de uma partícula abrasiva como plástico rígido (TORRANCE, 1981). Embora seja uma simplificação, já que em muitos casos práticos o material abrasivo exibe um comportamento elástico-plástico (EVANS; WILSHAW, 1976). Este modelo enfatiza que um diferencial de dureza definido é necessário para iniciar um desgaste severo.

Para Pintaude, Albertin e Sinatora (2005), a classificação do desgaste como “leve” ou “severo” geralmente leva em consideração a taxa de remoção de material. Além disso, o aspecto das superfícies desgastadas e o tamanho dos resíduos de desgaste também podem ser considerados critérios para avaliar a severidade de um sistema de desgaste. É comum encontrar taxas de desgaste abrasivo causadas pelo movimento de deslizamento de abrasivos (abrasão de “dois corpos”) em uma ordem de grandeza superior àquelas causadas pelo movimento de laminação de abrasivos (abrasão de “três corpos”). No entanto, é muito mais frequente encontrar diferenças na faixa de 4 a 10 vezes, graças às variações da relação  $HA / H$ , do tamanho de partículas abrasivas ou simplesmente da angularidade das partículas abrasivas (MULHEARN; SAMUELS, 1962).

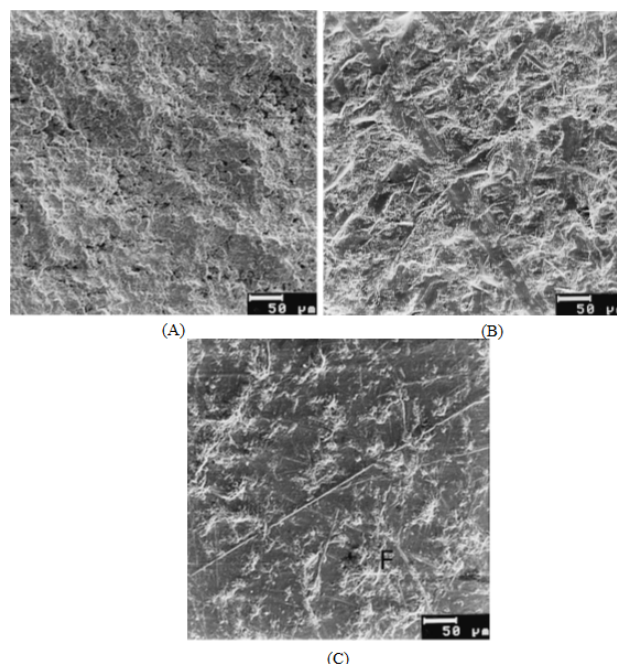
Bozzi e Mello (1999) estudaram o mecanismo de desgaste do revestimento termicamente pulverizado WC-12% Co ( $1.200 \pm 200$  HV30), em um teste de três corpos, Figura 5.6. Foram observaram que o aumento da dureza do abrasivo causou uma mudança no mecanismo de desgaste de múltiplas reentrâncias para deformação plástica e corte, Figura 5.7.

Figura 5.6 – Representação esquemática do abrasômetro de três corpos usado em testes.



Fonte: Bozzi e Mello (1999)

Figura 5.7 – (A) Superfície inicial do revestimento de WC-12% Co com pulverização térmica ( $1.200 \pm 200$  HV30). (B) Mesmo revestimento usando sílica com tamanho de grão de 0,19 mm, em um teste de três corpos. Observe várias ranhuras. (C) O mesmo revestimento usando alumina com tamanho de grão de 0,26 mm. Observe o corte e deformação plástica. As ranhuras na Figura (C) são mais largas que os carbonetos



Fonte: Bozzi e Mello (1999)

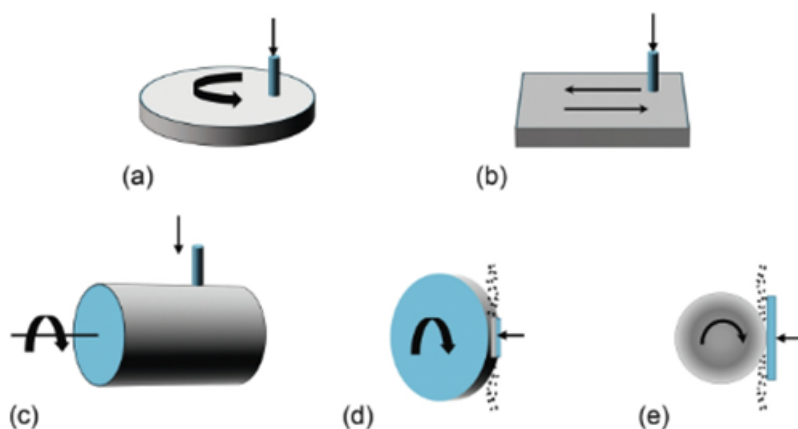
### 5.3.1.3 Métodos e testes para avaliação de desgaste

Devido às diversidades de fatores que influenciam no processo de desgaste, é quase impossível prever com um único ensaio o comportamento em serviço de um material. Tem-se que avaliar a influência das variáveis mais significativas do fenômeno e planejar em laboratório o ensaio abrasivo mais representativo em cada caso. Os testes de laboratório mais comumente utilizados para o desgaste abrasivo empregam uma amostra em forma de pino deslizante contra abrasivo fixo ou uma roda giratória ou deslizamento de esfera contra uma amostra plana com partículas abrasivas soltas sendo alimentadas continuamente entre as duas.

Na Figura 5.8(a) - (c) são apresentadas três variantes comuns do método em que um pino de amostra desliza contra partículas abrasivas fixas, causando desgaste abrasivo de dois corpos (deslizante). O papel ou o pano abrasivo comercial geralmente é usado em uma das faces, onde as partículas de areia são distribuídas uniformemente, com dimensões granulométricas controladas, coladas ao substrato por uma resina forte. A taxa de desgaste devido a tais partículas abrasivas fixas diminui com passagens repetidas da amostra sobre a mesma pista. Vários mecanismos são responsáveis por essa redução progressiva da abrasividade, tais como: fratura de partículas, levando a uma diminuição no número de pontos de corte; remoção de partículas inteiras da resina aglutinante ("bombeamento"); arredondamento das áreas de contato das partículas por mecanismos químicos, mecânicos ou térmicos ("atrito"); adesão de detritos de desgaste às pontas das partículas; e acumulação de detritos de desgaste nos espaços entre as partículas de modo a transportar parte da carga aplicada ("entupimento"). As taxas e a importância relativa desses mecanismos variam de acordo com o material da amostra e também com a carga, a velocidade de deslizamento, a atmosfera e outros fatores. A fim de evitar os problemas introduzidos pela degradação do abrasivo, muitas vezes é garantido que a amostra sempre deslize contra o abrasivo novo. Na geometria do pino sobre o disco (Figura 5.8a), isso pode ser conseguido movendo-se o pino radialmente no disco durante o teste, para que ele descreva uma trilha em espiral. Geometrias alternativas envolvem deslizamento linear sobre uma folha retangular de papel abrasivo (Figura 5.8b), ou mover o pino paralelamente ao eixo de um cilindro giratório coberto com partículas abrasivas (Figura 5.8 c), de acordo com Hutchings e Shipway (2017)

Aparelhos deste tipo são especificados em um procedimento padrão internacional amplamente utilizado para testes de abrasão de borracha (ABNT (2014), ASTM (2015) e DIN (1987)). Em cada um desses

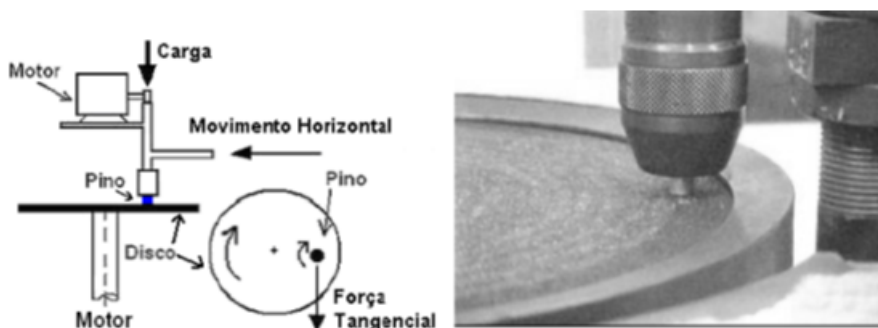
Figura 5.8 – Ilustração esquemática de cinco métodos comuns usados para medir as taxas de desgaste abrasivo dos materiais: (a) pino no disco abrasivo; (b) pino na placa abrasiva; (c) pino no tambor abrasivo; (d) teste de abrasão da roda de borracha; e) Ensaio de abrasão em microescala.



Fonte: Hutchings e Shipway (2017)

casos, uma carga constante é aplicada ao pino, geralmente por um carga estática. A taxa de desgaste é geralmente medida pela pesagem do pino antes e depois do teste, embora em alguns projetos um transdutor elétrico seja usado para monitorar a posição do pino continuamente e, assim, medir seu comprimento instantâneo. Desta forma, um registro contínuo de desgaste pode ser obtido durante o teste (Figura 5.9).

Figura 5.9 – Abrasômetro Pino sobre Disco.



Fonte: Hutchings e Shipway (2017)

A Figura 5.8 (d) e (e) ilustra uma segunda classe de teste de desgaste abrasivo, na qual partículas soltas abrasivas são fornecidas como pó seco ou misturadas com um líquido para formar uma suspensão. A amostra está na forma de uma placa ou bloco, pressionada sob carga constante contra a superfície de uma roda ou bola giratória. O método apresentado na Figura 5.8 (d), o teste de abrasão de areia seca / roda de borracha, foi adotado pela norma (ASTM, 2016) e a roda consiste de um aro de borracha de dureza definida moldada em uma superfície de um disco de aço. Na especificação padrão, a espessura radial do aro de borracha é de 12,7 mm e a roda tem uma largura de 12,7 mm e um diâmetro total de 228,6 mm roda a 200 r.p.m. A força que pressiona a amostra contra a roda também é especificada (130N). Partículas secas de sílica (quartzo) de uma distribuição de tamanho controlado e de uma fonte especificada são alimentadas a uma taxa constante na região de contato. O desgaste é medido pela pesagem da amostra; o procedimento padrão prescreve a duração do teste, bem como outras variáveis de teste, como a carga, a velocidade de deslizamento, a dureza da borracha e a taxa de avanço de partículas, (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

O teste apresentado na Figura 5.8 é denominado por "micro-abrasão" ou "bola-cratera". A bola é tipicamente uma esfera rígida de aço, com 25 mm de diâmetro, e as partículas abrasivas (cerca de 4  $\mu$ m de diâmetro) são alimentadas à zona de contato como uma suspensão concentrada, suspensa em água. A cicatriz de desgaste produzida na superfície de amostra inicialmente plana por este teste é tipicamente de 1 a 2 mm de diâmetro e tem a geometria de uma capa esférica com o mesmo raio da esfera. O volume de desgaste pode, portanto, ser calculado com precisão a partir de uma medição do diâmetro da cicatriz de desgaste na superfície da amostra. Como a cicatriz de desgaste ocupa uma área tão pequena da amostra, é possível realizar vários testes em uma amostra relativamente pequena.

A profundidade da cicatriz de desgaste também é pequena (10 a 20  $\mu\text{m}$  para diâmetros de cicatrização de desgaste de 1 a 1,5 mm). Este método é, portanto, adequado para medir as taxas de desgaste de revestimentos finos, (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

O método de análise de desgaste por abrasão descrito pela norma ASTM G65-16 (Método de Teste Padrão para Medir a Abrasão Usando o Aparelho de Areia Seco / Roda de Borracha) (ASTM, 2016) abrange os procedimentos de laboratório para determinar a resistência dos materiais metálicos à abrasão por raspagem, através do teste de areia seca / roda de borracha. A intenção deste método de teste é produzir dados que classifiquem de forma reproduzível os materiais em sua resistência à abrasão por raspagem sob um conjunto específico de condições. Os resultados dos testes de abrasão são reportados como perda de milímetros cúbicos para o procedimento de teste específico especificado. Materiais de maior resistência à abrasão terão menor perda de volume. A norma ASTM G65-16 abrange cinco procedimentos que são apropriados para graus específicos de resistência ao desgaste ou espessura de material de teste:

Procedimento A - Este é um teste relativamente severo que classificará materiais metálicos em uma larga escala de perda de volume de baixa a extrema resistência à abrasão. É particularmente útil na classificação de materiais de média a extrema resistência à abrasão.

Procedimento B - Uma variação a curto prazo do Procedimento A. Ele pode ser usado para materiais altamente resistentes à abrasão, mas é particularmente útil na classificação de materiais resistentes à média e baixa abrasividade. O procedimento B deve ser usado quando os valores de perda de volume desenvolvidos pelo Procedimento A excederem 100  $\text{mm}^3$ .

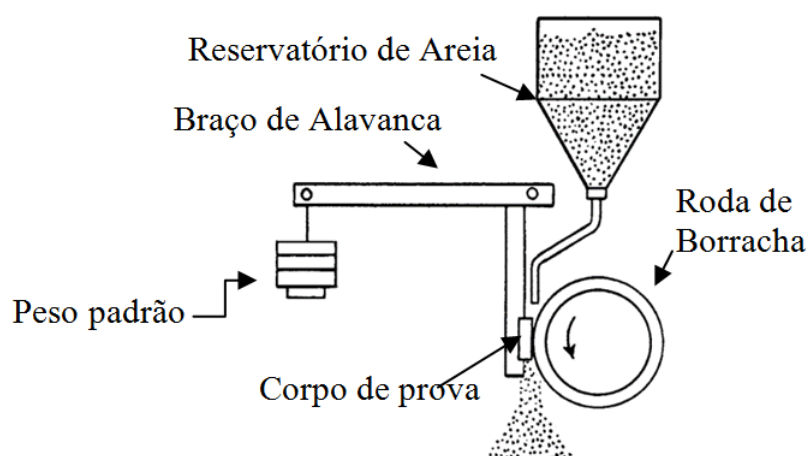
Procedimento C - Uma variação de curto prazo do Procedimento A para uso em revestimentos finos.

Procedimento D - Esta é uma variação de carga mais leve do Procedimento, o que é particularmente útil na classificação de materiais de baixa resistência à abrasão. Ele também é usado na classificação de materiais de um tipo genérico específico ou materiais que seriam muito próximos nas taxas de perda de volume conforme desenvolvido pelo Procedimento A.

Procedimento E - Uma variação de curto prazo do Procedimento B que é útil na classificação de materiais com resistência à abrasão média ou baixa.

O esquema de um equipamento para testes de abrasão utilizando areia seca com roda de borracha é apresentado na Figura 5.10. Vários elementos têm significativa importância para garantir a uniformidade dos resultados dos testes de abrasão, como o material da roda de borracha (dureza Shore A - 60), o abrasivo deve ser areia arredondada de quartzo (granulometria AFS 50/70) com teor de água menor que 0,5%, com um fluxo de 300g/min a 400g/min. A rotação da roda de borracha deve ser de 200 rpm, com a carga de 130 N aplicada no corpo de prova, conforme procedimento adotado para metragem da abrasão linear, ASTM (2016).

Figura 5.10 – Esquema do equipamento de ensaio de abrasão de borracha de rodas com Areia seca.

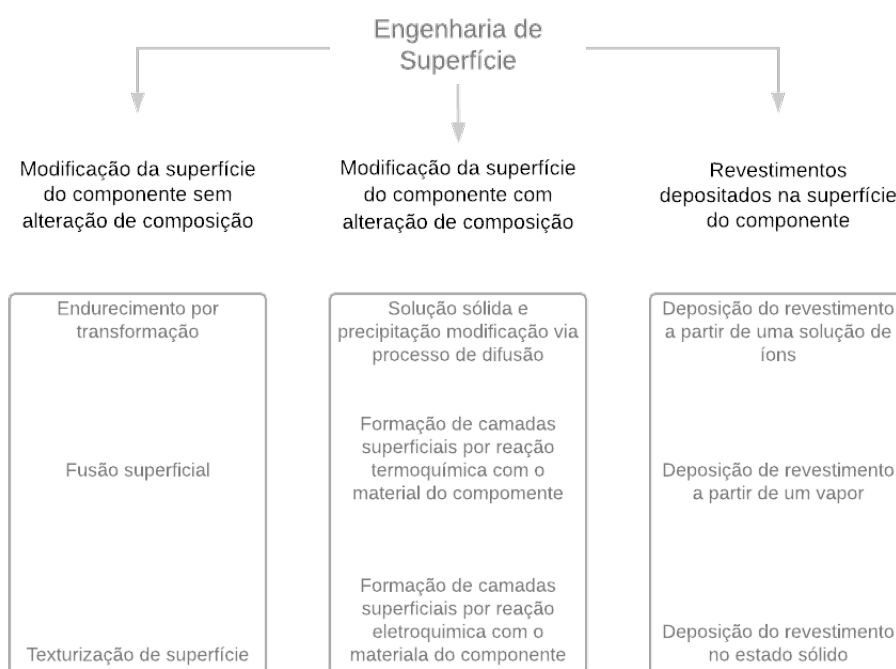


Fonte: Adaptado da ASTM G65-16 (ASTM, 2016)

### 5.3.1.4 Engenharia de Superfície

A engenharia da superfície envolve o aperfeiçoamento das propriedades da superfície do material independente daquela do substrato, podendo haver um aumento na resistência à corrosão ou comportamento tribológico dessa superfície (STEMPFLÉ et al., 2015). Há dois objetivos comuns no uso de engenharia de superfície para a aplicação tribológica: aumento a resistência ao desgaste ou a resistência a danos do componente e modificar seu comportamento de atrito, em alguns casos ambos podem ocorrer juntos. Os processos pelos quais um componente pode ser modificado superficialmente são classificados em três, Figura 5.11.

Figura 5.11 – Determinação da classificação dos métodos de engenharia de superfície.



Fonte: Stempflé et al. (2015)

O primeiro grupo consiste em processos que alteram a superfície de um componente sem que se altere a composição do substrato, como o endurecimento por transformação e a fusão da superfície.

O segundo grupo consiste em processo que modifica a superfície de alguma forma, com uma mudança na composição da camada superficial sendo uma característica crítica do processo. Neste grupo, pode-se modificar a estrutura cristalina existente formando uma solução sólida ou por ruptura da rede cristalina ou podem resultar em mudanças no comportamento de transformação (por exemplo, cementação de aços que leva a uma mudança na dureza e temperabilidade máximas). No entanto, eles também podem resultar diretamente na formação de novas fases, distintas daquelas do substrato, pela reação entre elementos do substrato e aqueles introduzidos pelo processo. Em alguns casos, a camada de engenharia de superfície é composta dessas novas fases na forma de precipitado dentro de uma matriz (por exemplo, nitretos de alumínio ou vanádio formados por nitretação de um aço adequado), enquanto em outros casos as novas fases formam uma camada distinta, (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Esta camada de reação pode ter todas as propriedades que normalmente se associariam a um revestimento (uma fase diferente com um limite distinto entre a camada e o substrato), mas esses processos são distintos dos processos de revestimento, já que a nova fase superficial não é adicionada para o substrato, mas forma a partir dele. A fronteira entre o substrato e a camada de reação é normalmente mais difusa do que aquela entre um revestimento verdadeiro e um substrato e a resistência de união é normalmente mais alta. Anodização (em que uma camada de alumina é formada em uma liga de alumínio) e boronização (onde camadas de boreto podem ser formados em ligas à base de ferro, titânio ou cobalto) são exemplos de tais processos, (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

O terceiro grupo consiste em processos que aplicam um material à superfície e são geralmente chamados de processos de revestimento. Aqui, a camada de engenharia de superfície é aplicada à superfície (em oposição a ser uma modificação do material original) e, conseqüentemente, a gama de métodos e materiais potenciais é vasta. Pintura, soldagem de revestimento, galvanoplastia e deposição de vapor químico são exemplos de processos dentro deste grupo. Novos revestimentos e processos estão sendo constantemente desenvolvidos e considerados para aplicações, e, em vez de tentar cobrir tudo isso, será apresentada uma estrutura na qual tais inovações podem ser compreendidas, (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Um material homogêneo pode ser definido por uma gama de propriedades que determinam sua resposta em termos de atrito e desgaste. Revestimentos podem ser projetados na superfície para melhorar a resposta do componente, porém o sistema não é definido apenas pelas propriedades da camada de engenharia de superfície e pelas propriedades do substrato, mas também pelas propriedades da interface, que podem ser classificadas como nítidas ou difusas, (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

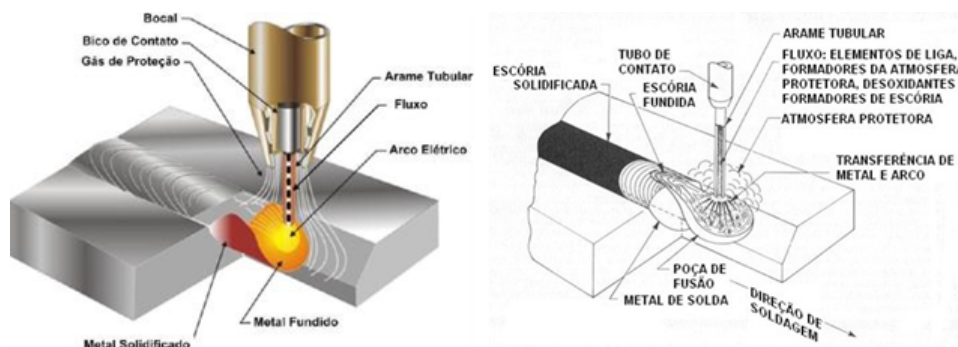
#### **5.3.1.5 Deposição de material pelo processo de soldagem com Arame Tubular**

A soldagem com arame tubular (FCAW) é um processo que promove a fusão dos metais pelo aquecimento destes pelo arco elétrico estabelecido entre o arame tubular eletrodo, contínuo e a peça de trabalho. O processo oferece duas variações que diferem no método de proteção do arco e da poça de fusão da contaminação atmosférica. No tipo autoprotetido a proteção do metal fundido é realizada pela decomposição e vaporização do fluxo do eletrodo pelo calor do arco. No outro tipo, com proteção gasosa, faz-se uso de um jato de gás protetor em adição à ação do fluxo do eletrodo. Em ambos os métodos, o material do fluxo do eletrodo protege

o arco elétrico da contaminação atmosférica, podendo atuar como desoxidante, acrescentando elementos de liga ao metal de solda, estabilizar o arco, além de fornecer um recobrimento substancial de escória para proteger a solidificação do metal de solda (WELDING-HANDBOOK, 1991).

A proteção do arco elétrico e da poça de fusão do processo FCAW pode ser realizada por um fluxo de soldagem contido dentro do eletrodo tubular, processo semelhante ao do eletrodo revestido, ou pode ser suplementado por um fluxo de gás fornecido por fonte externa, geralmente  $CO_2$  ou mistura de argônio (Ar) +  $CO_2$  (Processo similar ao GMAW - Gas Metal Arc Welding). A soldagem com arame tubular concentra características semelhantes ao do processo GMAW, no que diz respeito a equipamentos e, por outro lado, também apresenta características do processo SMAW (eletrodo revestido), no ponto de vista metalúrgico (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2005).

Figura 5.12 – Representação esquemática do processo Arames Tubulares: a) com proteção gasosa e b) autoprotégido.



Fonte: Lima e Ferraresi (2006)

Segundo Modenesi, Marques e Bracarense (2005) a soldagem com arame tubular reúne as principais vantagens do processo GMAW, como alto fator de trabalho, alta taxa de deposição e alto rendimento, que resultam em grande produtividade e as vantagens do processo do eletrodo revestido, como a alta versatilidade, possibilidade de ajuste de composição

química do metal depositado e facilidade operacional em campo. Algumas restrições remetem à produção de grande volume de gases e fumos que requerem eficiente sistema de exaustão, além da desuniformidade e aparência irregular dos cordões.

Kannan e Murugan (2006) acrescentam que o processo Arame Tubular tem sido preferido pelo setor industrial devido às seguintes características: alta taxa de deposição, especialmente para soldagens fora da posição plana; maior versatilidade que o processo Arco Submerso; requer menor habilidade que o processo GMAW; apresenta maior produtividade que o processo Eletrodo Revestido, além da boa aparência da solda, bom padrão de qualidade radiográfica e mínimo desperdício de eletrodo.

Aloraier, Ibrahim e Thomson (2006) afirmam que o processo Arame Tubular totalmente automático, pode-se obter custos inferiores aos outros processos comumente utilizados, devido à sua alta taxa de deposição, quando se alia a adição de fluxos à simplicidade do processo GMAW.

Os arames tubulares para soldagem são classificados pela American Welding Society (AWS) segundo as especificações apresentadas na Tabela 5.2. Diversos fatores são considerados nesta classificação, entre eles: enchimento de pó metálico ou fluxo convencional, uso de gás de proteção, tipo de corrente, posições de soldagem recomendadas, além da composição química e propriedades mecânicas do cordão obtido. Estes fatores também são considerados na escolha do tipo de arame para uma dada aplicação.

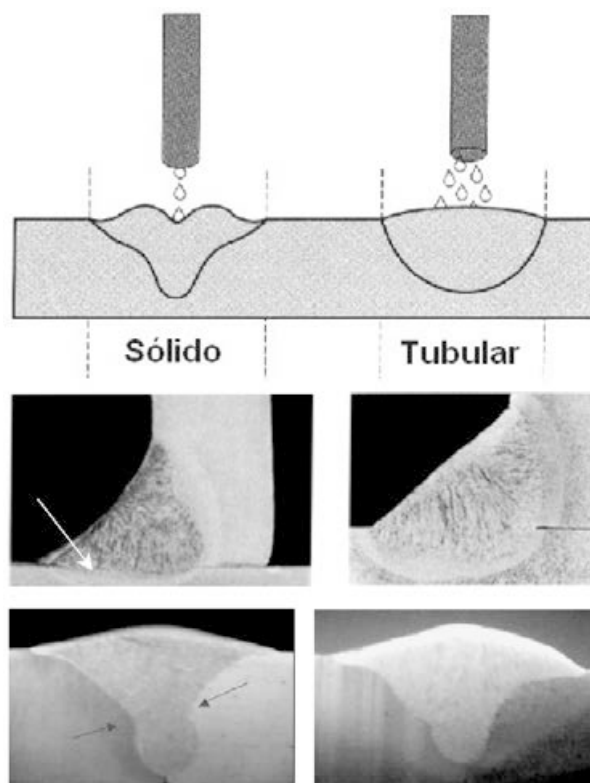
Tabela 5.2 – Especificações AWS de arames tubulares

Especificação	Consumível
AWS A 5.9	Arames de aço inoxidável com pó metálico interno
AWSA5.15	Arames para soldagem de ferro fundido
AWS A 5.18	Arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno
AWS A 5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A 5.21	Arames para revestimento
AWS A 5.22	Arames tubulares para soldagem de aço inoxidável
AWS A 5.29	Arames de aços de baixa liga com fluxo interno

Fonte: Modenesi, Marques e Bracarense (2005)

Os componentes do fluxo promovem a estabilidade do arco, influenciam nas propriedades mecânicas do metal de solda, bem como no perfil e geometria do cordão. Os cordões podem ser mais largos e com melhor perfil que os produzidos por arames sólidos, como ilustrado na Figura 5.13. Isso ocorre porque o arco de soldagem dos arames tubulares é, geralmente, mais largo. As gotas espalham-se e criam uma área de projeção maior, distribuindo a energia de soldagem mais uniformemente. A penetração dos arames tubulares tem uma forma mais rasa, porém mais larga, possibilitando uma tolerância maior para desalinhamentos da tocha em relação à junta e reduzindo o risco de defeitos de falta de fusão.

Figura 5.13 – Comparação entre os perfis de cordões de solda efetuados com arames sólidos (maciços) e tubulares.



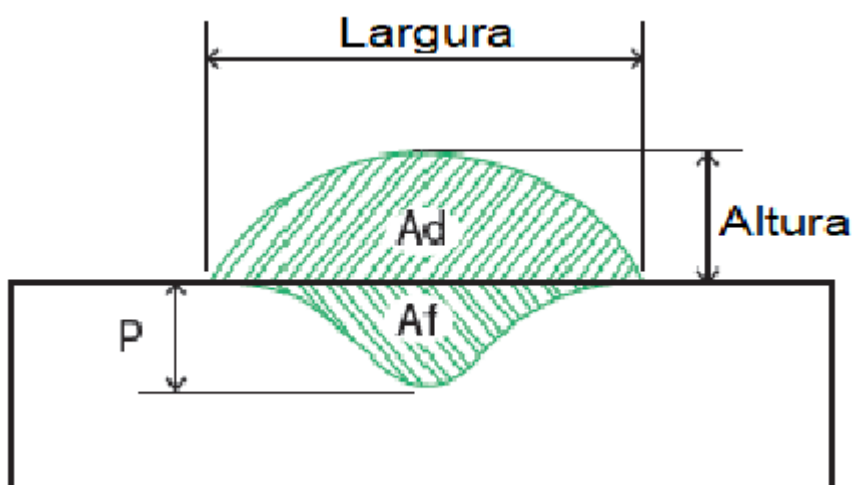
Fonte: Fortes (2004)

### 5.3.1.6 Diluição e resistência ao desgaste

A diluição é definida como a mudança na composição química de um metal de adição para soldagem causada pela sua mistura com o metal base ou metal de solda anterior. Na soldagem de revestimento não há necessidade de alta penetração, mas somente uma boa ligação entre o metal de solda e o metal de base. Desde que a composição química e as propriedades dos revestimentos são usualmente diferentes do metal de base, baixa diluição é desejada. Segundo Lima e Ferraresi (2010), afirmam que provavelmente a principal diferença entre a soldagem de junta e a soldagem de revestimento é que a segunda é afetada em maior grau pela diluição, Figura 5.14. Para não influenciar as propriedades do reves-

timento e sua composição, é desejável uma baixa diluição na soldagem, pois quando isso ocorre, a composição final do depósito é mais próxima da composição do metal de adição utilizado e, portanto, as propriedades mais próximas do valor desejado.

Figura 5.14 – Representação esquemática da seção transversal do revestimento soldado. Onde P - penetração, Ad - área do metal depositado e Af - área fundida.



Fonte: Autor

Ribeiro (2004) verificou que a perda de volume em ensaio de desgaste abrasivo de baixa tensão foi menor para revestimentos Fe-Cr-C com menor diluição. Entretanto, na soldagem em uma camada, essa relação foi mais evidente que em duas camadas de solda. Isso ocorre porque no último caso (duas camadas) o cordão de solda posterior refunde o primeiro, sofrendo então menor influência do metal de base (SCOTTI; ROSA, 1997).

A diluição do revestimento é diretamente proporcional ao aporte de calor utilizado, e a dureza tem comportamento inverso, ou seja, enquanto a diluição aumenta com o aumento do aporte térmico, a dureza do depósito tende a cair. Como consequência da maior diluição do consumível e da menor dureza do revestimento, a resistência ao desgaste é reduzida

com o aumento do aporte térmico, levando a uma maior perda de metal. De acordo com Ribeiro (2004), o efeito do aporte térmico na diluição, na dureza e na perda de volume de revestimentos duros (desgaste abrasivo de baixa tensão) depositados em camada única com eletrodo revestido de liga ferro-cromo-carbono.

Segundo Scotti e Rosa (1997), os revestimentos duros são muito frágeis e, durante o processo de soldagem, pode ocorrer o aparecimento de trincas. Estas trincas não são, necessariamente, indicadores de redução na resistência ao desgaste, podem até ser favoráveis por reduzirem as tensões internas. As trincas são indesejáveis nos casos de revestimentos estanques ou sob esforços dinâmicos que levem à fadiga e, conseqüentemente, ao arrancamento do revestimento. A amplitude de oscilação do eletrodo e a realização de pré-aquecimento têm papel importante na redução das trincas, as quais ocorrem em maior número na segunda camada de revestimento que na primeira. Isso ocorreria pela menor diluição na segunda camada.

#### **5.3.1.7 Variáveis operacionais no processo de soldagem de revestimento**

A seleção incorreta dos parâmetros de soldagem para a aplicação de revestimentos duros resistentes ao desgaste abrasivo pode resultar na obtenção de soldas com propriedades indesejáveis e de baixo desempenho. A tensão do arco elétrico e a intensidade de corrente exercem grande influência sobre a microestrutura e, conseqüentemente, na resistência ao desgaste abrasivo de baixa tensão de ligas Fe-Cr-C, enquanto a velocidade de soldagem apresenta um efeito menor. O aumento da tensão e a redução da corrente levam a um incremento considerável dos elementos de liga sob o metal de solda. O aumento dos teores de C e Cr reduzem a possibilidade de formação de austenita primária e aumento da formação

de microestrutura composta de carboneto primário do tipo M7C3 e eutético austenita-carbeto, a microestrutura que apresenta maior resistência à abrasão de baixa tensão (PARANHOS; MELLO, 1998).

Carceller (2007) verificou que na primeira camada, o aumento da energia de soldagem provoca uma redução da resistência ao desgaste abrasivo, mas na segunda e terceiras camadas, o resultado é oposto, ocorrendo ainda, redução na rugosidade da superfície abrasada. Os materiais com menor resistência ao desgaste abrasivo apresentam um aumento da rugosidade à medida que vão deteriorando a superfície.

Kannan e Murugan (2006) realizaram uma ampla investigação dos efeitos das variáveis de soldagem (corrente, velocidade de soldagem, distância bico de contato-peça e ângulo de inclinação da tocha para a frente) com arames tubulares sobre os parâmetros geométricos (largura, reforço, penetração) e diluição da solda de revestimento de aço inoxidável.

As principais constatações de Kannan e Murugan (2006) foram:

- a diluição e a penetração da solda aumentaram tanto com o aumento da corrente e com o diminuição da velocidade de soldagem e diminuíram com o aumento da distância entre o bico de contato da tocha e a peça (DBCP) e do ângulo de inclinação da tocha;
- a diluição decresceu com o aumento da DBCP para todos os níveis de corrente de soldagem, mas a taxa de queda caiu significativamente com a redução da corrente;
- a diluição reduziu com o aumento do ângulo da tocha para velocidades de soldagem superiores a 30 cm/min, mas a taxa de queda foi maior para velocidades maiores. Com velocidade de soldagem inferior a 30 cm/min, a diluição aumentou com o aumento do ângulo da tocha;

- o reforço aumentou com o aumento da corrente e da DBCP e reduziu com o aumento da velocidade de soldagem e ângulo da tocha;
- a largura do cordão aumentou com o aumento da corrente de soldagem, DBCP e ângulo da tocha e reduziu com o aumento da velocidade de soldagem;
- além disso, verificaram que a largura aumentou com a corrente em todos os níveis de velocidade de soldagem, mas a taxa de aumento da largura decresceu com o aumento da velocidade de soldagem. E o aumento no ângulo da tocha reduziu a penetração quando a velocidade de soldagem era alta, mas provocou um leve aumento para baixas velocidades.

### **5.3.2 Deposição de material em facas de colhedora mecanizadas de Cana-de-açúcar**

Partindo da premissa de que as faces das facas do corte basal possam influenciar os danos causados às soqueiras pela operação de colheita mecanizada e que o controle de qualidade possa manter estes danos em índices desejáveis, é possível quantificar o desgaste das facas de corte basal, Figura 5.15.

Segundo Voltarelli et al. (2015), a vida útil de facas de corte basal de cana de açúcar é em torno de 60 horas, utilizando facas com 4 lados de corte, o que apresenta melhor resultado em termos de desgastes, as facas revestidas com carboneto de tungstênio. Estas facas possuem espessura de 6 mm e a granulometria do revestimento é de 0,15 a 0,30 mm, com espessura de 0,5 a 1,0 mm. As facas sem revestimentos possuem ângulos de 10° e espessura de 6 mm.

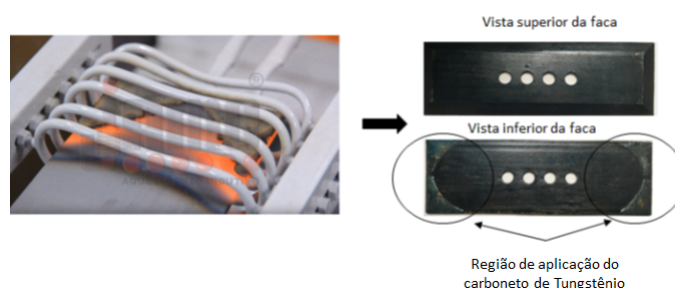
O processo de revestimento das facas se dá por meio da sinterização da pasta de Carboneto de Tungstênio, o qual é aplicada sobre a faca já

Figura 5.15 – Fotos de facas de corte basal desgastadas.



Fonte: AGRICORTE (2017)

Figura 5.16 – Revestimento da faca corte de base em carboneto de tungstênio. Máquina de Indução JAMO.



Fonte: AGRICORTE (2017) e JAMO (2018)

temperada com posterior aquecimento por indução, abaixo da temperatura de transformação do aço ( $< 700^{\circ}\text{C}$ ), conforme Figura 5.16, formando uma fina camada de carboneto de tungstênio que adere ao metal da faca de corte basal pelo processo de difusão.

Uma outra forma de se aplicar um revestimento duro, aumentando as propriedades mecânicas do substrato é a da deposição do metal duro por meio do processo de soldagem, ou seja, por aspersão térmica ou por arco elétrico por arame-tubular (FCAW) ou eletrodo revestido (SMAW, Shielded Metal Arc Welding). Tradicionalmente, a aplicação de revestimentos duros pelo setor industrial brasileiro tem sido realizada manualmente com

o processo Eletrodo Revestido ou de forma automática com o processo Arco Submerso, quando a geometria ou dimensões da peça se adequam a essa aplicação. Devido à sua maior produtividade em relação ao primeiro, aliada à maior versatilidade quando comparado ao segundo, o processo Arame Tubular tem se tornado uma alternativa importante, contando com uma grande variedade de consumíveis para diferentes aplicações de revestimentos duros, Figura 5.17.

Figura 5.17 – Facas desfibradoras desgastadas e recuperadas com o processo de deposição de metal duro com o processo de soldagem FCAW.



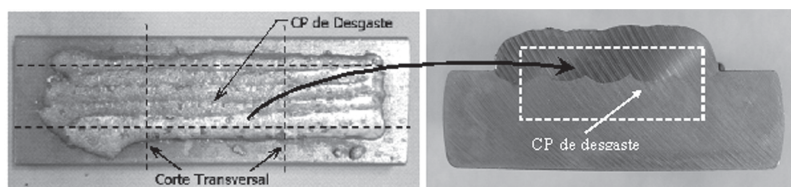
Fonte: Ribeiro (2004)

No processo de soldagem FCAW, utiliza-se arame eletrodo tubular com fluxo, o qual é alimentado continuamente por um carretel e acionado por uma tocha, que pode ser manuseada manualmente, mecanizada ou por um braço robótico, sendo que os dois últimos métodos de manuseio têm as vantagens do controle da velocidade de soldagem e angulação da tocha. O calor necessário para fundir o metal base, o eletrodo tubular e os fluxos são produzidos pelo arco elétrico entre a peça de trabalho e o eletrodo. O núcleo do eletrodo contém elementos de liga que modificam o metal de solda, desoxidantes, elementos de que tem a função de remoção de gases dissolvidos dentro da poça de fusão, estabilizadores, elementos escori-ficantes e materiais de fluxo. A maior penetração do metal base e maiores

taxas de deposição de metal de solda tornam o processo FCAW superior às técnicas comuns de soldagem disponíveis que usam fios sólidos como soldagem a arco manual (SMAW) e soldagem por arco de metal (GMAW, Gas Metal Arc Welding), especialmente em aplicações como a soldagem de chapas grossas em estaleiros, caldeiras, vasos de pressão, aço estrutural, etc., embora o processo seja limitado a metais ferrosos e ligas à base de níquel (KATHERASAN et al., 2014).

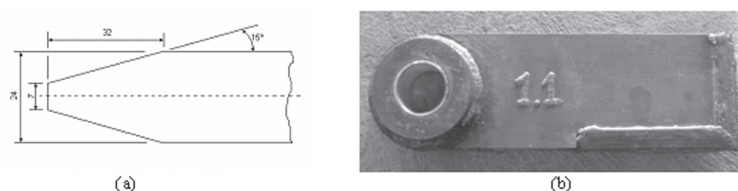
Lima e Ferraresi (2010) realizaram um estudo sobre a deposição de metal duro em facas picadoras de cana-de-açúcar utilizados na indústria canavieira. Para isso, foram utilizados três tipos de arames tubulares auto protegidos de 1,6 mm de diâmetro, de ligas FeCrC, FeCrC+Nb, FeCrC+Ti. Neste caso, o metal base utilizado foi um aço SAE 1020 (Figura 5.18 e Figura 5.19).

Figura 5.18 – Chapa de testes e região de extração dos corpos de prova (CP de desgaste) para avaliação de desgaste de dimensões 10 x 25 x 55 mm.



Fonte: Lima e Ferraresi (2010)

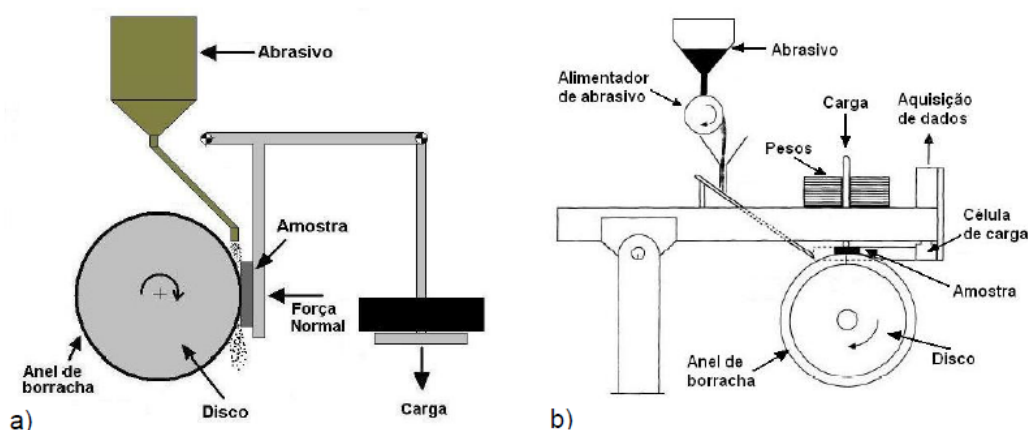
Figura 5.19 – Vista de uma Faca Picadora. (a) Perfil e dimensões do bisel. (unidade mm); (b) Detalhe de uma faca após aplicação do revestimento de dimensões de 24 x 180 x 580 mm.



Fonte: Lima e Ferraresi (2010)

Para a verificação do desgaste em laboratório, utilizaram um abrasômetro Roda de Borracha segundo a norma ASTM G65 (ASTM, 2000) e posteriormente foram construídas facas picadoras com as mesmas condições de soldagem e montadas no picador de uma destilaria de álcool. A avaliação do desgaste foi realizada pela perda de massa, Figura 5.20. Verificou-se que o arame FeCrC apresentou menor resistência ao desgaste, o arame FeCrC+Nb apresentou maior resistência ao desgaste e o revestimento FeCrC+Ti apresentou uma resistência intermediária ao desgaste.

Figura 5.20 – Abrasômetro Roda de borracha: (a) esquema padronizado pela ASTM (2000) e (b) equipamento construído por Stevenson e Hutchings (1996).



Fonte: Lima e Ferraresi (2010)

#### 5.4 Utilização de Metais Pesados e Ligas Metálicas em facas do corte basal

A contaminação do solo por metais pesados é uma das preocupações mais urgentes no debate sobre a segurança alimentar na Europa e no mundo Kong (2014), já que em pesquisas realizadas tanto na Europa, China e EUA, Li et al. (2017) identificaram a presença de metais pesados nas mesas do consumidor final como resultado do plantio de alimentos em áreas contaminadas por metais pesados.

Segundo Tóth et al. (2016), o número de locais contaminados na União Europeia e a área afetadas por diferentes tipos de poluição, cuja a recuperação custaria €17,3 bilhões por ano, demonstrando a extensão do problema no continente. Além da contaminação do solo, que pode levar à degradação da qualidade da água e uma série de impactos negativos sobre o meio ambiente, a propagação de metais pesados em toda a cadeia alimentar tem sérias consequências para a saúde humana.

Tóth et al. (2016) indicaram os principais elementos e suas potencialidades tóxicas presente nos solos agrícolas da União Europeia (Tabela 5.3), destacando-se As, Cd, Cr, Cu, Hg, Zn, Sb, Co e Ni. Também foi levantado o teor de metais pesados no solo e avaliados em função dos limiares específicos de contaminação do solo e destacar a necessidade de intensificar o monitoramento ou ação de remediação para eliminar riscos à saúde humana. Com o objetivo de caracterizar os estados de contaminação do solo em solos europeus, classificam as amostras de solo LUCAS (Land use and land cover survey - Levantamento de uso da terra e cobertura do solo) pelos seus valores de concentração de metais pesados por elementos usando o valor limite e padrões de valor de referência do Ministério do Meio Ambiente da Finlândia – MEF (2007) em quatro categorias. As amostras de solo na primeira categoria não têm conteúdo detectável ou a concentração está abaixo do valor limite definido pelo MEF. A concentração do elemento investigado na segunda categoria está acima do valor limite, mas abaixo do menor valor de referência. A terceira categoria inclui amostras nas quais a concentração de um ou mais elementos excede o valor da diretriz inferior, mas está abaixo do valor mais alto da diretriz, enquanto a quarta categoria inclui amostras com concentrações acima do valor da diretriz mais alta. Para avaliar as terras agrícolas, aplicaram-se o limiar e valores de referência mais baixos para amostras provenientes de

áreas agrícolas e os valores limite e valores de referência mais elevados para todas as amostras.

Tabela 5.3 – Limites e e valores de referência para metais em solos MEF (2007)

Sustância (Símbolo)	Valor Limite mg/Kg	Menor Valor de referência mg/Kg	Maior Valor de referência mg/Kg
Antimônio (Sb) (p)	2	10 (t)	50 (e)
Arsênio (As) (p)	5	50 (e)	100 (e)
Mercúrio (Hg)	0,5	2 (e)	5 (e)
Cádmio (Cd)	1	10 (e)	20 (e)
Cobalto (Co) (p)	20	100 (e)	250 (e)
Cromo (Cr)	100	200 (e)	300 (e)
Cobre (Cu)	100	150 (e)	200 (e)
Chumbo (Pb)	60	200 (t)	750 (e)
Níque (Ni)	50	100 (e)	150 (e)
Zinco (Zn)	200	250 (e)	400 (e)
Vanádio (V)	100	150 (e)	250 (e)

Legenda: Os valores das diretrizes foram definidos com base nos riscos ecológicos (e) ou riscos à saúde (t). Se o risco de contaminação da água subterrânea for maior do que o normal em concentrações abaixo do valor de referência mais baixo, as substâncias são marcadas com a letra p.

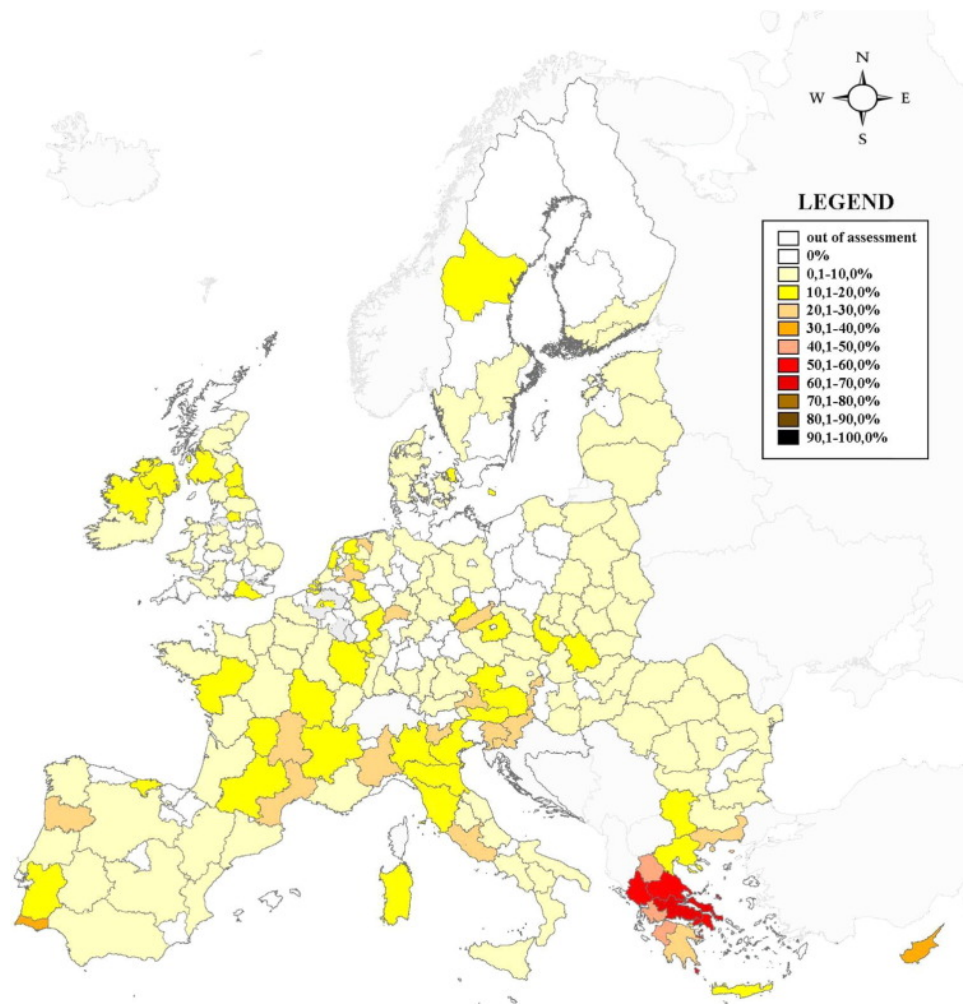
Fonte: MEF (2007)

O possível motivo das concentrações acima do limite de metal pesado no solo, conforme valores apresentados na Tabela 5.3, da União Europeia ter maior incidência em terras agrícolas, se deve ao fato de que as terras destinadas as florestas, que fornecem o segundo maior número de amostras LUCAS, são menos afetados pela contaminação de metais pesados.

A porcentagem relativamente alta (6,24%) de amostras com qualquer tipo de concentração de metais pesados acima do valor de referência estabelecido para terras agrícolas sugere que cerca de 137.000  $km^2$  afetadas até certo grau (Figura 5.21). Além disso, 2,56% das amostras de terras agrícolas continham metais pesados em concentração que exigiriam

remediação também se fossem de áreas industriais ou de transporte, com base nos valores das diretrizes aplicadas.

Figura 5.21 – Percentagem de amostras com concentrações acima do valor de referência inferior nas amostras LUCAS de terras agrícolas.



Fonte: Tóth et al. (2016)

#### 5.4.1 Adição de cromo em revestimentos de facas do corte basal

Apesar do Cromo apresentar risco apenas ambiental, segundo o MEF (2007), por se tratar de uma substância bastante utilizada em revestimento duro para o aumento do desgaste em equipamentos agrícolas, torna-se de interesse uma análise mais aprofundada deste elemento aplicado na prática agrícola.

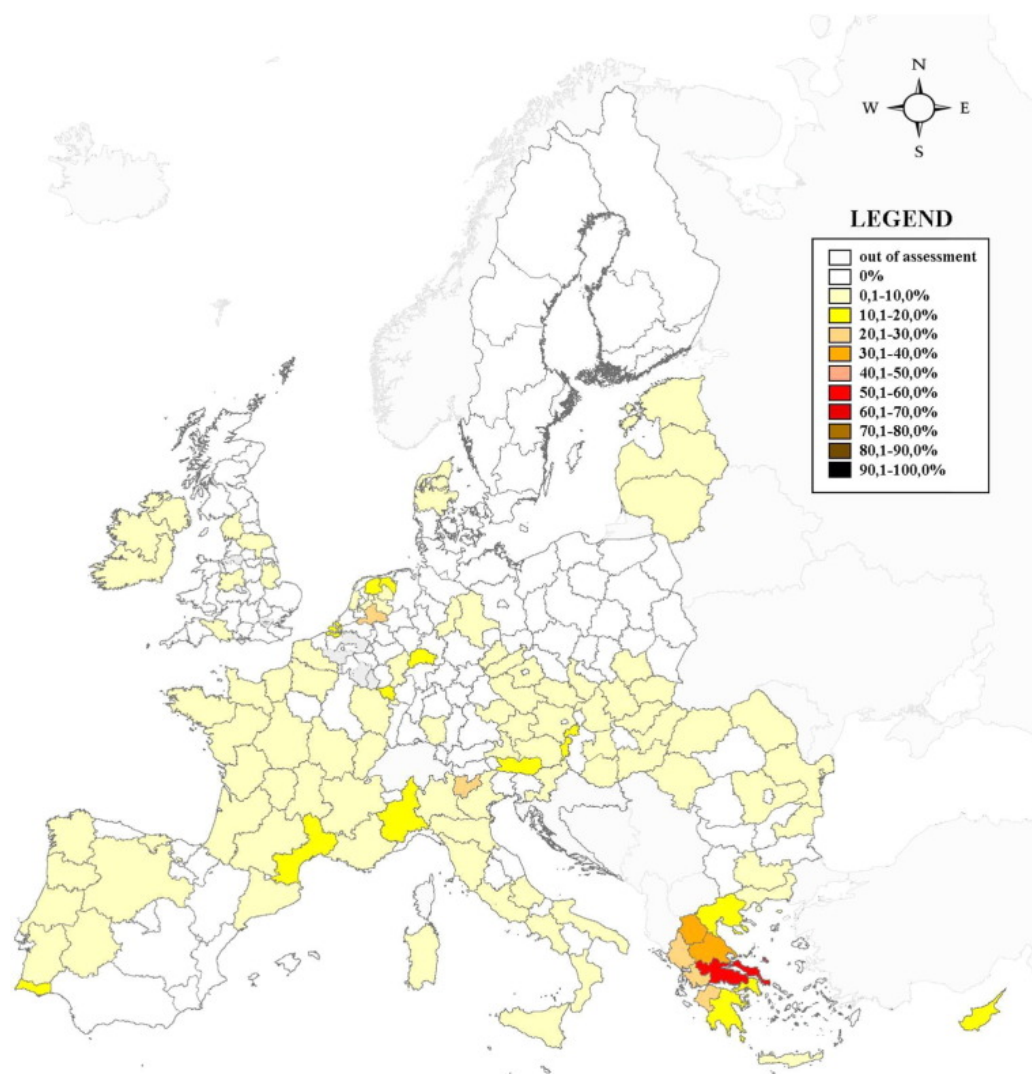
Estudos mostram que a concentrações de cromo (Cr) no solo da União Europeia é abundante e 4,4 % de todas as amostras estavam acima do valor limite. Embora esse número seja aparentemente baixo, amostras com concentrações acima do limite podem ser encontradas em metade das regiões NUTS2 (Nomenclature of Territorial Units for Statistics. Eurostat – Nomenclatura de Unidades Territoriais para Fins Estatísticos) da União Europeia. O que é mais perceptível, se olhar para terras agrícolas é que 2,7% estão acima do limiar e 1,1% do as amostras estavam acima do valor de referência (TÓTH et al., 2016).

A Figura 5.22 apresenta concentrações de cromo no solo, em que cerca de 2 milhões de hectares de terras agrícolas estão em risco ecológico. Como a exposição prolongada a doses elevadas de Cr pode causar efeitos adversos no fígado e nos rins e remediação em situações de solos afetados por alta concentração de cromo podem ser bastante complicados. Neste caso, seria importante tomar medidas, como por exemplo, o controle de fontes industriais, para evitar qualquer aumento adicional de Cr no solo (TÓTH et al., 2016).

Vale ressaltar que o maior risco decorrente do cromo do solo está associado à sua forma hexavalente e o Cr trivalente é relativamente imóvel no solo, apresentando assim menor risco.

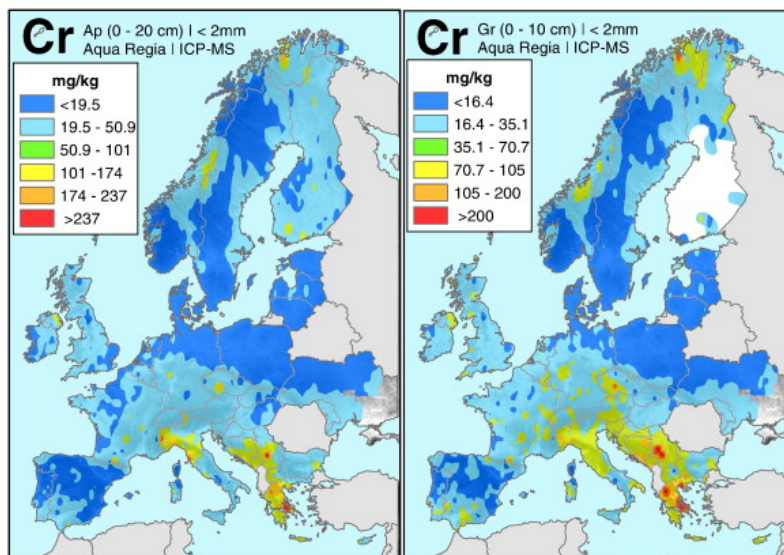
Estudos realizados por Albanese et al. (2015) sobre as concentrações de Cr, tanto em solo agrícola quanto em solo de pastagem, utilizando dois métodos distintos, foi possível desenhar o perfil de concentração de Cr em toda a União Europeia, conforme Figura 5.23.

Figura 5.22 – Percentagem de amostras com concentrações acima do valor de referência mais elevado em amostras LUCAS de terras agrícolas.



Fonte: Tóth et al. (2016)

Figura 5.23 – Mapas interpolados da razão entre as concentrações de amostras de solo Cr em solo agrícola - Ap (a) e solo de pastagem - Gr (b).



Fonte: Adaptado Albanese et al. (2015)

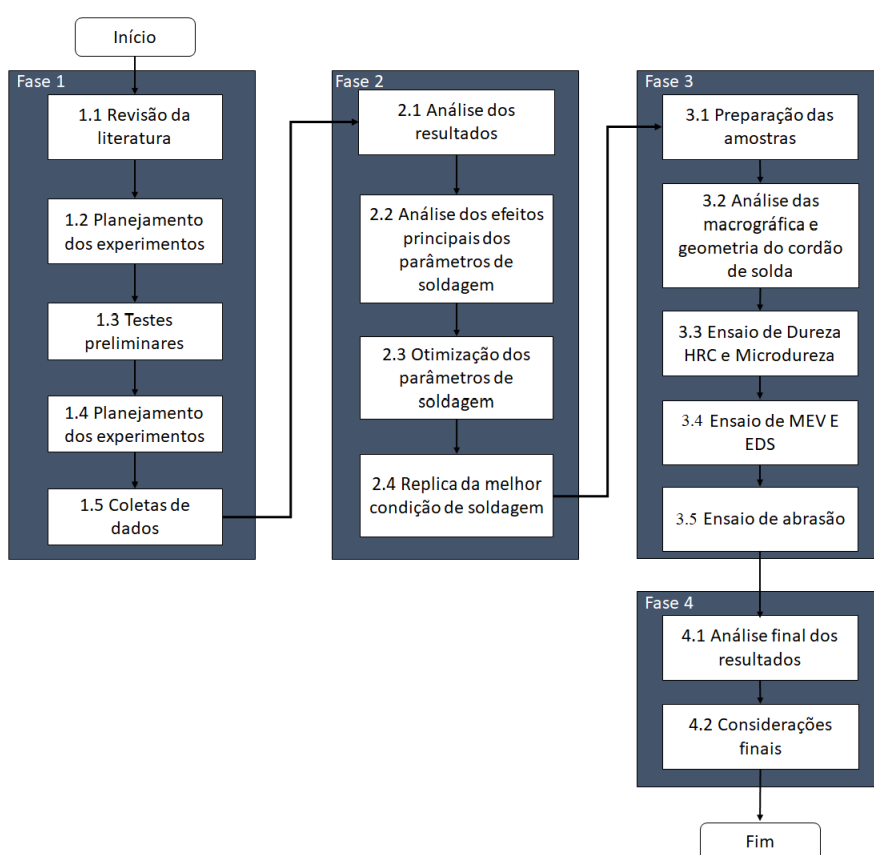
Zhuk (2017) relata que a utilização de revestimento de cromo duro será banido em breve sem autorização especial na União Européia sob os regulamentos ambientais, de registro, avaliação, autorização e restrição de produtos químicos (REACH) e de saúde e segurança. Além disso, a Administração de Segurança e Saúde Ocupacional dos EUA (OSHA) está impondo restrições cada vez mais rígidas.

*Hardide*<sup>®</sup> é uma família de CVD de baixa temperatura (deposição de vapor químico) revestimentos à base de carboneto de tungstênio que aumentam a vida útil do metal componentes operando em abrasivos, erosivos e quimicamente agressivos ambientes. Os revestimentos têm uma combinação única de abrasão, erosão e propriedades de resistência química, sendo resistente, dúctil e resistente a impactos, que foi desenvolvido especificamente para atender às necessidades da indústria aeroespacial e como um substituto direto para o cromo duro, que enfrenta as restrições impostas pela regulamentação EU REACH e OSHA dos EUA (VERNHES; AZZI; KLEMBERG-SAPIEHA, 2013).

## 6 MATERIAL E MÉTODOS

Para determinar os parâmetros de soldagem e a caracterização do revestimento duro sem a adição de Cromo a ser depositado em facas de corte basal, elaborou-se o fluxograma, Figura 6.1, o qual representa, esquematicamente, as quatro fases de execução deste projeto de pesquisa.

Figura 6.1 – Fluxograma das etapas do projeto



Fonte: Autor

Para a concretização dos objetivos propostos neste projeto, foram realizados testes de soldagem, com arame tubular a base de carboneto de titânio e nióbio (TiCNb), para a deposição do revestimento duro sem a adição de cromo. Os testes foram realizados nas dependências do Laboratório de Soldagem e Inovação Tecnológica (LABSIT) do CEFET – MG, localizado em Varginha / MG, foi utilizada a Fonte de Soldagem

Marca Lincoln Electric, Modelo Idealarc CV 420, com cabeçote tracionador de arame Modelo LF33, utilizados nos processos de soldagem GMAW e FCAW com ou sem adição de gás de proteção, conforme Figura 6.2.

Figura 6.2 – Fonte de Soldagem Marca Lincoln Electric , Modelo Idealarc CV 420, com cabeçote tracionador de arame Modelo LF33

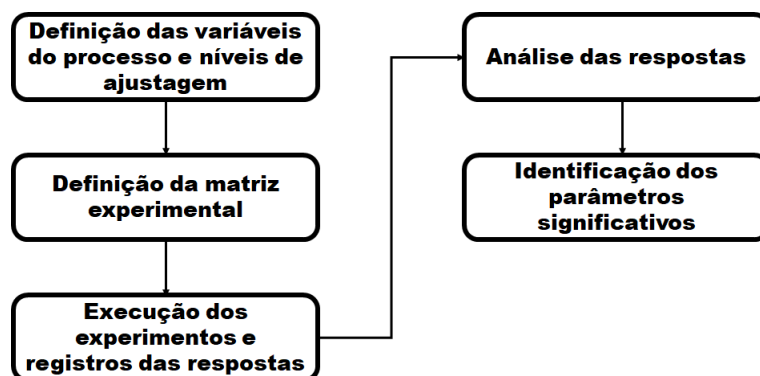


Fonte: Autor

O método de pesquisa utilizado foi a experimentação, a qual se caracteriza por realizar mudanças nas variáveis relacionadas com o objeto de estudo (SILVA; BERVIAN; CERVO, 2007). O método experimental foi dividido em duas fases.

1ª Fase – Planejamento Fatorial Completo: utilizado para determinação dos parâmetros significativos (Figura 6.3).

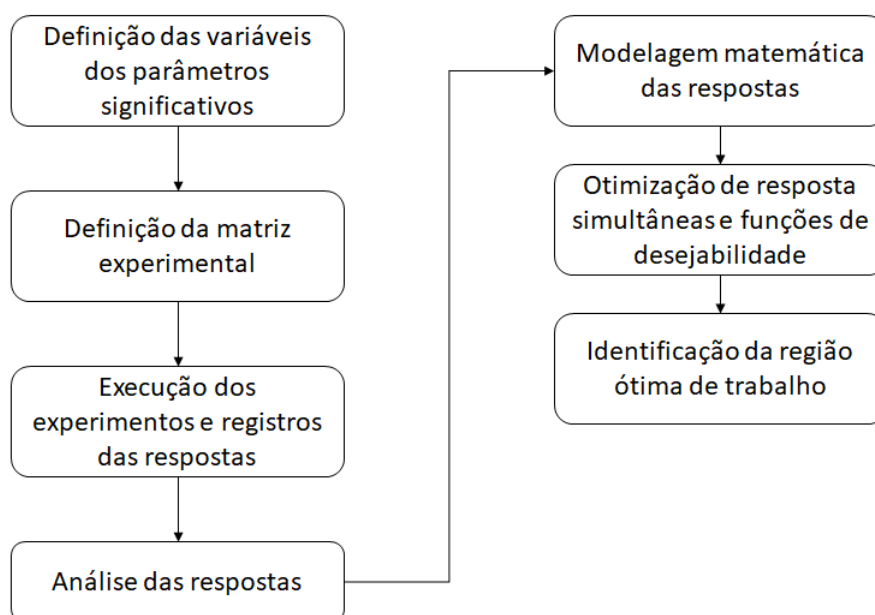
Figura 6.3 – Método experimental – 1ª Fase



Fonte: Autor

2ª Fase – Planejamento Fatorial Completo: utilizado para a otimização dos parâmetros significativos (Figura 6.4).

Figura 6.4 – Método experimental – 2ª Fase



Fonte: Autor

A técnica de experimento fatorial completo ( $2^k$ ) consiste em um experimento com  $k$  fatores, sendo cada um deles compostos por dois níveis. Neste tipo de experimento são realizados testes com todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. Após a realização dos testes,

são identificados os efeitos principais e de interação dos fatores, sendo deste modo possível determinar as melhores condições experimentais do produto ou processo de fabricação (COLOMBARI, 2004).

O modelo estatístico de regressão múltipla para um experimento fatorial  $2^3$ , é representado pela Equação 6.1. Ressalta-se que, com um número elevado de fatores, a utilização do fatorial completo torna-se, muitas vezes inviável, devido ao elevado número de experimentos necessários para sua realização (MONTGOMERY et al., 2005).

$$Y = k + k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3 + k_4x_1x_2 + k_5x_1x_3 + k_6x_2x_3 + k_7x_1^2 + k_8x_2^2 + k_9x_3^2 \quad (6.1)$$

Onde:

$k$  é a constante;

$k_1$  é o coeficiente do fator de controle  $x_1$ ;

$x_1$  é o primeiro fator de controle;

$k_2$  é o coeficiente do fator de controle  $x_2$ ;

$x_2$  é o segundo fator de controle;

$k_3$  é o coeficiente do fator de controle  $x_3$ ;

$x_3$  é o terceiro fator de controle;

$k_4$  é o coeficiente da interação entre os fatores  $x_1x_2$ ;

$x_1x_2$  é a interação entre o primeiro e o segundo fator de controle;

$k_5$  é o coeficiente da interação entre os fatores  $x_1x_3$ ;

$x_1x_3$  é a interação entre o primeiro e o terceiro fator de controle;

$k_6$  é o coeficiente da interação entre os fatores  $x_2x_3$ ;

$x_2x_3$  é a interação entre o segundo e o terceiro fator de controle;

$k_7$  é o coeficiente de segunda ordem do termo  $x_1$ ;

$k_8$  é o coeficiente de segunda ordem do termo  $x_2$ ;

$k_9$  é o coeficiente de segunda ordem do termo  $x_3$ .

Com o objetivo de determinar as faixas dos valores para os itens de verificação (variáveis de resposta), associados aos fatores controláveis (va-

riável controlada) do processo de soldagem (Tabela 6.1) foi criado um experimento fatorial design completo  $2^3$  com delineamentos composto central rotacional (DCCR) referente as três variáveis controladas (Tensão de Soldagem, Corrente de Soldagem e Velocidade de Soldagem).

Tabela 6.1 – Tabela de Variáveis Controladas

Variáveis Controladas	Unidade
Corrente de Soldagem	Amper
Tensão de Soldagem	Volts
Velocidade de Soldagem	cm/min

Fonte: Autor

Tabela 6.2 – Tabela de Variáveis Resposta

Variáveis de Resposta	Unidade
Penetração do revestimento duro	mm
Largura do revestimento duro	mm
Altura do revestimento duro	mm
Diluição do revestimento duro no substrato	%
Dureza da Superfície do revestimento duro	HRC

Fonte: Autor

A Tabela 6.3 resume o experimento a ser realizado e a Tabela 6.4 indica os tipos de pontos a serem explorados.

Tabela 6.3 – Tabela do resumo do experimento

Fatores:	3	Réplicas:	1
Ensaio base:	20	Total de ensaios:	20
Blocos Base:	1	Total de blocos:	1

$\alpha = 1,68179$

Fonte: Autor

Tabela 6.4 – Tabela Tipos de Pontos do experimento

Pontos do cubo:	8
Pontos centrais no cubo:	6
Pontos Axiais:	6

Fonte: Autor

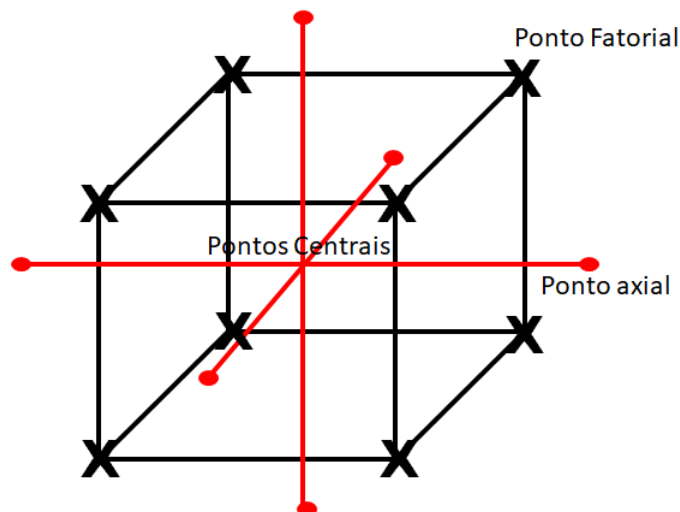
A Tabela 6.5 indica os fatores e os níveis das variáveis independentes (valores de Corrente, Tensão e Velocidade) estabelecido conforme testes preliminares para a determinação de uma faixa de parâmetros de soldagem, onde observou-se um visual de solda sem a presença de trincas superficiais do revestimento duro, alto índice de respingos e uma penetração da solda mínima de 0,8 mm. O DCCR está representado, de maneira esquemática, por meio da Figura 6.5.

Tabela 6.5 – Tabela de fatores e níveis de operação a serem testados

Fatores / Níveis	-1,68	-1	0	+1	+1,68
U [V]	16	17	19	20	2
I [A]	122	134	151	168	179
V [cm/min]	24	30	38	47	52

Fonte: Autor

Figura 6.5 – Representação esquemática do delineamento composto central rotacional (DCCR).



Fonte: Adaptada de Rodrigues e Iemma (2005)

A partir da elaboração do planejamento de experimento fatorial design completo, foram realizados testes preliminares de soldagem utilizando um arame de solda comercial tubular de revestimento duro a base de TiCNb sem a adição de Cromo, com diâmetro de 1,6 mm, auto protegido (sem a necessidade de gás de proteção para o arco elétrico e a poça de

fusão durante a soldagem). Estes ensaios foram realizados em uma bancada experimental automatizada para padronizar e garantir repetibilidade dos mesmos (Figura 6.6).

Figura 6.6 – Bancada experimental. (1) bancada, (2) Carro deslocador da tocha , (3) Suporte de posicionamento da tocha, (4) Tocha de Soldagem, (5) Cabo Terra, (6) Amostra, (7) Fonte de soldagem e Cabeçote alimentador.

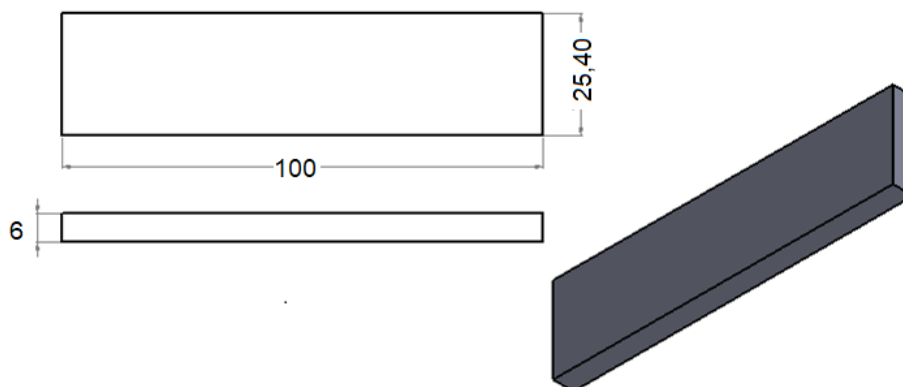


Fonte: Autor

As amostras, foram confeccionados em aço carbono, ASTM A36, adquiridos na forma de barra chata na espessura de 6 mm, por 25,4 mm de largura e comprimento de 6000 mm. As amostras foram usinados com o comprimento de 100 mm, no próprio fornecedor da chapa, conforme Figura 6.7

A metodologia utilizada para as análises das respostas obtidas no DCCR foi a superfície de resposta, que é, atualmente, o mais popular conjunto de técnicas para otimização. Após executar o planejamento, foi

Figura 6.7 – Amostra para soldagem, chapa de aço carbono SAE 1020 com dimensões 100 x 25,4 x 6 mm.



Fonte: Autor

ajustada a modelagem matemática, ajustando-se modelos lineares ou quadráticos a resultados experimentais, obtidos através de planejamentos fatoriais com ou sem ampliação (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001). Após esta etapa foi possível deslocar-se sobre a superfície de resposta ajustada, a fim de localizar regiões que satisfaçam condições de interesse.

Porém, em soldagem, existe o problema da multiplicidade de respostas. O desenvolvimento de parâmetros de soldagem para deposição de revestimento duro, por exemplo, penetração, altura, largura, diluição e dureza do revestimento depositado, requer tratamento conjunto.

Uma abordagem eficiente desse problema exige a sistematização de técnicas computacionais que possam estimar a melhor combinação dos fatores que resulte na melhor combinação possível das respostas, considerando a importância relativa de cada resposta para o sistema estudado. O emprego da função de desejabilidade (FD) é uma das técnicas que permite uma resolução para esse tipo de problema (maximizar, minimizar e/ou específico) (DERRINGER; SUICH, 1980).

Em síntese, a FD visa a converter um problema de várias respostas em uma única resposta por meio de um procedimento de normalização. Com este procedimento, dado varias variáveis ( $j = 1, \dots, p$ ) a interpretação da FD, representado pelo índice  $d_j$  ( $j = 1, \dots, p$ ) para cada variável resposta, considerada uma escala de 0 a 1. Os valores de  $d_j = 0$  indica que o ponto ótimo é insatisfatório e  $d_j = 1$  o ótimo é considerado desejável ou satisfatório. (CIRILLO, 2015).

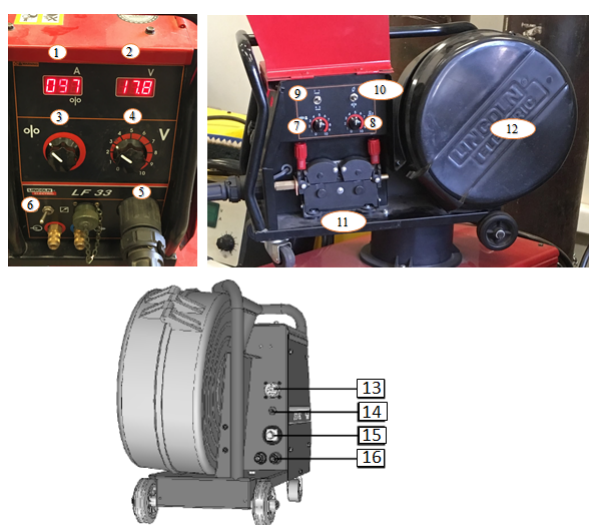
### 6.1 Procedimento de Soldagem

O substrato utilizado para a deposição do revestimento duro sem a adição de cromo foi um aço carbono ASTM A36, conforme certificado no anexo B. A deposição do revestimento sobre a chapa foi realizada em ordem aleatória, no sentido de garantir que os efeitos de fatores não-controlados, que afetam a variável resposta e que podem estar presentes durante a realização do experimento, sejam compensados em todas as variáveis respostas.

A amostra utilizada para a deposição do revestimento duro pelo processo de soldagem FCAW foi posicionado na bancada e deu-se início ao processo de obtenção dos parâmetros de soldagem. Com base nas respostas do ensaio visual de solda, verificou-se presença ou não de discontinuidades superficiais e a macrografia do revestimento duro (dimensional da seção transversal do revestimento duro (largura, altura e penetração), após o tratamento metalográfico da amostra. Os parâmetros de soldagem (tensão e corrente), foram inseridos no painel do cabeçote alimentador de arame, Figura 6.8.

Para realizar o deslocamento da tocha com uma velocidade controlada linear e constante foi utilizado um carro deslocador de tocha, conforme Figura 6.9.

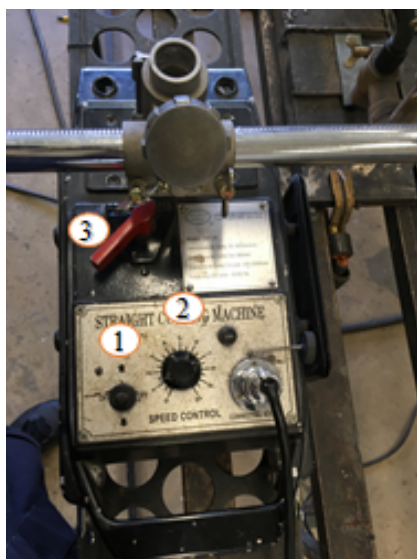
Figura 6.8 – Painel de controle do cabeçote alimentador de arame, onde: (1) Visor digital A; (2) Visor Digital V; (3) Botão de Controle WFS; (4) Botão de Controle da Tensão de Saída; (5) EURO Socket; (6) Interruptor Local/Remoto; (7) Botão de Controle de Velocidade Lenta do Alimentador; (8) Botão de Controle do tempo de Burnback; (9) Interruptor do Modo da Tocha; (10) Interruptor Cold Inch / Gas de Purga; (11) Motor de impulsionar (Driver) do Arame; (12) Suporte da bobina de arame eletrodo; (13) Conector de Amphenol; (14) Conector de gás; (15) Conector de potência de entrada e (16) Acoplamento de conectores rápidos.



Fonte: Autor

A distância entre o bico de contato da tocha e a peça (DBCP) foi definida com 10 mm, após testes preliminares onde foram utilizados níveis mais altos de tensão e corrente de soldagem e foram verificados altos índices de respingos e porosidades no revestimento duro. A variável DBCP tem influência direta com a penetração, pois quanto maior a DBCP mais maior a tensão do arco, portanto maior a penetração e conseqüentemente com a diluição. Para controlar a DBCP, foi utilizado um gabarito, confeccionado em arame de aço inoxidável, conforme Figura 6.10. A DBCP foi verificada antes do início de revestimento duro dos testes delineado pelo experimento fatorial, garantindo a não variabilidade da DBCP, o qual pode influenciar nas variáveis respostas.

Figura 6.9 – Painel de controle do carro deslocador linear da tocha: (1) Interruptor de acionamento do carro deslocador em ambas direções, (2) Potenciômetro controlador da velocidade de deslocamento linear e (3) Chave de acoplamento do motor do carro deslocador.



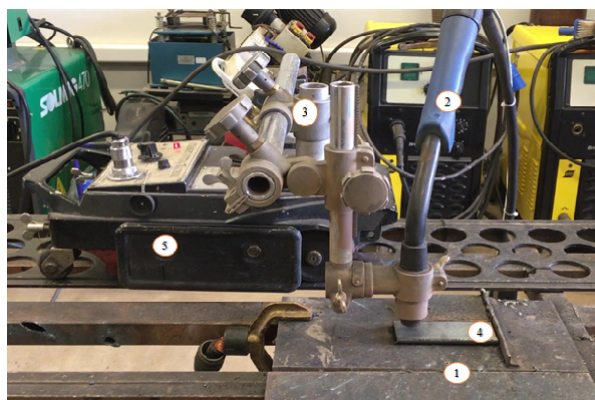
Fonte: Autor

Figura 6.10 – Gabarito de controle de distância bico de contato peça (DBCP).



Fonte: Autor

Figura 6.11 – Posicionamento da tocha de soldagem para a realização da soldagem da amostra: (1) Berço de soldagem; (2) Tocha de soldagem; (3) Suporte ajustável; (4) Carro deslocador linear.



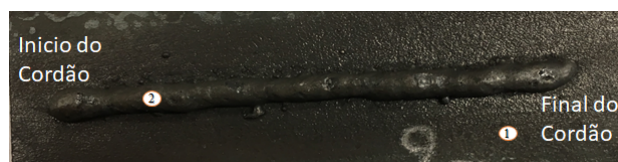
Fonte: Autor

Para realizar os testes de soldagem delineado pelo experimento fatorial design, a amostra de soldagem foi posicionado sobre o berço de soldagem da bancada de teste, a tocha acoplada ao suporte regulável do carro deslocador e ajustada de forma a permanecer centralizada, e, na extremidade da amostra, utilizou-se a DBCP de 10 mm, Figura 6.11.

Para cada faixa de parâmetros preliminares de soldagem, um planejamento de experimento fatorial  $2^3$  completo foi gerado. Os valores de tensão, velocidade de alimentação de arame (que está correlacionado com a corrente de soldagem) e velocidade de soldagem, foram ajustados no painel de controle do cabeçote alimentador de arame eletrodo e no carro deslocador. Foram soldados 20 amostra conforme os parâmetros delineados no planejamento de experimento, sendo que em cada amostra foi depositado um revestimento duro, Figura 6.12. Posteriormente, realizou-se o ensaio de visual de solda nas amostras e em sequência, os mesmos foram encaminhados para o Laboratório de Ensaio Destrutivos e Não Destrutivos (LABEN) do CEFET - MG, Varginha, onde foram preparados metalograficamente. A amostra após a soldagem foi cortado na região central da solda com uma policorte, embutindo em baquelite, lixado em uma ba-

teria de lixas 220, 400, 600 e 1200 mesh e polida com alumina de 3  $\mu\text{m}$ , conforme esquema Figura 6.14), para a realização dos ensaios de dureza, macrografia, micrografia, microdureza, MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) e EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva). As análises de MEV e EDS foram realizadas apenas para a amostra com revestimento duro com o parâmetro ótimo e para a amostra com revestimento duro de carboneto de tungstênio (WC).

Figura 6.12 – Deposição do revestimento duro sobre a amostra: (1) Amostra; (2) Revestimento duro.



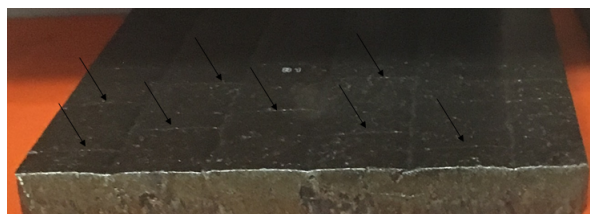
Fonte: Autor

### 6.1.1 Inspeção visual de solda

A região ensaiada foi iluminada por lanterna de foco centrado, de forma a proporcionar uma iluminação mínima de 1000 lux. Os critérios de aceitação para este tipo de junta soldada com deposição de revestimento duro foi considerado que este que poderia apresentar: trinca longitudinais; poro isolado na superfície do revestimento e baixo índice de respingos.

As trincas transversais não foram utilizadas como critério de aceitação, pois no processo de revestimento duro, depositado pelo processo FCAW é comum a presença de trincas transversais no revestimento duro, Figura 6.13. Segundo ESAB AB (2003), muitos depósitos de revestimento duro contêm “fissuras de alívio”. Estas fissuras não são prejudiciais ao revestimento duro, mas existe o perigo de que, sob forte impacto ou flexão, as fissuras se propaguem no material base.

Figura 6.13 – Trincas transversais ao revestimento duro.



Fonte: Autor

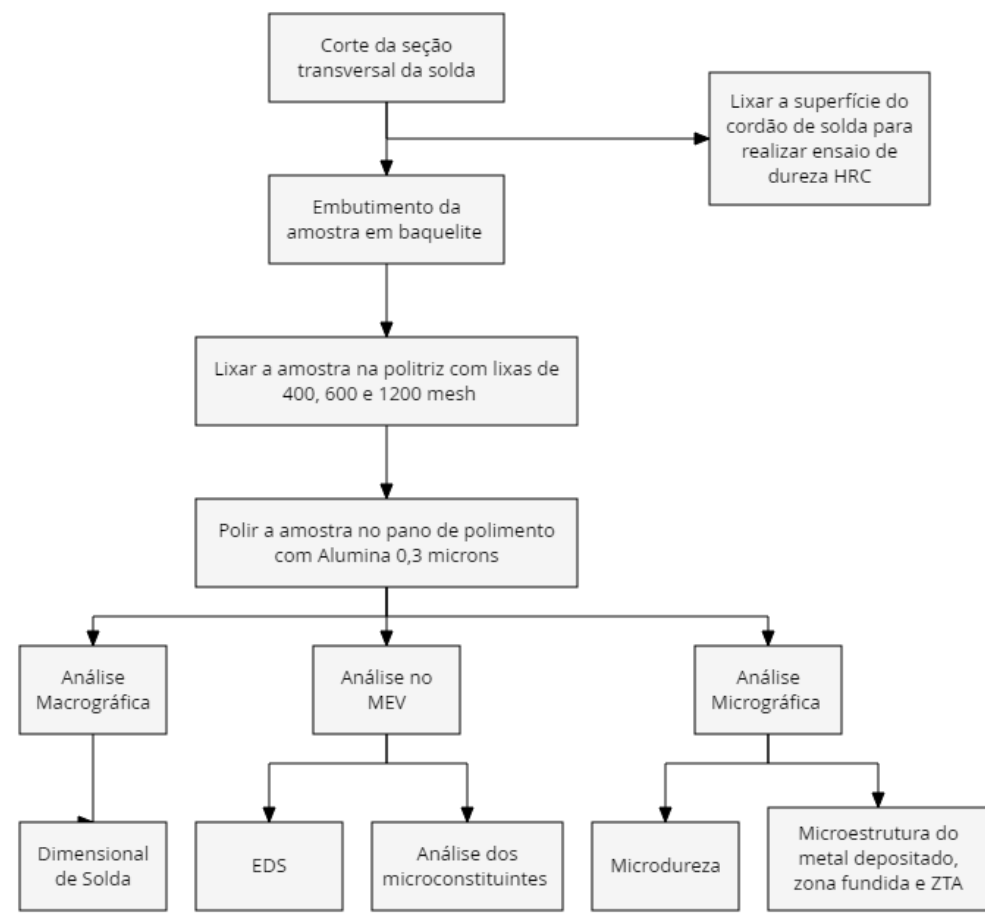
### **6.1.2 Preparação metalográfica das amostras soldadas com revestimento duro sem a adição de cromo**

Para os ensaios metalográficos, foram utilizados as instalações do Laboratório de Manutenção e Materiais (LABM), CEFET - MG - Varginha, onde foi possível realizar a caracterização do revestimento duro mediante ensaios diversos, tais como: dureza, ensaios metalográficos (dimensional do cordão) e ensaios micrográfico (microestrutura do revestimento). O preparo metalográfico consistiu nos procedimentos apresentados conforme Fluxograma da Figura 6.14.

### **6.1.3 Ensaios de dureza da superfície do revestimento duro sem a adição de cromo**

Dureza é a propriedade de um material que permite resistir à deformação plástica, usualmente por penetração. O termo dureza também pode ser associado à resistência à flexão, risco, abrasão ou corte. O teste de dureza Rockwell consiste em endentar o material sob teste com um cone de diamante ou endentador de esfera de aço endurecido. O endentador é pressionado contra a superfície da amostra com uma pré-carga de 10 kgf. Quando o equilíbrio é atingido, um dispositivo indicativo segue os movimentos do endentador e responde às variações da profundidade de penetração, o qual deve ser ajustado para a posição zero. O objetivo de se medir a dureza pode ser descrito conforme segue:

Figura 6.14 – Fluxograma do processo de preparo metalográfico



Fonte: Autor

1. Conhecimento da resistência ao desgaste;
2. Conhecimento aproximado da resistência através do uso de tabelas de correlação;
3. Controle de qualidade de tratamentos térmicos;
4. Pesquisa e desenvolvimento desenvolvimento de novas ligas e materiais.

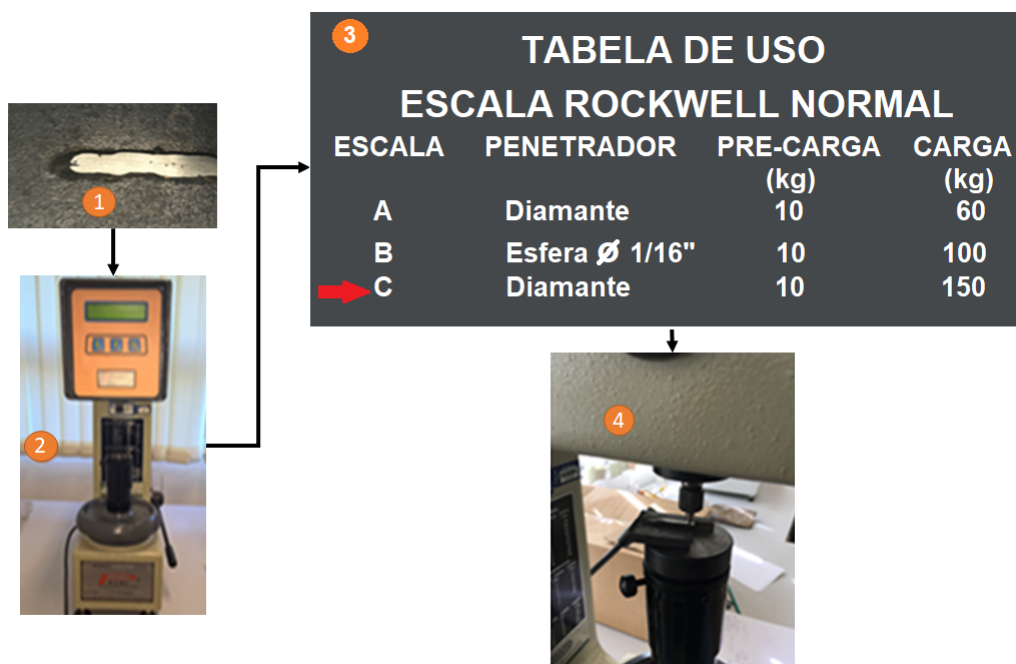
Porém, a dureza dos revestimentos é mais influenciada pela microestrutura, a qual, depende do calor imposto e da composição química

(SCOTTI; ROSA, 1997). Segundo Wang (2005), como resultado do reforço do revestimento com carbonetos de titânio, a dureza também é aumentada, levando a um significativo aumento da sua resistência ao desgaste. Por sua vez, Fulcher, Kosel e Fiore (1983) analisam a resistência ao desgaste em função da dureza dos carbonetos, afirmando que embora o alto nível de dureza dos carbonetos de cromo do tipo M7C3 contribua para a resistência ao desgaste, os carbonetos são frágeis e dependem da forma que são suportados pela matriz para definir o seu desempenho durante a abrasão. Logo, a investigação dureza do revestimento duro sem a presença do Cr, como da microestrutura é necessária para determinar sua resistência à abrasão.

Para realizar o ensaio de dureza do revestimento duro sem a adição de Cr, foi preparada a superfície, por meio de lixamento e ensaios utilizando durômetro da marca Petri, modelo F-26/1RNSB. As medições realizadas, considerando dureza HRC (Rockwell C), foram realizadas utilizando endentador de diamante com ângulo de  $120^\circ$ , pré carga de 10 kg e carga de 150 kg, adequada para o material em estudo, conforme Figura 6.15. No total, foram realizadas de 10 repetições de medidas de dureza por revestimento duro, para ser obter a média do resultado da dureza para cada revestimento.

Para verificar a existência de correlação entre as variáveis de diluição, dureza e energia de soldagem, foi necessário interpretar a análise de correlação entre estas variáveis. O resultado principal inclui o coeficiente de correlação de Pearson, o coeficiente de correlação de Spearman e o valor de p. Para a correlação de Pearson, um valor absoluto de 1 indica uma relação linear perfeita. A correlação perto de 0 indica que não há relação linear entre as variáveis. Já o uso do coeficiente de correlação de Spearman para analisar a intensidade e a direção da relação monotônica entre duas variáveis contínuas ou ordinais. Em uma relação monotônica,

Figura 6.15 – Fluxograma do ensaio de dureza do revestimento duro sem a adição de cromo (Cr): (1) Amostra com revestimento duro com a superfície lixada; (2) Durômetro marca Petri, modelo F-26/1RNSB; (3) Tabela de uso Escalas Rockwell Normal (Escala Rockwell C - Penetrador de Diamante, Pré-Carga de 10 kg e Carga de 150 kg) e (4) Aplicação da pré-carga e carga do ensaio de dureza HRC.



Fonte: Autor

as variáveis tendem a mover-se na mesma direção relativa, mas não necessariamente a uma taxa constante.

#### 6.1.4 Análise Macrográfica do revestimento duro sem a adição de cromo

Após corte transversal da amostra do revestimento duro utilizando a ferramenta policorte e a amostra da seção transversal da solda a ser embutida na baquelite, inicia-se o processo de lixamento da amostra e posterior polimento, Figura 6.17. Após polimento, a amostra foi atacada com reativo de iodo (10 g de iodeto sublimado, 20 g de iodeto de potássio diluído em 100 ml de água destilada) para revelar a microestrutura do revestimento duro e substrato. Com a microestrutura revelada, foi possível aquisitar as imagens da macrografia da solda. Com um software de análise dimensionamento de imagens (*ElementsD<sup>R</sup>*), foi possível determinar as dimensões do revestimento duro: largura, altura e penetração. Também foi possível determinar as áreas da região do revestimento duro e da zona fundida, o que possibilitou o cálculo da diluição do revestimento adicionado com o substrato, conforme equação 6.1.

$$Dil(\%) = \frac{A}{A+B} * 100 \quad (6.1)$$

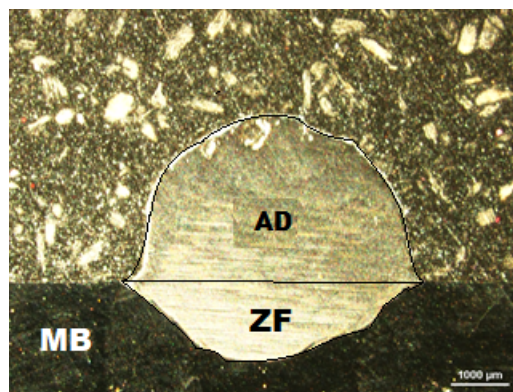
Onde:

Dil = Diluição do revestimento duro com o substrato (MB)

A = Área da zona fundida (ZF)

B = Área depositada (AD)

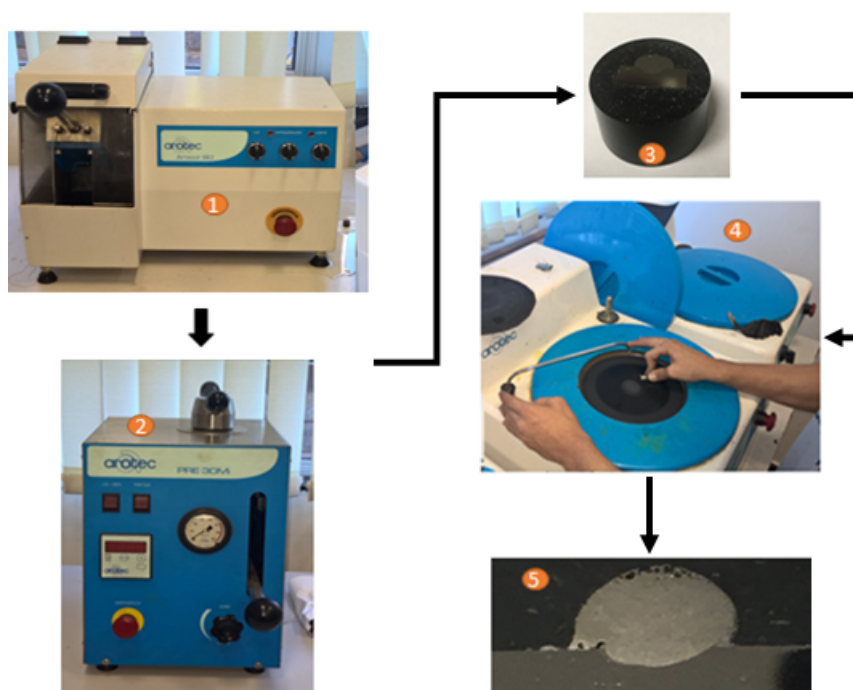
Figura 6.16 – Foto macrográfica indicando as regiões da solda (AD - área depositada e ZF - área da zona fundida) e o substrato (MB) .



Fonte: Autor

As dimensões das amostras foram realizadas com um estereoscópio (marca Nikon, modelo SMZ1500), com aumento de 10X, equipada com câmera digital (marca Nikon, modelo Digital Sight DS-RI, NI1) do Laboratório de Microscopia Eletronica e Análise Estrutural LME Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Figura 6.18.

Figura 6.17 – Fluxograma da preparação metalográfica do revestimento duro sem a adição de cromo (Cr) para análise macrográfica (dimensional de solda): (1) Policorte, marca Arotec; (2) Embutidora, marca Arotec PRE 30Mi; (3) Amostra embutida no baquelite; (4) Politriz arotec; (5) Amostra polida pronta para o ensaio macrográfico.

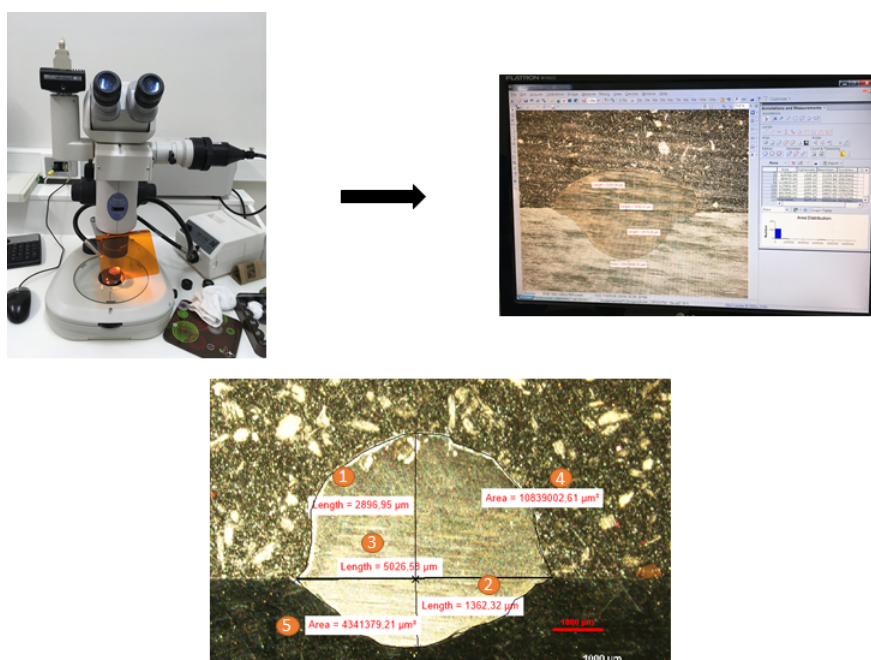


Fonte: Autor

### 6.1.5 Análise Micrográfica e Microdureza do revestimento duro sem a adição de cromo

Para as análises micrográficas, foi utilizado um microscópio Olympus BX41M-LED (Figura 6.19), equipado com câmera acoplada para aquisição das imagens. As imagens foram capturadas e mensuradas utilizando o *software Analysis* do mesmo fabricante do microscópio do LABSIT do CEFET – MG, localizado em Varginha / MG.

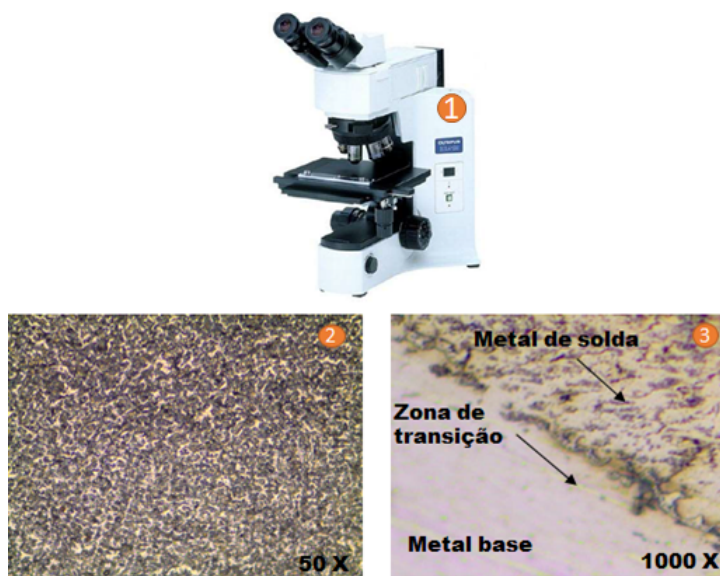
Figura 6.18 – Análise macrográfica da amostra do revestimento duro sem a adição de cromo (Cr), utilizando o software NIS: (1) Altura do revestimento duro; (2) Penetração do revestimento duro; (3) Largura do revestimento duro; (4) Área do revestimento duro e (5) Área da zona fundida .



Fonte: Autor

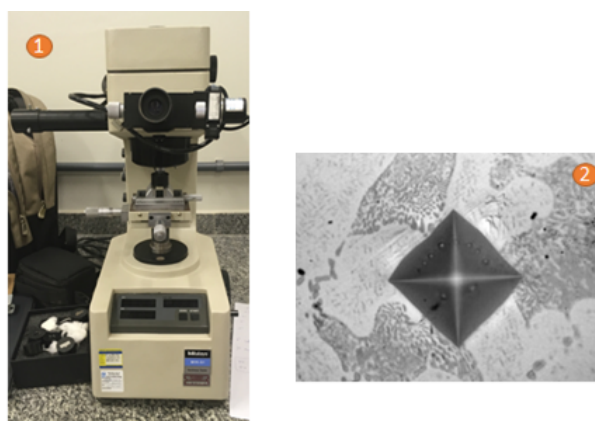
Para as análises de microdureza (HV), foi utilizado o Microdurômetro, marca Mitutoyo Hardness Tester, modelo MV-K-G1 do Laboratórios da Área de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Santo Antônio da UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI (UFSJ), localizado em São João Del Rei / MG. O resultado da endentação promovida por este tipo de medida é apresentado na Figura 6.20. A dureza Vickers se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de  $136^\circ$ , submetida a uma carga de 300g com tempo de teste de 15 segundos (Figura 6.20). Foram realizadas 4 endentações em todas as amostras de solda, após o corte, embutimento e preparação metalográfica, conforme Figura 6.21.

Figura 6.19 – Foto do Microscópio metalográfica do LABSIT: (1) Microscópio; (2) Micrografia do revestimento duro sem a adição de Cr; (3) Micrografia da região de transição (revestimento duro - substrato e zona de transição).



Fonte: Autor

Figura 6.20 – Foto do Microdurômetro do Laboratórios da Área de Materiais - UFSJ: (1) Microdurômetro; (2) Endentação na multifaces de uma liga Ni-Cr-Mo-Ti, com ampliação de 400 X (BAUER et al., 2006).



Fonte: Autor

Figura 6.21 – Esquema das regiões de endentação do ensaio de micro dureza a mostra com revestimento de revestimento duro sem a adição de Cr. Onde: (1) Endentação da amostra na região próximo a superfície do revestimento duro, (2) Endentação da amostra na região de transição entre o revestimento duro e a zona fundida no centro do revestimento duro; (3) Endentação da amostra na região na região de transição entre o revestimento duro e a zona fundida na extremidade esquerda do revestimento duro; (4) Endentação da amostra na região de transição.



### **6.1.6 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) do revestimento duro sem a adição de cromo**

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um instrumento utilizado para a observação e análise das características microestruturais de materiais sólidos. A microanálise eletrônica consiste na medida de raios-X característicos emitidos de uma região microscópica da amostra bombardeada por um feixe de elétrons.

A técnica de Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDX ou EDS) consiste na determinação qualitativa para todos os elementos da tabela periódica por meio do espectros de raios-X, com exceção do hidrogênio. Entretanto, a emissão dos primeiros dez elementos de baixo número atômico consiste de bandas na região de baixa energia onde as perdas por absorção na amostra são consideráveis. Assim, elementos como carbono, oxigênio e nitrogênio são frequentemente determinados por estequiometria. Para a análise no MEV e de EDS, foi utilizado o equipamentos do Laboratório de Microscopia Eletro-nica e Análise Estrutural (LME) do Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Figura 6.22.

### **6.1.7 Análise de desgaste por abrasão**

Para realizar a comparação da resistência ao desgaste por ensaio de abrasão dos diferentes revestimentos e do material de facas comerciais sem revestimento e com revestimento de carboneto de tungstênio, foi confeccionada uma máquina de ensaio à abrasão de roda de borracha com areia seca, conforme norma ASTM G65-2016 (ASTM, 2016). A máquina foi equipada com motor de 3 CV (220V trifásico), inversor de frequência (marca WEG, modelo CFW300) para o controle da rotação da roda de

Figura 6.22 – Foto do Microscópio Eletrônico de Varredura do Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Estrutural (LME) do Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras (UFLA)



Fonte: Autor

borracha, conforme Figura 6.23. A roda de borracha clorobutila (dureza de Shore A-60  $\pm$  A-2) foi vulcanizada na roda metálica (aço SAE 1020) em uma empresa especializada, conforme certificado anexo C. O braço de alavanca e o berço da amostra tiveram suas dimensões controladas durante a construção e aferidas ao término da operação, de forma a garantir as dimensões estabelecidas pela norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016).

#### **6.1.7.1 Calibração da máquina de teste de abrasão de roda de borracha com areia seca, construída para realizar as análises de desgaste.**

Foi realizada a calibração da máquina de teste de abrasão de roda de borracha com areia seca, conforme procedimento descrito na norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016). O parâmetro de teste utilizado foi o especificado no procedimento "B", Tabela 6.6.

Figura 6.23 – Máquina de ensaio de abrasão de roda de borracha com areia seca:  
 (1) Equipamento em construção; (2) Equipamento finalizado; (3)  
 Parte de acionamento com inversor de frequência.



Fonte: Autor

Tabela 6.6 – Parâmetro de testes da máquina de abrasão de roda de borracha com areia seca

Procedimento Especificado	Especificação da força aplicada <sup>A</sup> (N)	Rotação da roda RPM	Abrasão linear
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71,8
D	45	6000	4309
E	130	1000	718

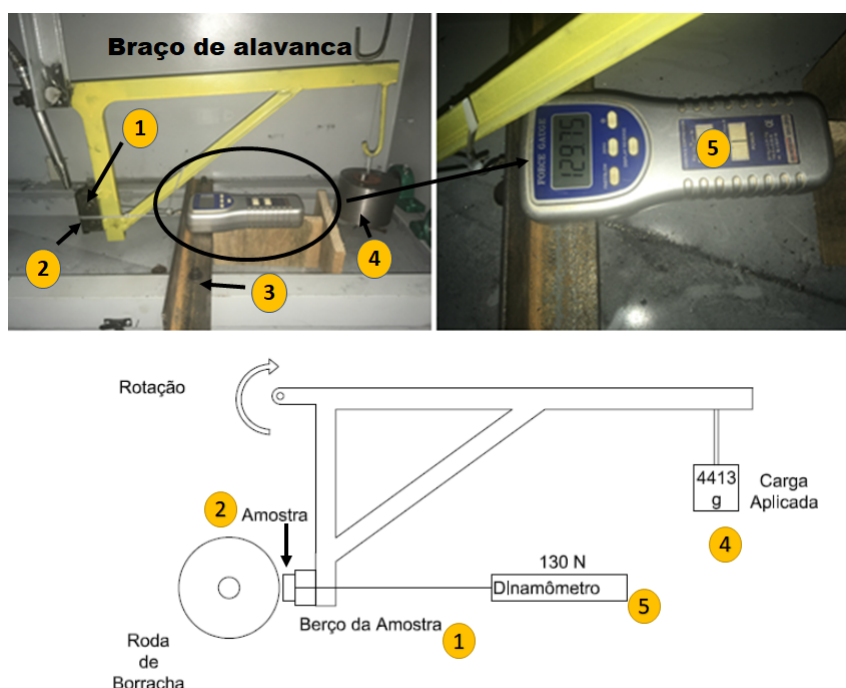
A Tolerância da força é de  $\pm 3\%$

Fonte: Adaptado de ASTM (2016)

Para avaliar a força aplicada na amostra pelo braço de alavanca da máquina de abrasão, foi introduzido um aparato de fixação do dinamômetro (marca: Instruherm, modelo DD-200) do Laboratório de Motores Agrícolas, do Departamento de Engenharia Agrícola, UFLA, de modo avaliar a força aplicada na região de contato entre a amostra e a roda de borracha, conforme Figura 6.24. A carga aplicada de 4413 g na extremidade do braço de alavanca, foi calculada a partir das dimensões do braço

de alavanca da máquina de abrasão de roda de borracha com areia seca e ajustada com o auxílio do dinamômetro, a partir de uma força de aproximadamente 130 N.

Figura 6.24 – Sistema de aplicação de carga da máquina de abrasão de roda de borracha com areia seca, onde: (1) Berço de apoio da amostra; (2) Amostra a ser ensaiada; (3) Anteparo do dinamômetro; (4) Dinamômetro registrando a força aplicada de aproximadamente 130 N na região da amostra com a roda de borracha.

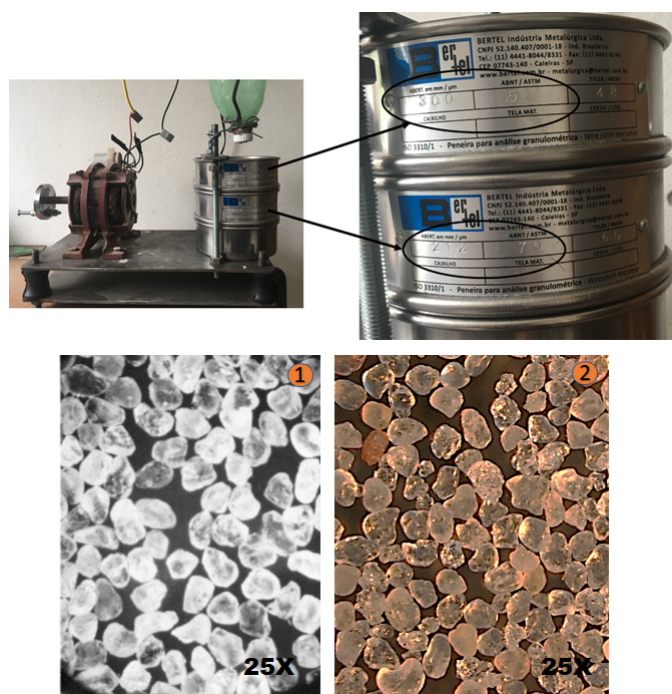


Fonte: Autor

A areia utilizada para o teste de abrasão foi uma mistura de areia sílica com areia de quartzo, ambas extraídas de uma jazida no município de Nazareno - MG, na proporção de 83% de areia de sílica e 17% de areia de quartzo. A granulometria de ambas estão dentro da faixa AFS (American Foundrymen's Society) 50/70 conforme a norma ASTM G65/2016 (ASTM, 2016). Tanto a areia de sílica e como a de quartzo foram classificadas com granulométrica entre  $300 \mu\text{m}$  (50#) e  $212 \mu\text{m}$  (70#), utilizando uma mesa vibratória e peneiras de classificação granulométricas de 50# e 70#, conforme Figura 6.25. Posteriormente, as areias foram secas e mis-

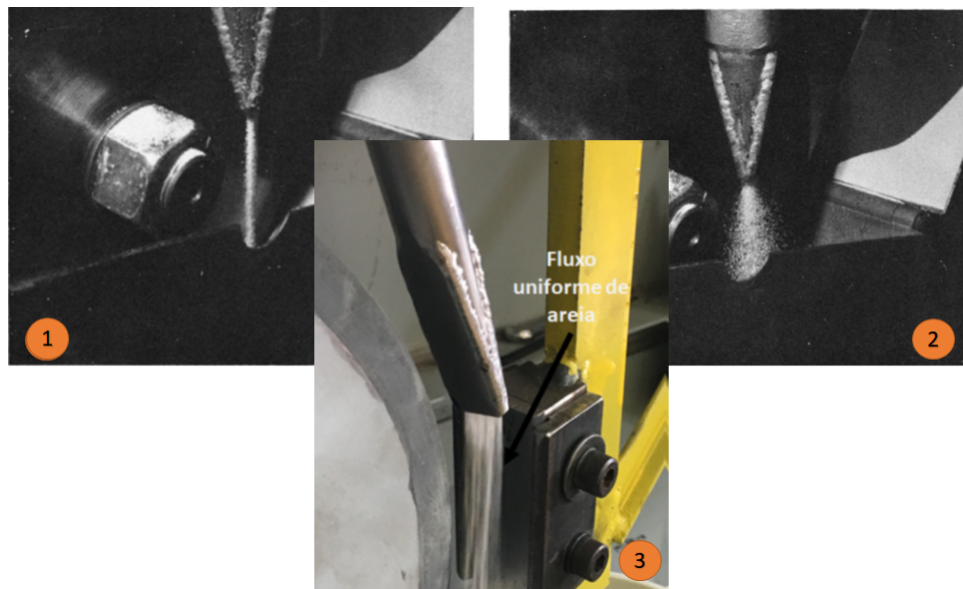
turadas na proporção 83% de areia de sílica e 17% de areia de quartzo em peso. A vazão da areia foi ajustada entre 300 a 400 g/min, mantendo o fluxo de areia uniforme, conforme Figura 6.26.

Figura 6.25 – Mesa vibratória com as peneiras de 300  $\mu\text{m}$  (50#) e 212  $\mu\text{m}$  (70#) para a classificação granulométrica da areia a ser utilizada no ensaio de abrasão, conforme ASTM G65-16 (ASTM, 2016), onde: (1) Imagem da morfologia da areia de Ottawa (25 vezes de aumento) (ASTM, 2016) e (2) Imagem da areia utilizada no ensaio de abrasão (25 vezes de aumento).



Fonte: Autor

Figura 6.26 – Fluxo de areia: (1) Fluxo uniforme e (2) Fluxo desuniforme e (3) fluxo uniforme da areia utilizada no ensaio de abrasão.



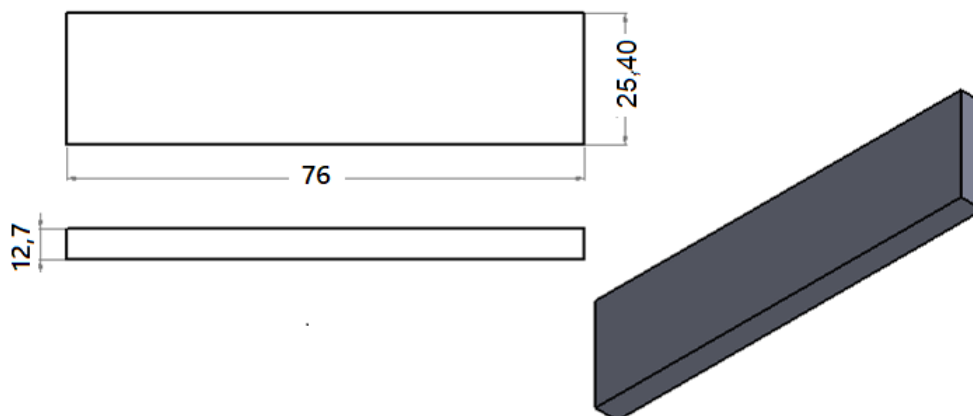
Fonte: ASTM (2016)

O material de referência utilizado como amostra para calibrar a máquina de abrasão de roda de borracha com areia seca foi o aço H13 temperado, com dureza entre 46 a 48 HRV. As dimensões da amostra foram de 25 mm de largura, por 76 mm de comprimento e 12,7 mm de espessura, conforme Figura 6.27, em que foram utilizadas 5 amostras para realizar a calibração, Anexo A.

Para realizar o tratamento superficial de têmpera do Material Referência (H13), seguiu-se o procedimento descrito no fluxograma da Figura 6.28.

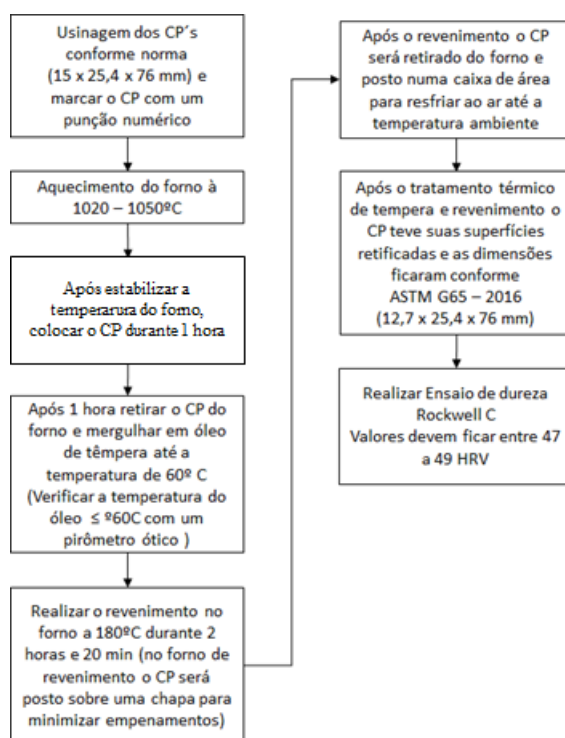
A têmpera do material de referência foi realizada no Laboratório de Ensaio Destrutivos e Não Destrutivos (LABEN) do CEFET - MG, Varginha. Para tal, foi utilizado um forno de tratamento térmico da marca Grion, equipado com um controlador de temperatura da marca DigiMec, Modelo VHMP, e um sistema de segurança que restringe temperaturas superiores à 1300 °C, Figura 6.29.

Figura 6.27 – Amostra de referência para calibração da máquina de abrasão de borracha com areia seca: aço H13 (Certificado do material Anexo D).



Fonte: Autor

Figura 6.28 – Fluxograma do procedimento do tratamento térmico de têmpera para o material de referência: aço H13.



Fonte: Autor

Antes de realizar o teste de abrasão, foi verificada a rugosidade da superfície do material de referência, do revestimento duro sem adição de

Figura 6.29 – Forno de tratamento térmico.



Fonte: Autor

romo depositado e do revestimento de WC aplicado comercialmente em facas de corte basal, o qual deve ter rugosidade média, ( $R_a$ ) menor que  $0,8 \mu\text{m}$  (ASTM, 2016). Para realizar a leitura de rugosidade, foi utilizado um Rugosímetro (marca: Taylor Hobson Ametek, modelo: Surtronic S116) do Laboratório de Ensaios de Madeira do Departamento de Ciências Florestais da UFLA, Figura 6.30.

Figura 6.30 – Equipamento para medir rugosidade da superfície das superfícies a ser submetido a ensaio de abrasão: (1) Rugosímetro; (2) Padrão de superfície de rugosidade ( $R_a = 6,0 \mu\text{m}$ ).



Fonte: Autor

Antes dos ensaios de calibração, foi realizado um desgaste inicial, utilizando o procedimento A (30 minutos de ensaio) com uma amostra de aço SAE 1020 com os mesmos dimensionais das amostras do aço de

referência H13. A amostra foi colocada no berço para o suporte de amostra da máquina de abrasão de roda de borracha com areia seca, construída para os testes resistência a abrasão. Esperou-se 30 minutos antes de iniciar a calibração da máquina.

Para o ensaio de calibração da máquina de abrasão, primeiramente mediu-se a massa da amostra em uma balança de precisão com sensibilidade de 0,001g e , posteriormente ao ensaio, utilizou-se a mesma balança para medir a perda de massa da amostra. Os resultados obtidos a partir dos testes de abrasão das amostras em aço H13 foram expressos em perda de massa [g] e perda de volume, em  $\text{mm}^3$ , conforme equação 6.2 (ASTM, 2016):

$$\text{Perdadevolume}(\text{mm}^3) = \frac{\text{perdademassa}(\text{g})}{\text{densidade}(\text{g}/\text{cm}^3)} * 1000 \quad (6.2)$$

A cada ensaio, a roda de borracha diminui o diâmetro e a cada teste, surge a necessidade do ajuste de perda de volume, pois com a redução do diâmetro, a perda real produzida pela roda de borracha são ligeiramente menores. O valor de ajuste de perda de volume deve ser levado em consideração e indica a taxa real de abrasão produzida por uma roda de 228,6 mm de diâmetro. O cálculo do ajuste de perda de volume (AVL) é dado pela equação 6.3. A equação 6.3 pode ser alterada para corrigir o valor da perda de massa (AML - Ajuste de Perda de Massa), aplicando-se a equação 6.4 e substituindo a perda de volume médio pela perda de massa média.

$$\text{AVL} = \text{Perdadevolumemeditada} * \frac{228,6\text{mm}}{\text{dimetrorodaapsouso}} \quad (6.3)$$

$$AML = Perdademassamedida * \frac{228,6mm}{dimetrodarodaapsouso} \quad (6.4)$$

Todos os parâmetros de teste significativos e dados de teste foram relatados, incluindo o tipo de borracha de roda. O relatório inclui uma declaração da precisão atual e precisão da máquina de teste. Os dados de perda de volume, desenvolvidos pelos testes de qualificação inicial e os dados de perda de volume desenvolvidos pelos testes periódicos de requalificação estão apresentados na folha de dados, Anexo A.

A calibração foi considerada válida, pois a precisão e os parâmetros estabelecidos na norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016) foram cumpridos. Os limites de perda de volume, em mm<sup>3</sup> (Resultados da Média, Repetibilidade do Desvio Padrão, a Reprodutividade do Desvio Padrão, o Limite de Repetibilidade e o Limite de Reprodutividade), estão apresentados na Tabela 6.7, sendo que os parâmetros analisados foram:

- 1) Limite de Repetibilidade (r) - Dois resultados de testes obtidos dentro de um laboratório, não são considerados equivalentes, se diferirem do valor “r” para esse material, sendo “r” o intervalo que representa a diferença crítica entre dois resultados de teste para o mesmo material, obtidos pelo mesmo operador, usando o mesmo equipamento no mesmo dia e no mesmo laboratório.
- 2) Limite de Reprodutibilidade (R) - Dois resultados de teste não são julgados equivalentes se diferirem do valor “R” para aquele material, sendo “R” o intervalo que representa a diferença crítica entre dois resultados de teste para o mesmo material, obtidos por diferentes operadores usando diferentes equipamentos em diferentes laboratórios.

Com a máquina de abrasão de roda de borracha com areia seca calibrada, iniciaram-se os testes comparativos de desgaste por abrasão entre

Tabela 6.7 – Limites de precisão para o Procedimento B (Material de Referência H13) em perda de volume ( $\text{mm}^3$ )

Material	Média $\bar{x}$	Repetibilidade do Desvio Padrão $S_r$	Reprodutividade do Desvio Padrão $S_R$	Limite de Repetibilidade $r$	Limite de Reprodutividade $R$
H13	54,16	3,66	6,80	10,26	19,04

Fonte: Adaptado de ASTM (2016)

os materiais utilizados para a fabricação das facas de corte basal comercial (aço ferramenta), no revestimento de carbonato de tungstênio (WC) utilizados para aumentar a vida útil das facas de corte basal, todos em relação à proposta apresentada neste trabalho, contemplando facas com deposição de m duro sem a adição de cromo na liga metálica, em conformidade com a norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016).

## 7 RESULTADOS

### 7.1 Avaliação das características geométricas, diluição e dureza

Para avaliar as características geométricas e diluição do revestimento duro sem a adição de Cr, foi utilizado um planejamento de experimento fatorial design  $2^3$  completo, com delineamento composto central rotacional (DCCR). Dessa forma, foi possível investigar a influência das variáveis independentes (tensão U [V], corrente I [A] e velocidade de soldagem V [cm/min]) e a forma de interação entre elas, bem como obter o valor das variáveis dependentes que otimizem os resultados esperados. Os resultados do planejamento de experimento  $2^3$  e os resultados dos testes do experimento de deposição por soldagem FCAW do revestimento duro, com relação as variáveis dependentes (penetração [mm], altura (reforço) [mm], diluição [%] e dureza [HRC] do revestimento duro) estão apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Matriz de Planejamento fatorial  $2^3$  completo com DCCR e resultados da geometria e diluição de duas seções transversais da amostra do revestimento duro e a dureza média do revestimento.

Testes	Ordens dos testes	U [V]	I [A]	V [cm/min]	Penetração [mm]	Largura do Cordão [mm]	Altura do Cordão [mm]	Diluição [%]	Dureza [HRC]
1	10	21 (+1,68)	151 (0)	38 (0)	1,3	5,4	2,0	27,1	61,0
2	17	19 (0)	151 (0)	38 (0)	1,5	6,5	2,3	35,2	60,5
3	14	19 (0)	151 (0)	52 (+1,68)	1,2	4,7	2,2	32,7	58,1
4	20	19 (0)	151 (0)	38 (0)	1,7	6,0	2,7	36,8	60,0
5	4	20 (+1)	168 (+1)	30 (-1)	1,9	7,3	2,5	46,0	61,6
6	19	19 (0)	151 (0)	38 (0)	1,6	6,7	2,3	38,3	60,3
7	9	16 (-1,68)	151 (0)	38 (0)	1,0	4,0	2,7	17,7	59,4
8	6	20 (+1)	134 (-1)	47 (+1)	1,3	4,1	2,3	30,1	60,3
9	8	20 (+1)	168 (+1)	47 (+1)	1,4	6,4	2,3	33,2	59,6
10	16	19 (0)	151 (0)	38 (0)	1,6	4,8	2,5	30,2	60,1
11	5	17 (-1)	134 (-1)	47 (+1)	1,2	5,0	2,1	35,4	59,7
12	2	20 (+1)	134 (-1)	30 (-1)	1,6	5,4	3,1	28,3	60,5
13	11	19 (0)	122 (-1,68)	38 (0)	1,5	4,4	2,0	26,1	61,6
14	12	19 (0)	180 (+1,68)	38 (0)	1,9	6,0	2,5	37,3	60,8
15	13	19 (0)	151 (0)	24 (-1,68)	1,9	7,4	3,6	29,8	59,5
16	7	17 (-1)	168 (+1)	47 (+1)	1,2	4,6	2,5	27,4	58,4
17	15	19 (0)	151 (0)	38 (0)	1,6	5,8	2,6	29,8	60,4
18	3	17 (-1)	168 (+1)	30 (-1)	1,7	6,6	2,9	32,0	59,9
19	18	19 (0)	151 (0)	38 (0)	1,7	5,0	2,6	33,1	60,5
20	1	17 (-1)	134 (-1)	30 (-1)	1,6	5,2	2,8	27,0	60,5

### 7.1.1 Avaliação da deposição de revestimento duro

Os resultado dos ensaios visual da superfície do revestimento duro estão apresentados na Tabela 7.2. O método utilizado para o ensaio visual de solda foi o direto, que consiste na observação da superfície a ser examinada com um ângulo não inferior a 30°, a distância do olho do observador ao local do ensaio não deve ser superior a 600 mm, com iluminação mínima de 1000 lux (ABENDI, 2011).

Apesar das descontinuidades encontradas nas amostras ensaiadas, as mesmas não foram consideradas como defeito de soldagem, pelo fato de não tratar-se de uma solda estrutural. A integridade do revestimento de revestimento duro sem a adição de Cr depositado foi avaliada no ensaio de abrasão com areia seca, conforme detalhes apresentados na seção 6.1.7.

Tabela 7.2 – Ensaio de visual de solda da superfície do revestimento duro

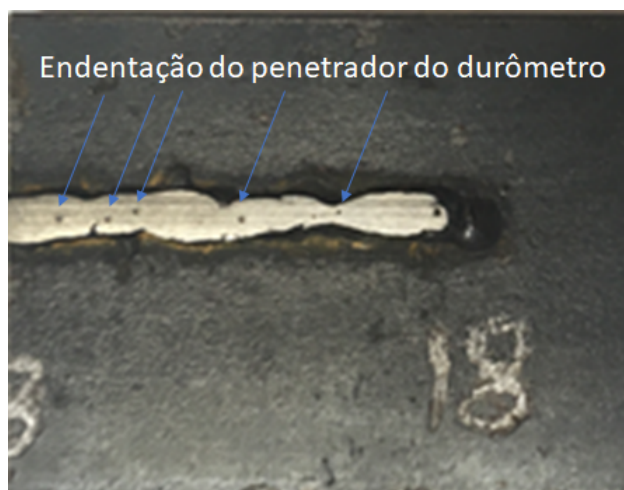
Ensaio	Exame de visual de solda
1	Isento de descontinuidade
2	Sobreposição e poros
3	Isento de descontinuidade
4	Sobreposição
5	Isento de descontinuidade
6	Poros na superfície
7	Isento de descontinuidade
8	Poros na superfície da peça
9	Poros na superfície da solda
10	Expulsão de material na superfície soldada
11	Poros na superfície da solda
12	Pequenos poros na superfície da solda
13	Porosidade na superfície do cordão
14	Porosidade na superfície do cordão
15	Sobreposição do revestimento duro
16	Sobreposição do revestimento duro
17	Poros na superfície
18	Poros na superfície
19	Isento de descontinuidade
20	Sobreposição do revestimento duro

Fonte: Autor

### 7.1.2 Ensaio Dureza e Macrografia

Para realizar o ensaio de dureza Rockwell C do revestimento duro, a superfície do cordão foi lixada com um disco flap grana #80, deixando-o com aspecto liso, conforme Figura 7.1. Os resultados de dureza Rockwell C estão apresentados na Tabela 7.1.

Figura 7.1 – Amostra preparada (lixado) para ensaio de dureza, indicando as endentações do penetrador do durômetro na escala Rockwell C [HRC] após ensaio.

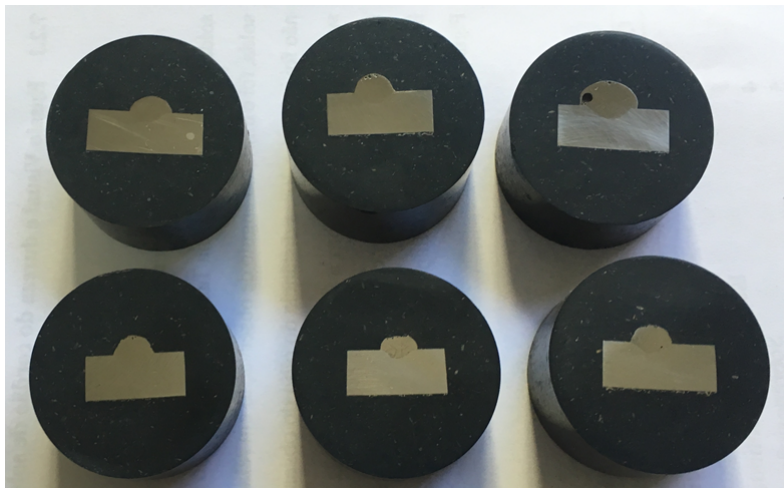


Fonte: Autor

Após preparação metalográfica de acordo fluxograma da Figura 6.17, as amostras ficaram com o aspecto superficial da região de solda conforme a Figura 7.2, realizou-se o dimensionamento do revestimento duro (macrografia), Figura 7.3, e o cálculo da diluição do revestimento duro com o metal base (Equação 6.1). Os resultados estão apresentados na Tabela 7.1.

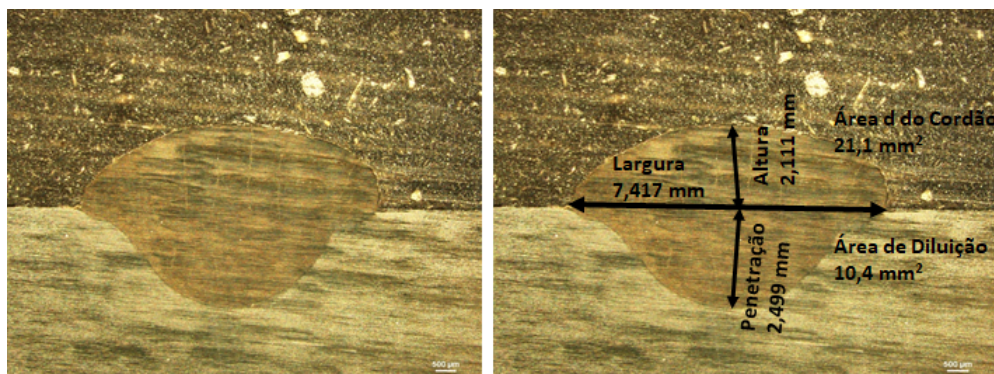
Para determinar os parâmetros ótimos de soldagem para a deposição do revestimento duro sem o cromo utilizado nos testes de abrasão, foi realizada a análise das respostas do experimento fatorial design completo  $2^3$ , conforme descrito nos fluxogramas das Figuras 6.3 e 6.4.

Figura 7.2 – Amostra lixada e polida para análise macrográfica do revestimento duro, diluição e microdureza.



Fonte: Autor

Figura 7.3 – Foto retirada do programa NIS-Elements D, do seção transversal da solda: (a) macrografia da solda e (b) dimensional do revestimento duro.



Fonte: Autor

O primeiro passo foi realizar a Análise de Variância (ANOVA) para o planejamento fatorial design completo  $2^3$ , com DCCR considerando todos os fatores e suas interações com um nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , logo o intervalo de confiança foi de 0,95.

Com base nos valores p calculados na ANOVA, representados na Tabela 7.3, definiu-se os fatores e suas interações que possuem efeitos

significativos ( $\alpha < 0,05$ ) sobre as variáveis respostas e estabeleceram-se os modelos estatísticos.

Tabela 7.3 – Tabela de valores p referentes a regressão das variáveis respostas do planejamento de experimento.

Fonte	Valor-P				
	P	L	R	D	Dz
Linear	0,000	0,003	0,001	0,037	0,000
U [V]	0,003	0,120	0,167	0,044	0,000
I [A]	0,001	0,008	0,407	0,023	0,004
V[cm/min]	0,000	0,004	0,000	0,861	0,000
Quadrático	0,000	0,218	0,056	0,054	0,000
U [V]*U [V]	0,000	0,086	0,681	0,009	0,540
I [A]*I [A]	0,135	0,353	0,218	0,898	0,000
V[cm/min]*V [cm/min]	0,372	0,471	0,019	0,968	0,000
Interação com 2 Fatores	0,464	0,359	0,229	0,026	0,001
U [V]*I [A]	0,203	0,116	0,101	0,047	0,002
U [V]*V[cm/min]	0,821	0,954	0,917	0,187	0,802
I [A]*V[cm/min]	0,375	0,445	0,207	0,024	0,002
Falta de ajuste	0,703	0,812	0,283	0,404	0,473

Legenda: U [V]; I [A]; V [cm/min]; P é penetração do revestimento duro [mm]; L é largura do revestimento duro [mm]; R é altura (reforço) do revestimento duro [mm]; D é diluição do metal de solda no metal base [%] e ; Dz é dureza do revestimento duro [HRC].

Fonte: Autor

Realizou-se uma nova ANOVA para as variáveis respostas, apenas com os fatores e interações significativas, e realizou-se a análise de resíduo, a qual demonstrou que os modelos tem distribuição normal, Tabela 7.4. A partir dos valores dos testes de aderência (AD - Teste de Anderson-Darling) menor que 1 e os valores do valor-p maior que  $\alpha$  para todos os modelos estatísticos, concluiu-se que a regressão de mínimos quadrados comum produz estimativas de coeficientes não viciadas com variância mínima. Os modelos estatísticos das variáveis respostas, bem como os valores de ajuste do modelo  $R^2$ , estão representados na Tabela 7.5.

Tabela 7.4 – Tabela de valores de aderência (AD) e valor p para o gráfico de resíduo referentes a regressão para as variáveis respostas do planejamento de experimento.

Variável resposta	AD	Valor p
Penetração	0,36	0,45
Largura do cordão	0,26	0,67
Altura do cordão	0,41	0,31
Diluição	0,35	0,45
Dureza	0,48	0,21

Fonte: Autor

Tabela 7.5 – Tabela dos modelos estatísticos e do ajuste do modelo  $R^2$  referentes a regressão para as variáveis respostas, após a retiradas dos fatores e interações não significantes estatisticamente.

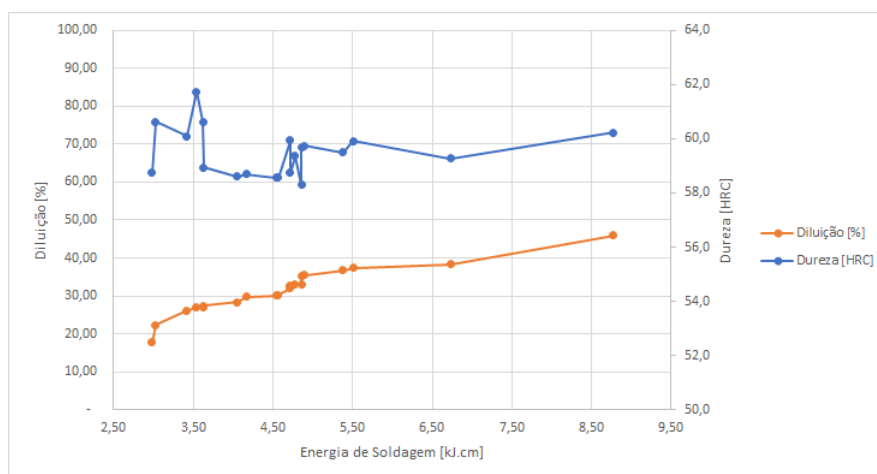
Variável Resposta	Modelo Estatístico	$R^2$
P [mm]	$= -24,69 + 2,76 U + 0,01 I - 0,03 V - 0,07 U*U$	93,08%
L [mm]	$= -0,20 + 0,20 U - 0,03 I - 0,08 V$	59,23%
R [mm]	$= 7,99 - 0,06 U + 0,003 I + 0,22 V + 0,002 V*V$	71,64%
D [%]	$= -308 + 34,2 U - 1,02 I + 3,71 V - 1,32 U*U + 0,1 U*I - 0,03 I*V$	74,70%
Dz [HRC]	$= 92,11 - 1,39 V - 0,48 I + 0,86 V + 0,001 I*I - 0,01 V*V + 0,01 V*I - 0,002 I*V$	97,00%

Fonte: Autor

Referente ao modelo da variável resposta largura do revestimento duro ter um valor  $R^2$  pouco representativo (menor que 70%), o mesmo foi considerado na construção do modelo de otimização de resposta simultânea, por se tratar de uma variável resposta importante para o processo de aumento de vida útil da faca de corte basal de cana-de-açúcar. Quanto maior o reforço (altura do revestimento duro), maior a concentração de

material duro na região de desgaste da faca, obtendo-se maior resistência à abrasão durante a operação de colheita. Contudo, antes de calcular a otimização da resposta, foi verificada quanto a relação entre a dureza do revestimento duro e a diluição, Figura 7.4.

Figura 7.4 – Gráfico de efeito da energia de soldagem na diluição e na dureza do metal de solda depositado sem a adição de cromo.



Fonte: Autor

No gráfico de energia de soldagem versus diluição e dureza (Figura 7.4), para a faixa de parâmetros utilizada, não se observou nenhuma correlação significativa entre a variável dureza e a energia de soldagem (H), dado pela equação 7.1, divergindo dos resultados encontrados em Ribeiro (2004), que observou uma proporcionalidade inversa entre a dureza e a energia de soldagem, já que a dureza não variou significativamente em torno da média, para diferentes aportes térmicos de soldagem. Já a variável diluição, observou-se que a mesma foi diretamente proporcional a energia de soldagem, para a deposição de material duro sem a adição de cromo, pelo processo de soldagem FCAW.

$$H = \frac{U * I * 60}{V} \quad (7.1)$$

Também há evidências inconclusivas sobre a significância da associação entre as variáveis dureza, diluição e energia de soldagem, pois o valor  $p$  é maior do que o nível de significância (0,05), para todas as interações, na análise de correlação apresentada na Tabela 7.6. Porém analisando a relação monotônica entre as variáveis (Spearman), pode-se inferir que não existe uma relação entre as variáveis, pois os valores  $p$  para as variáveis são maiores que 0,05, apresentados na Tabela 7.7, afirmando a hipótese de que os fatores não produzem efeitos sobre as variáveis analisadas.

Tabela 7.6 – Correlação entre as variáveis: Diluição, Dureza e Energia de Soldagem.

Correlações	Diluição	Dureza
<b>Dureza</b>	0,26	
	0,27	
<b>Energia de soldagem</b>	0,33	0,36
	0,16	0,12
Conteúdo da Célula:	Correlação de Pearson	
	Valor-p	

Fonte: Autor

Tabela 7.7 – Tabela referente ao exame da relação monotônica entre as variáveis (Spearman): Diluição, Dureza e Energia de Soldagem.

Correlações	Diluição	Dureza
<b>Dureza</b>	0,08	
	0,75	
<b>Energia de soldagem</b>	0,11	0,40
	0,65	0,08
Conteúdo da Célula:	Rô de Spearman	
	Valor-p	

Fonte: Autor

Definido que não há relação entre a diluição do revestimento duro e a dureza do cordão, optou-se na otimização de respostas simultâneas e função de desejabilidade em considerar as seguintes condições de restrições impostas as variáveis respostas, todas com valores de maximização

para estas variáveis. A variável independente de velocidade de soldagem ficou restrita entre 30 a 46,5 cm/mim, devido a velocidades fora desta faixa apresentarem problemas no revestimento duro. Considerando as restrições impostas a cada variável, justifica-se obter um ponto estacionário de forma conjunta que satisfaça os objetivos proposto, conforme Tabela 7.8.

Tabela 7.8 – Tabela de Otimização da Resposta.

<b>Resposta</b>	<b>Meta</b>	<b>Inferior</b>	<b>Alvo</b>	<b>Superior</b>
<b>P [mm]</b>	Máximo	1,0	1,9	1,9
<b>L [mm]</b>	Máximo	4,1	7,4	7,4
<b>R [mm]</b>	Máximo	2,0	3,6	3,56
<b>D [%]</b>	Máximo	18	46	46
<b>Dz [HRC]</b>	Máximo	58,1	61,6	61,6

Fonte: Autor

Apesar de se esperar que, para as variáveis de penetração e consequentemente diluição, define-se como meta o mínimo, para a otimização da resposta, dentro da faixa de parâmetros estudado pelo planejamento fatorial, já que dessa maneira iria reduzir a deposição do consumível. Porém observou-se para valores mais baixos de penetração e diluição, que não houve penetração suficiente para garantir que o revestimento não se deslocaria do substrato. Neste caso, optou-se como meta o máximo para estas variáveis.

Ressalta-se que, em razão dos objetivos para as variáveis respostas serem comuns, isto é, obter uma resposta máxima, o interesse específico assume valor igual ao limite superior. Outro ponto a ser ressaltado corresponde ao ponto ótimo que satisfaça as cinco condições que dependem do modelo adotado. Portanto, caso haja ajuste, um modelo de ordem inferior ou superior ao modelo quadrático proposto nessa aplicação (Tabela 7.5), certamente a estimativa do ótimo deve ser alterada.

Em função da qualidade de ajuste ( $R^2 > 70\%$ ), exceto para a variável largura do cordão ( $R^2 = 59,23\%$ ) e que apresenta apenas relação

linear entre as variáveis independentes, para os demais modelos, torna-se o modelo quadrático aceitável para a obtenção de um máximo que satisfaça simultaneamente as condições impostas para cada variáveis respostas. Para efeito de estudo, foram fixados os valores de tensão ( $U = 19$ ), corrente ( $I = 151$ ) e velocidade de soldagem ( $V = 39$ ), já que estas variáveis apresentam efeitos significativos nas variáveis respostas. Com base nestes resultados, pode-se ampliar a otimização das respostas simultâneas, conforme na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Tabela de resultados das interações obtidas na otimização das respostas máximas de penetração, largura, altura, diluição e dureza do revestimento duro, obtidos seguindo as restrições descritas na Tabela 7.8.

Solução	U [V]	I [A]	V [cm/min]	Dz [HRC]	D [%]	R [mm]	L [mm]	P [mm]	Função Desejabilidade Composta
				Ajuste	Ajuste	Ajuste	Ajuste	Ajuste	
1	19	180	30,0	62	46	2,6	7,6	2,1	0,82
2	20	166	30	61	43	2,6	7,5	1,9	0,79
3	22	160	30	61	38	2,6	6,9	1,6	0,65
4	18	160	30	60	32	3,0	6,4	1,8	0,63
5	22	156	30	61	35	2,6	6,6	1,5	0,62

Fonte: Autor

Os resultados apresentados na Tabela 7.9 indicam que a combinação de tensão, corrente e velocidade de soldagem satisfazem simultaneamente as restrições para os valores de penetração, largura, altura, diluição e dureza do revestimento duro, sendo por  $U = 19$ ,  $I = 180$  e  $V = 30$ , com um índice de qualidade de 0,818 (função desejabilidade).

Embora esses valores sejam aceitáveis, nota-se que o valor de penetração da solda e de largura do revestimento duro não se encontram nos limites de especificação (Tabela 7.8). Realizou-se uma nova otimização simultânea, ajustando os valores de tensão, corrente e velocidade de soldagem, conforme Tabela 7.10, que resultou na otimização simultânea, Tabela 7.11, ou seja, em valores os quais satisfazem simultaneamente a maximização das variáveis respostas.

Com a modificação proposta nas restrições da tensão e velocidade de soldagem, a combinação de  $U = 20$ ,  $I = 168$  e  $V = 31$  apresentou si-

Tabela 7.10 – Amplitudes de Variáveis após análises dos gráficos de contorno.

Variável	Valores
U [V]	(17; 20)
I [A]	(134; 168)
V [cm/min]	(30; 47)

Fonte: Autor

Tabela 7.11 – Otimização de respostas com os intervalos obtidos com a análise de superfície de resposta.

Resposta	Meta	Inferior	Alvo	Superior
P [mm]	Máximo	1,0	1,9	1,9
L [mm]	Máximo	4,1	7,4	7,4
D [%]	Máximo	18	46	46
Dz [HRC]	Máximo	58	62	62

Fonte: Autor

multaneamente o máximo para a penetração, largura, diluição e dureza do revestimento duro com um índice de qualidade de 0,96. Logo, todas as variáveis respostas foram possíveis de serem maximizadas conjuntamente.

Tabela 7.12 – Solução da otimização simultânea para as variáveis respostas de penetração, largura, diluição e dureza do revestimento duro, após análise dos gráficos de contornos das superfícies de respostas.

Solução	U [V]	I [A]	V [cm/min]	Dz [HRC] Ajuste	D [%] Ajuste	L [mm] Ajuste	P [mm] Ajuste	Função Desejabilidade Composta
<b>1</b>	20	168	30	61	44	7,6	1,9	0,97
<b>2</b>	<b>20</b>	<b>168</b>	<b>31</b>	<b>61</b>	<b>43</b>	<b>7,4</b>	<b>1,9</b>	<b>0,95</b>
<b>3</b>	20	168	31	61,8	43	7,4	1,9	0,95
<b>4</b>	20	168	31	61	43	7,40	1,9	0,95

Fonte: Autor

Para validar os resultados preditos pelo modelo de otimização, realizaram-se 6 réplicas do ensaio de soldagem com os valores de tensão, corrente e velocidade de soldagem, apresentados na Tabela 7.12, juntamente com as variáveis respostas de penetração, largura, diluição e dureza do revestimento duro. Com os valores médios das variáveis respostas obtidos nos ensaios, calculou-se o desvio relativo entre os valores preditos

pelo modelo e as médias calculadas, equação 7.2, o qual tem seus valores apresentados na Tabela 7.13.

$$\% \text{ Desvio Relativo} = \frac{\text{Valor Experimento} - \text{Valor Predito}}{\text{Valor Experimento}} * 100 \quad (7.2)$$

Tabela 7.13 – Tabela do Desvio Relativo [%] entre os resultados dos parâmetros da otimização simultânea e a média dos resultados das variáveis respostas na deposição do revestimento duro sem Cr pelo processo de soldagem FCAW.

	Parâmetro Otimizado	Réplicas com os parâmetros otimizados						Média	Desvio Padrão	Desvio relativo %
		2	R1	R2	R3	R4	R5			
U [V]	20	19	19	19	19	19	20	11	0,4	4,4
I [A]	168	154	169	158	155	167	159	160	6,3	4,8
V [cm/min]	31	30	30	30	30	30	30	30	0,0	0,0
P [mm] Ajuste	1,9	1,9	2,3	1,6	1,7	2,4	1,5	1,9	0,3	0,3
L [mm] Ajuste	7,4	7,4	7,3	6,8	6,6	7,1	6,9	7,1	0,3	0,3
D [%] Ajuste	43	39	46	40	41	43	39	41	2,7	4,0
Dz [HRC] Ajuste	61	59	61	57	60	62	60	60	1,7	2,0

Fonte: Autor

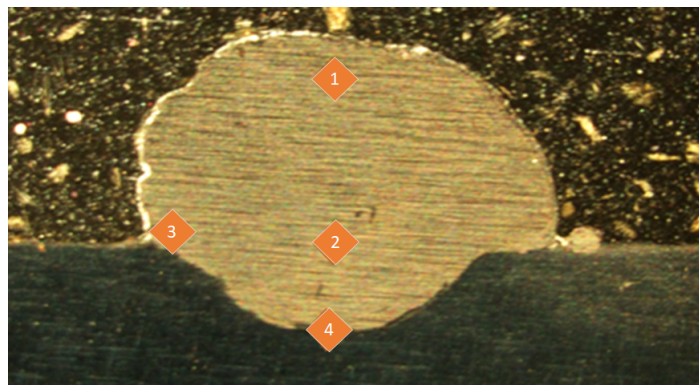
Com base nos valores calculados para os desvios relativos entre os valores preditos pelo modelo de otimização simultânea e a médias dos valores das variáveis dos ensaios realizados com os parâmetros preditos para tensão, corrente e velocidade de soldagem, verificou-se que não houve uma variação maior que 5% para nenhuma das variáveis, concluindo que o modelo se ajusta com um intervalo de confiança de 95%.

### 7.1.3 Ensaio de microdureza, Microscopia eletrônica de Varredura (MEV) e energia dispersiva de raios X (EDS)

#### 7.1.3.1 Ensaio de microdureza

De posse às amostras do dimensional do revestimento duro, realizaram-se as análises de microdureza, onde estão indicados as regiões de endentação, Figura 7.5, em que os resultados estão apresentados na Tabela 7.14.

Figura 7.5 – Esquema das regiões de endentação do ensaio de microdureza da amostra com revestimento de revestimento duro sem a adição de Cr.



Fonte: Autor

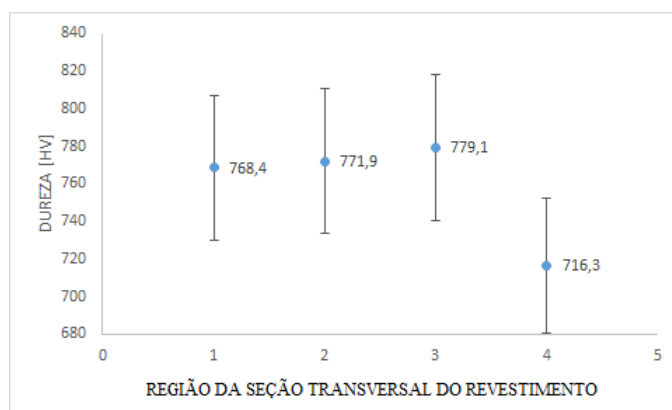
Tabela 7.14 – Tabela da microdureza distribuída por região (carga de 300 g e tempo de 15 s), conforme Figura 6.21.

<b>Microdureza [HV]</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Região 1</b>	<b>Região 2</b>	<b>Região 3</b>	<b>Região 4</b>
<b>1</b>	744	849	919	852
<b>2</b>	757	715	725	455
<b>3</b>	801	829	728	763
<b>4</b>	813	816	752	755
<b>5</b>	897	820	763	789
<b>6</b>	786	746	813	783
<b>7</b>	730	786	801	673
<b>8</b>	777	823	760	722
<b>9</b>	717	725	760	798
<b>10</b>	741	772	780	722
<b>11</b>	675	741	852	707
<b>12</b>	618	742	730	657
<b>13</b>	774	701	777	783
<b>14</b>	730	725	741	702
<b>15</b>	816	804	735	575
<b>16</b>	730	763	872	659
<b>17</b>	845	713	720	670
<b>18</b>	769	777	742	741
<b>19</b>	862	855	816	810
<b>20</b>	786	735	795	709
<b>Média</b>	768,4	771,9	779,1	716,3
<b>Desvio Padrão</b>	63,7	48,3	53,7	89,4

Fonte: Autor

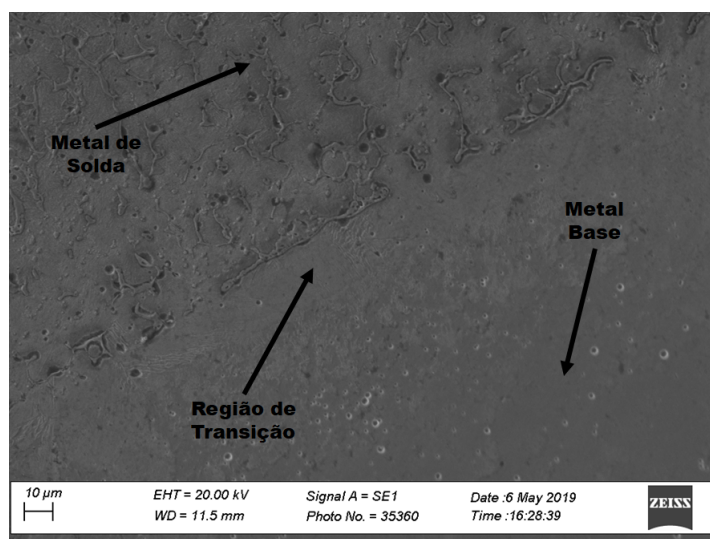
Após a análise das médias da microdureza [HV] por região, Figura 7.6, observou-se que a menor microdureza localiza-se na região 4 devido a maior diluição dos carbonetos do revestimento duro para o substrato e está na região de transição, Figura 7.7.

Figura 7.6 – Gráfico de microdureza média distribuída por região, conforme Figura 7.5



Fonte: Autor

Figura 7.7 – Imagem da amostra com deposição do revestimento duro sem a adição de Cr, adquirida pelo MEV, com ampliação de 1000 vezes, identificando a região de deposição, região de transição revestimento depositado e substrato e a região do substrato.

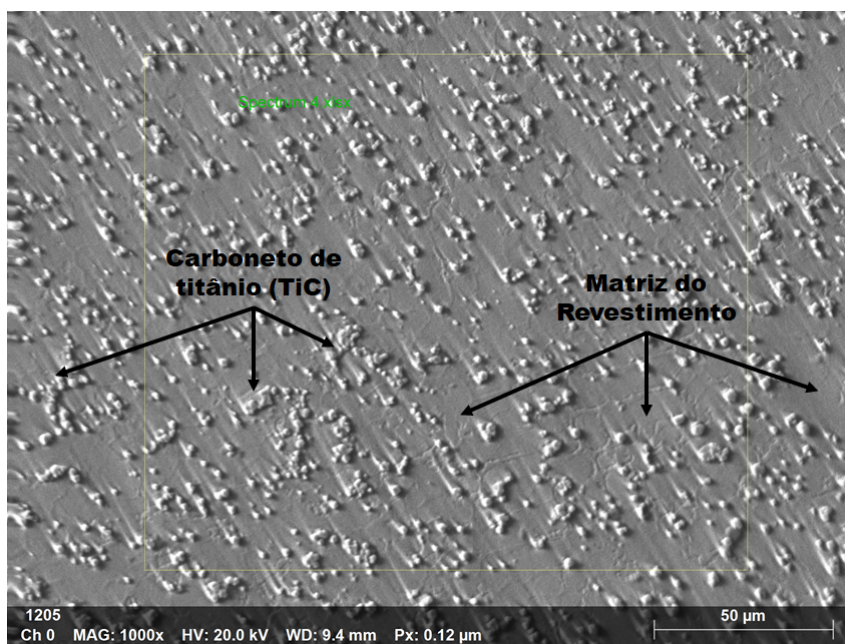


Fonte: Autor

### 7.1.3.2 Microestrutura dos revestimentos

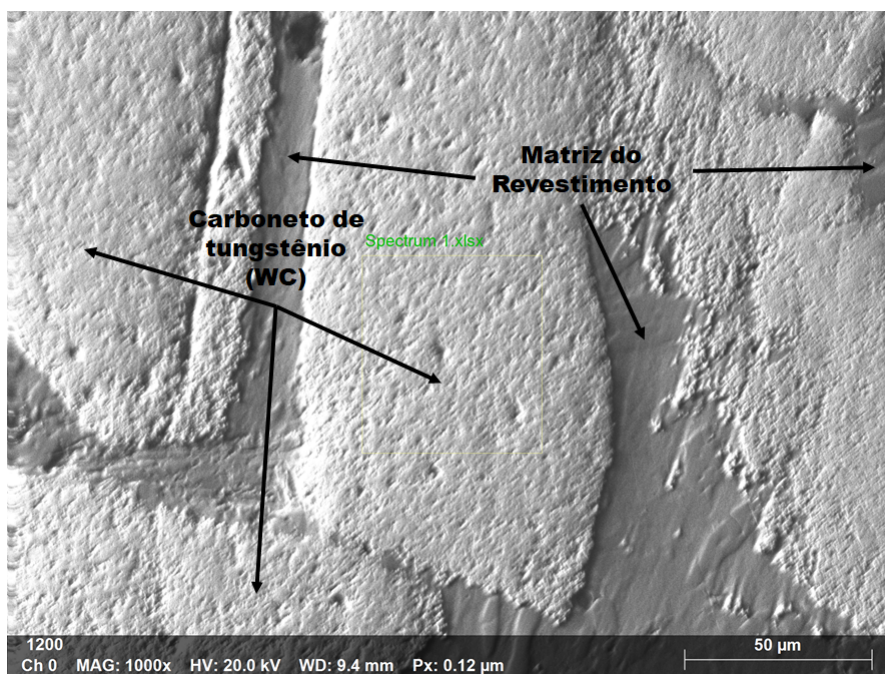
Foi realizada a preparação metalográfica, conforme fluxograma da Figura 6.17, de um das amostras de revestidos duro sem a adição de Cr, soldados com os parâmetros otimizados, Tabela 7.13, e posterior aquisição da imagem da região de deposição do revestimento duro sem a adição de Cr pelo processo de soldagem FCAW, Figura 7.8, pelo MEV com ampliação de 1000 vezes. O mesmo procedimento foi adotado para a amostra com revestimento de WC, Figura 7.9.

Figura 7.8 – Imagem capturada do MEV na região de deposição do revestimento duro sem adição, com ampliação de 1000 vezes indicando as fases constituintes do revestimento depositado.



Fonte: Autor

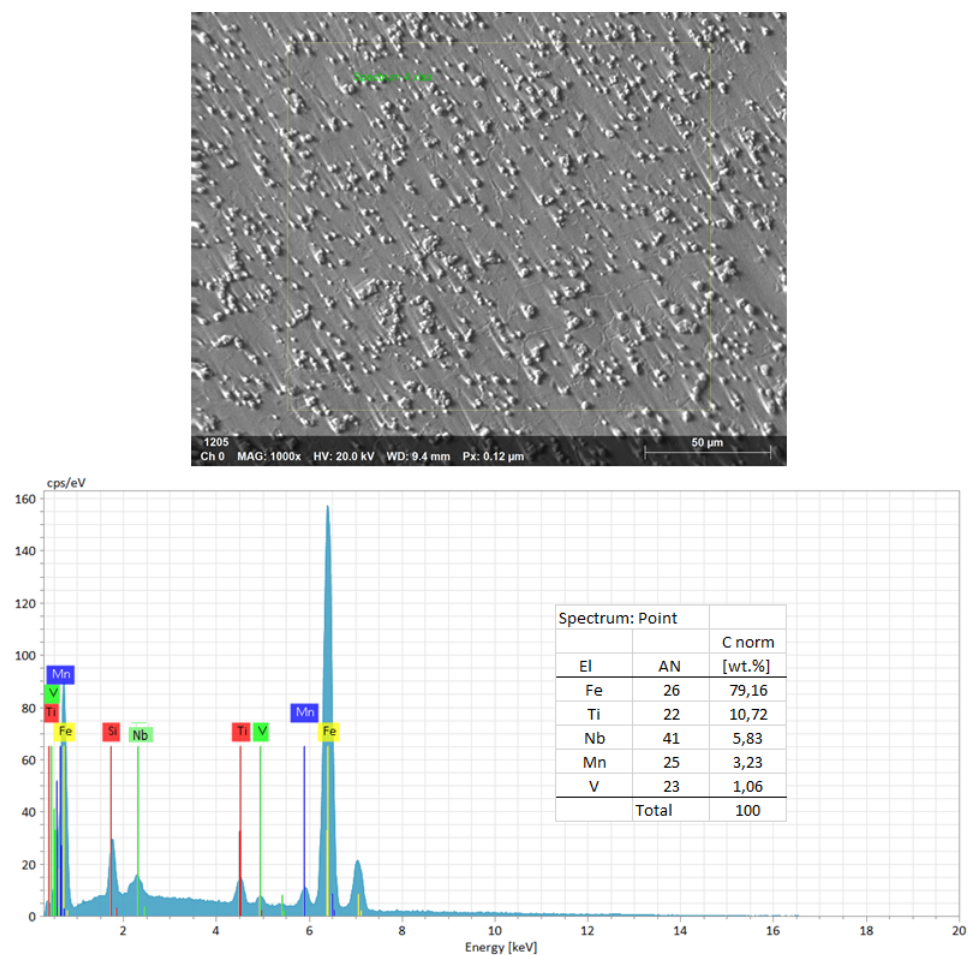
Figura 7.9 – Imagem capturada do MEV na região de deposição do revestimento duro de WC com Cr com ampliação de 1000 vezes indicando as fases constituintes do revestimento depositado.



Fonte: Autor

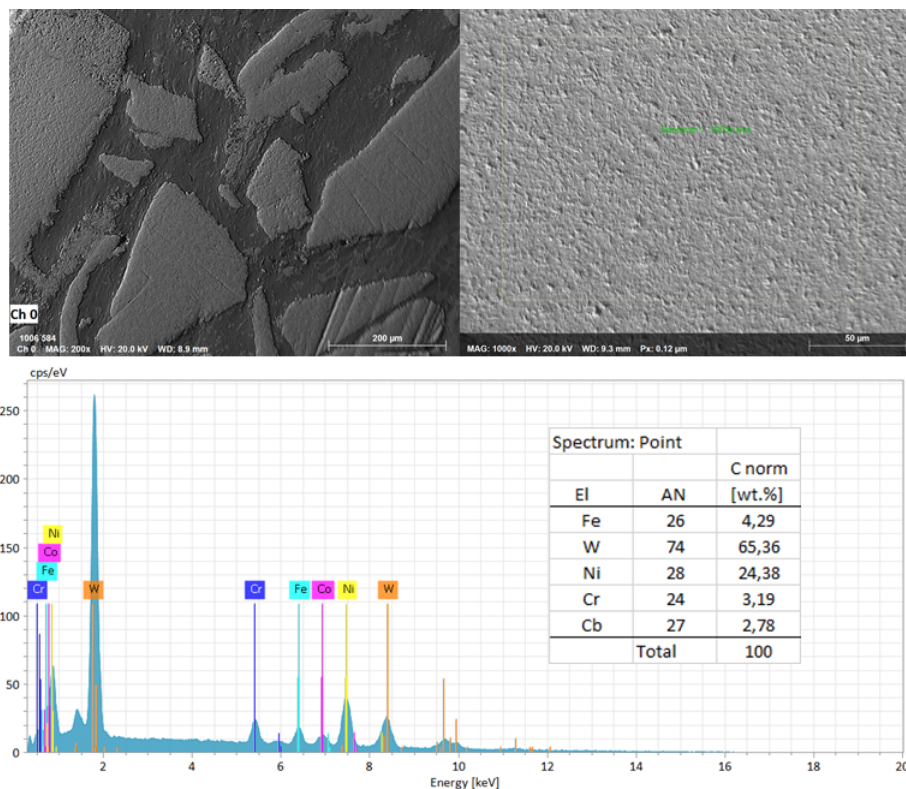
Para identificar as fases presentes em cada revestimento, utilizou-se da técnica de EDS e da análise do espectro da difração de raio X. O espectro de EDS identificou os elementos químicos presentes em cada revestimento, representados nas Figuras 7.10 e 7.11, assim como a porcentagem de cada elemento. A partir da determinação dos elementos químicos pela técnica de EDS e a análise dos espectros de raio X, (Anexo E e F), pode-se determinar qualitativamente as fases presentes em cada carboneto formado em ambos os revestimentos, Tabela 7.15.

Figura 7.10 – Imagem capturada do MEV indicando a região de leitura do EDS, com a tabela de elementos químicos com as porcentagens em massa e atômica e o espectro do EDS para o revestimento duro sem adição de Cr, depositado pelo processo de soldagem FCAW.



Fonte: Autor

Figura 7.11 – Imagem capturada do MEV indicando a região de leitura do EDS, com a tabela de elementos químicos com as porcentagens em massa e atômica e o espectro do EDS para o revestimento duro WC, depositado pelo processo de sinterização.



Fonte: Autor

Os resultados do ensaio de micrografia óptica ficaram comprometidos, visto que, a preparação da superfície da amostra com revestimento duro é de difícil acabamento. Neste caso, a matriz se desgasta muito mais rápido do que as fases de carboneto duro. Após o lixamento e polimento, as amostras apresentaram relevos mais elevados na região dos carbonetos e um relevo mais baixo na região da matriz do revestimento, impossibilitando a visualização no microscópio óptico e identificação dos microconstituintes dos revestimentos. Para identificar as fases presentes em cada região da amostra, optou-se por utilizar o recurso do EDS de mapa da região, representados nas Figuras 7.12 para o revestimento de WC e Figura 7.13 para o revestimento sem a adição de Cr.

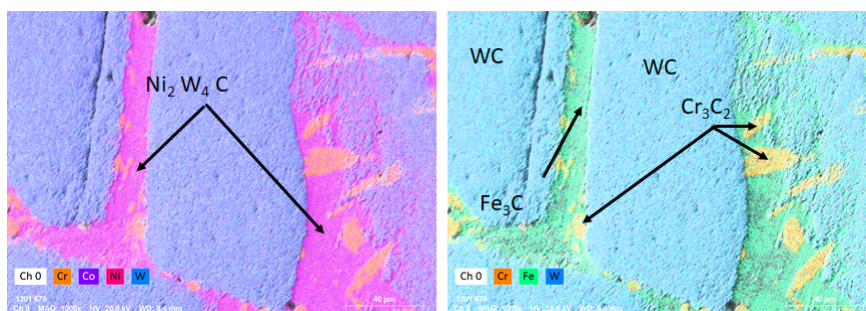
Tabela 7.15 – Microconstituintes identificados nos revestimentos sem a presença de Cr (soldado), Anexo E e do revestimento duro com a presença de Cr (sinterizado), Anexo F.

Revestimento	Microestrutura
Soldado	TiC
	NbC
	Cementita ( $Fe_3C$ )
	Martensita (FeC)
	VC
Sinterizado	WC
	Cementita ( $Fe_3C$ )
	$Co_3C_2$
	$Ni_2W_4C$
	$Cr_3C_2$

Legenda: TiC - Carboneto de Titânio, NbC - Carboneto de Nióbio, VC - Carboneto de Vanádio,  $Co_3C_2$  - Carboneto de Cobalto,  $Ni_2W_4C$  - Carboneto de Níquel Titânio,  $Cr_3C_2$  - Carboneto de Cromo

Fonte: Autor

Figura 7.12 – Imagem capturada do MEV indicando o mapa de regiões onde os elementos químicos da amostra estão presentes para o revestimento duro WC, depositado pelo processo de sinterização.

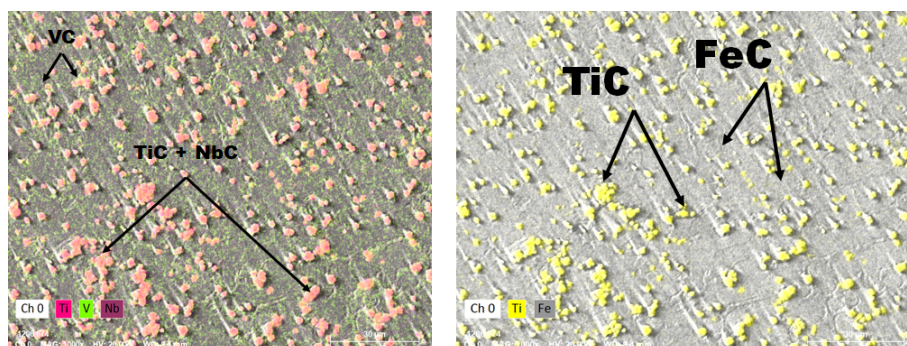


Fonte: Autor

## 7.2 Ensaio de abrasão com roda de borracha e areia seca.

Foram realizados os ensaios de abrasão para medir a perda de massa e posterior comparação entre a resistência ao desgaste a abrasão do metal da face de corte basal do revestimento com WC e do revestimento duro sem a adição de cromo depositado pelo processo de soldagem FCAW, conforme a norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016), Figura 7.14.

Figura 7.13 – Imagem capturada do MEV indicando o mapa de regiões onde os elementos químicos da amostra estão presentes para o revestimento duro sem adição de Cr, depositado pelo processo FCAW.



Fonte: Autor

Figura 7.14 – Foto da máquina de ensaio de abrasão com roda de borracha e areia seca, conforme norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016), instalada no Laboratório de Automação na UFLA.



Fonte: Autor

Referente a calibração da vazão da areia, ajustou-se a abertura do bico de areia da máquina de forma a controlar os valores entre 300 a 400 g/min, mantendo-se o fluxo de areia uniforme. A máquina foi calibrada com uma vazão na ordem de 360 g/min de areia seca e vazão uniforme.

A máquina de abrasão com roda de borracha e areia seca foi calibrada utilizando como material de referência o aço H13 temperado, com dureza de aproximadamente 48 HRC. O procedimento de ensaio utilizado foi o B, segundo a norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016), com carga de 130 N aplicada na amostra, rotação da roda de borracha de 200 rpm, diâmetro da roda de 718 mm, durante um tempo de 10 min de ensaio e vazão de areia de 360 g/min com fluxo estável, conforme norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016). Os resultados obtidos na calibração estão apresentados na Tabela 7.16, juntamente com os valores de referência, ASTM G65-16 (ASTM, 2016).

Tabela 7.16 – Tabela de relação entre a perda de massa do material de referência H13 encontrado na norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016) Tabela X1.3, Anexo E e o valor encontrado durante a calibração da máquina de abrasão de borracha com areia seca.

<b>Material</b>	<b>Procedimento</b>	<b>Média Perda de Massa [g]</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coefficiente de Variação [%]</b>
H13 Norma ASTM G65-16	B	0,4187	0,0567	14
H13 Calibração	B	0,4432	0,0195	4

Fonte: Autor

A partir dos resultados encontrados (Tabela 7.16), e comparando-se com valores da norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016), conclui-se que os parâmetros utilizados na máquina de abrasão (tipo de areia, vazão da areia e carga aplicada na amostra), não apresentaram diferença significativa entre eles, já que a média da perda de massa das amostras ensaiadas está dentro do intervalo de variação que a norma estabelece para este tipo de material. Além disso, o coeficiente da variação foi menor para os testes de calibração, o que garante um equipamento com características adequadas para a realização dos testes de perda de massa para diferentes tipos de

revestimentos e o metal das facas de corte basal, além de repetibilidade dos ensaios realizados.

O mesmo procedimento foi utilizado nos ensaios das amostras soldadas com revestimento duro sem a adição de cromo para amostras com revestimento de WC e do metal das facas de corte basal comerciais de diferentes fornecedores. A norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016) estabelece que o equipamento deve ser calibrado para que haja perda de massa conforme os critérios da Tabela X1.3 (ASTM, 2016), utilizando corpos de prova de referência com o aço ferramenta H13 (certificado de fornecimento no anexo D), temperado e com a dureza aproximada de 48 HRV. Os corpos de prova de referência foram cortados, tratados termicamente e, posteriormente, a superfície das faces foram retificadas. A rugosidade média (Ra) desta amostras de referência ficaram abaixo do exigido pela norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016) , Ra = 0,6 $\mu$ .

Este método de determinação de desgaste à abrasão das facas de corte basal tem a particularidade de manter a severidade das condições de teste iguais para todas as amostras avaliadas, o que não ocorre em campo. Por este motivo, optou-se pela realização e planejamento de testes no equipamento de abrasão para fins de comparação dos resultados entre modelos de facas comerciais e o modelo proposto neste trabalho. Os resultados dos testes de perda de massa estão apresentados na Tabela 7.17.

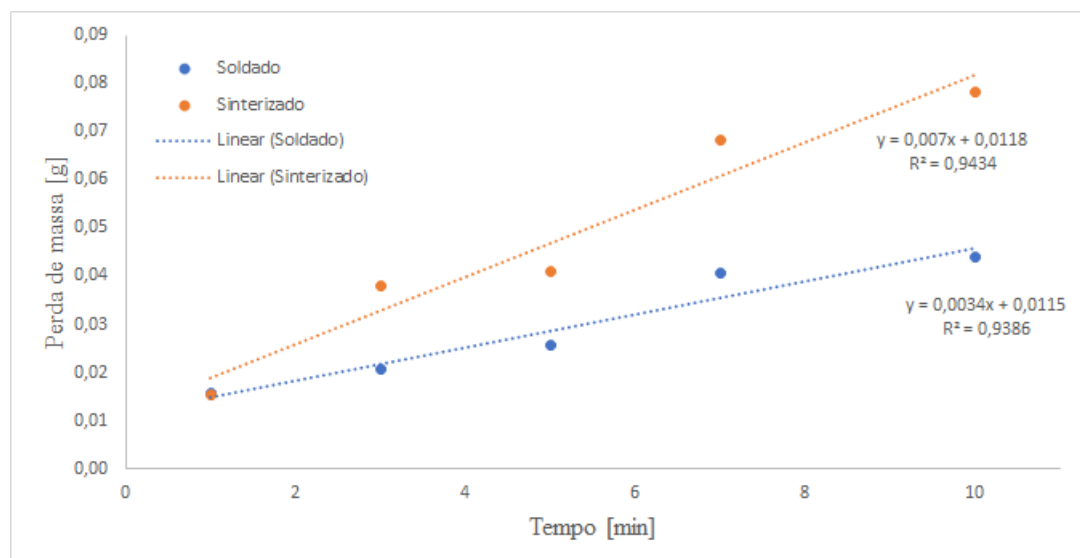
Tabela 7.17 – Resultado do ensaio de perda de massa comparando as amostras soldadas sem a adição de cromo, amostras sinterizadas de WC e metal das facas comerciais de 3 fornecedores distintos de faca de corte basal.

<b>Ensaio Procedimento B (Abrasão linear = 1436 m)</b>			
<b>Material Ensaiado</b>	<b>Perda de Massa [g]</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coefficiente de Variação</b>
<b>Soldado</b>	0,0440	0,0020	4,46%
<b>Sinterizado</b>	0,0767	0,0023	2,99%
<b>Faca fornecedor A</b>	0,3380	-	-
<b>Faca fornecedor B</b>	0,2420	-	-
<b>Faca fornecedor C</b>	0,5960	-	-

Fonte: Autor

Verifica-se no teste de abrasão de borracha com areia seca que, a perda de massa para o revestimento sinterizado de WC foi maior, quando comparado com o revestimento duro sem a adição de cromo, Tabela 7.17. Já a perda de massa do metal das facas comerciais apresentaram valores elevados, quando comparadas com a perda de massa para as amostras com revestimento. Outro fator observado é a falta de padronização do aço utilizado na confecção das facas de corte basal, representado pela grande variação da perda de massa entre os diferentes fornecedores de facas de corte basal, também representado na Tabela 7.17, porém apenas uma amostra para cada fornecedor foi ensaiada, logo não foi calculado o desvio padrão e, conseqüentemente, o coeficiente de variação. Um outro resultado significativo foi a taxa de perda de massa para ambos os revestimentos Figura 7.15.

Figura 7.15 – Gráfico da relação entre a taxa de perda de massa [g] das amostras revestidas de WC e as amostras com revestimento duro sem adição de cromo depositado pelo processo de soldagem FCAW.



Fonte: Autor

Verificou-se que para o teste de abrasão de roda de borracha com areia seca, o revestimento de WC (sinterizado) apresentou taxa de perda

de massa em torno de 48,6% maior que o revestimento duro sem a adição de cromo depositado pelo processo de soldagem FCAW. Comparando com os resultados obtidos por Lima e Ferraresi (2010), Tabela 7.18, pode-se concluir que, apenas o revestimento duro de FeCrC + Nb apresentou uma perda de massa na ordem da perda de massa dos revestimentos duros estudados. Os demais revestimentos estudados por Lima e Ferraresi (2010) apresentaram uma perda de massa mais elevada e um desvio padrão elevado em relação aos resultados encontrados na Tabela 7.17.

Tabela 7.18 – Tabela dos resultados de perda de massa de Lima e Ferraresi (2010).

<b>Revestimento</b>	<b>Perda de Massa [g]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
FeCrC	0,0187	0,0050
FeCrC + Nb	0,0042	0,0013
FeCrC + Ti	0,0130	0,0014
ER1	0,0053	0,0015

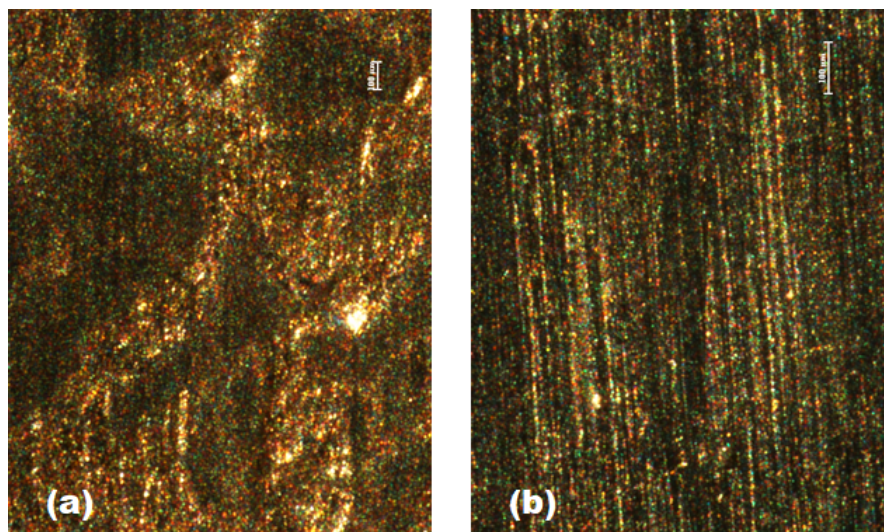
Fonte: Adaptado de Lima e Ferraresi (2010)

O mecanismo de desgastes para ambos revestimentos se deram por abrasão, conforme ilustrado na Figura 7.16, onde se observa-se trilhas de desgastes.

Para melhor visualização dos detalhes da região desgastada de ambas amostras, após limpeza e sem ataque químico no MEV com aumento de 1000 vezes, recorre-se à Figura 7.17, em que são observadas partículas em alto relevo para o revestimento de WC com formatos irregulares, distribuídos de forma heterogênea e de dimensões elevadas quando comparados com os TiC. Observou-se ainda que revestimento duro sem a adição de cromo com formato mais circulares e distribuídos de forma homogênea na matriz do revestimento apresentou maior resistência à abrasão e serviu de ancoramento contra a ação das partículas abrasivas.

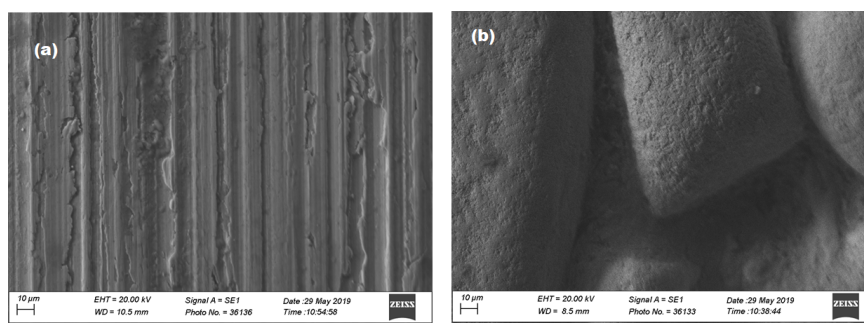
O maior desgaste se deu na matriz da amostra sinterizada de WC devido a formação de um microconstituente de dureza menor (cementita -

Figura 7.16 – Imagens da trilha de desgaste por microscopia ótica (aumento de 50X) da região de ensaio de abrasão, conforme norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016), referentes à amostra sinterizada (a) e à amostra soldada com revestimento duro sem adição de cromo (b).



Fonte: Autor

Figura 7.17 – Imagens por microscopia eletrônica de varredura (aumento de 1000X) da região de ensaio de abrasão, conforme norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016), referentes à amostra soldada com revestimento duro sem adição de Cr (a) e à amostras de WC sinterizado (b).

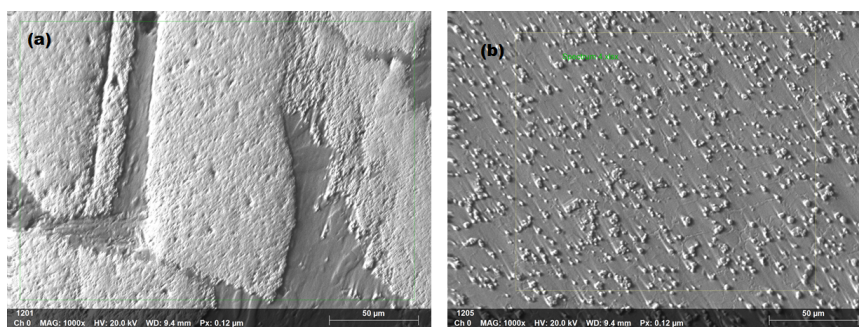


Fonte: Autor

$Fe_3C$ ), em relação ao microconstituente formado na amostra com revestimento duro sem a adição de cromo (martensita -  $FeC$ ) formada na matriz do material depositado. Outro aspecto que justifica menor taxa de desgaste para a amostras com revestimento duro sem cromo é o fato do carbonetos

estarem distribuídos de forma mais uniforme em relação às amostras de WC, Figura 7.18.

Figura 7.18 – Imagens da por microscopia eletrônica de varredura (aumento de 1000X) das amostras de WC sinterizado (a) e à amostra soldada com revestimento duro sem adição de cromo (b), mostrando a morfologia dos carbonetos duro na matriz dos revestimentos.



Fonte: Autor

## 8 DISCUSSÕES

A partir dos resultados alcançados, foi possível definir um novo processo de deposição de revestimento duro em facas de corte basal sem adição de cromo, por meio do processo de soldagem FCAW, utilizando um arame tubular comercial, auto protegido (sem a necessidade de gás de proteção) e com diâmetro de 1,6 mm, o qual deposita uma liga metálica a base de carboneto de titânio e nióbio.

Este material apresentou boa soldabilidade, sem a presença de trincas longitudinais, comuns para revestimento duro, respingos em excesso, mordedura e outros defeitos, dentro da faixa de parâmetros de soldagem estabelecidos no planejamento de experimento fatorial design  $2^3$  completo, com delineamento composto central rotacional e posterior otimização de respostas simultâneas e função de desejabilidade.

O teste de abrasão de roda de borracha com areia seca indicou que o desgaste para amostra de WC sinterizado foi maior que nas amostras com revestimento duro depositado por soldagem sem a adição de cromo. Isto se deve ao fato de que a matriz formada para as amostras de WC apresentou microconstituente com menor dureza e uma distribuição heterogênea dos carbonetos duro de WC na matriz.

Ainda referente aos resultados do ensaio de abrasão, pode-se concluir que ambas as amostras apresentaram o mesmo mecanismo de desgaste à abrasão com baixo desvio padrão e variância do processo. Comparando estes resultados com os limites estabelecidos pela norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016), foi evidenciado que o desgaste no material proposto foi de aproximadamente 3 vezes menor do que o esperado pela norma.

Quando comparado com resultados obtidos por Lima e Ferraresi (2010) para outros tipos de revestimento duro, este demonstrou ser mais robusto e com menor variação para o teste de abrasão acelerada, isto o

habilita a ser aplicado em testes de campo não só para facas de corte basal, mas também a qualquer outro tipo de cutelo utilizado em implementos agrícolas (ensiladora, colhedoras de modo geral que utilizam processos de corte durante a colheita e também em partes desses implementos que possam entrar em contato com a sílica proveniente do solo agrícola).

Foi observado que o revestimento duro de TiC sem a adição de cromo, apesar de possuir maior resistência a abrasão, apresentou melhor usinabilidade, quando comparado com o revestimento duro de WC, pois durante o processo de retifica da amostra para os testes de abrasão de roda de borracha com areia seca, ficou evidenciado que, durante o processo de usinagem, o revestimento de WC desgastava o rebolo da retifica enquanto o revestimento de TiC não apresentou maiores problemas de usinagem, o que pode ser explicado por Júnior, Ventrella e Gallego (2015).

A caracterização do revestimento duro sem adição de cromo e do revestimento WC demonstrou-se eficiente para o entendimento do mecanismo de desgaste e o motivo pelo qual a amostra de WC apresentaram maior desgaste quando comparado com a deposição pelo processo de soldagem FCAW, o que justifica o desenvolvimento de novos revestimentos para facas de corte basal sem adição de cromo em sua composição química.

## 9 CONCLUSÃO

- A deposição do metal duro sem Cr é viável para o aumento da vida útil das facas de corte basal;
- Este processo também pode ser aplicado a diferentes sistemas de cortes utilizados em colhedoras;
- E também pode ser aplicado em partes de equipamentos que sofram com abrasão em sistemas de pós colheita.

## 10 TRABALHOS FUTUROS

- Realizar novos ensaios considerando pré-aquecimento das amostra antes da deposição do revestimento duro;
- Avaliar o tratamento térmico de alívio de tensões do revestimento duro para minimizar as trincas longitudinais;
- Desenvolver o processo de fabricação das facas com revestimento de TiC sem a presença de Cr;
- Estudar outros processos de deposição do revestimento duro (Ex. Processo TIG com alimentação automática de arame);
- Avaliar a usinabilidade do revestimento duro de TiC depositado pelo processo FCAW;
- Avaliar a vida útil das facas de corte em campo.

**REFERÊNCIAS**

AGRICORTE. 2017. Disponível em: <<http://agricorte.com.br/produto/faca/>>. Acesso em: 07/08/2017.

ALBANESE, S. et al. Gemas: cobalt, cr, cu and ni distribution in agricultural and grazing land soil of europe. **Journal of geochemical exploration**, Elsevier, v. 154, p. 81–93, 2015.

ALORAIER, A.; IBRAHIM, R.; THOMSON, P. Fcaw process to avoid the use of post weld heat treatment. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Elsevier, v. 83, n. 5, p. 394–398, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G65-00 - Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA, 2000. 14 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5963-04 Standard Test Method for Rubber Property—Abrasion Resistance (Rotary Drum Abrader)**. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA, 2015. 9 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G65-16 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA, 2016. 14 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G40-17 - Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA, 2017. 9 p.

ARCHARD, J. Contact and rubbing of flat surfaces. **Journal of applied physics**, AIP, v. 24, n. 8, p. 981–988, 1953.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **ABENDI Ensaio visual e dimensional de soldas - Procedimentp de END PR - 050**. Av. Onze de Junho, 1317 - Vila Clementino - 04041-054 - São Paulo - SP, 2011. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO4649:2014 - Borracha, vulcanizada ou termoplastica - Determinação da resistência à abrasão usando um dispositivo de tambor cilíndrico rotativo**. Avenida das Nações Unidas, 18801 - Cj. 1501 - São Paulo - SP, Brasil, 2014. 21 p.

BAUER, J. R. d. O. et al. Microhardness of ni-cr alloys under different casting conditions. **Brazilian oral research**, SciELO Brasil, v. 20, n. 1, p. 40–46, 2006.

BOZZI, A. C.; MELLO, J. D. B. de. Wear resistance and wear mechanisms of wc–12% co thermal sprayed coatings in three-body abrasion. **Wear**, Elsevier, v. 233, p. 575–587, 1999.

BUCHANAN, V.; SHIPWAY, P.; MCCARTNEY, D. Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry. **Wear**, Elsevier, v. 263, n. 1-6, p. 99–110, 2007.

BUDINSKI, K. G. H. **Friction and Wear Mechanisms. ABM. II Seminário sobre Materiais Resistentes ao Desgaste**. Uberlândia - MG: Universidade Federal de Uberlândia, 1991. 263–306 p.

CARCELLER, R. Influencia de los parâmetros del régimen de recargue en la morfología de los depósitos de acero e fundición blanca al cromo y su incremento en la resistencia al desgaste abrasivo. **Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Mecánica, República de Cuba, Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas**, 2007.

CASSIA, M. T. et al. Desgaste das facas do corte basal na qualidade da colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Universidade Federal de Santa Maria, v. 44, n. 6, 2014.

CIRILLO, M. A. **Otimização na Experimentação**. [S.l.]: UFLA, 2015.

COLOMBARI, R. R. Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção. **Universidade Federal de Itajubá. Itajubá**, 2004.

CONDE, R. Recubrimientos resistentes al desgaste. **Boletín Técnico Conarco**, n. 85, p. 2–20, 1986.

COPERSUCAR. 2018. Disponível em: <<https://www.copersucar.com.br/noticias/funcionamento-de-uma-usina-de-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 22/04/2019.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of quality technology**, Taylor & Francis, v. 12, n. 4, p. 214–219, 1980.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 53516:1987-06 Testing of rubber and elastomers; determination of abrasion resistance**. Alemanha, 1987. 9 p.

ESAB AB. **Repair and Maintenance Welding Handbook**. Box 8004 S-402 77 GÖTEBORG SWEDEN, 2003. 128 p.

EVANS, A.; WILSHAW, T. R. Quasi-static solid particle damage in brittle solids—i. observations analysis and implications. **Acta Metallurgica**, Elsevier, v. 24, n. 10, p. 939–956, 1976.

FORTES, C. **Apostila de arame tubulares**. [S.l.], 2004. 51 p.

FULCHER, J.; KOSEL, T.; FIORE, N. The effect of carbide volume fraction on the low stress abrasion resistance of high cr-mo white cast irons. **Wear**, Elsevier, v. 84, n. 3, p. 313–325, 1983.

FURUKAWA, N. M. 2013. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/informatica-agropecuaria/busca-de-imagens/-/midia/1068001/cana-de-acucar---perdas-em---produtividade-agricola>>. Acesso em: 07/08/2017.

HUTCHINGS, I. Tribological properties of metal matrix composites. **Materials science and technology**, Taylor & Francis, v. 10, n. 6, p. 513–517, 1994.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2017.

JAMO, A. I. 2018. Disponível em: <<http://https://www.jamo.ind.br/>>. Acesso em: 27/11/2018.

JÚNIOR, J. G. F.; VENTRELLA, V. A.; GALLEGRO, J. Reciclagem de cavacos de titânio para a deposição de revestimentos duros por soldagem. **Soldagem e Inspecao**, p. 117–127, 2015.

KANNAN, T.; MURUGAN, N. Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 176, n. 1-3, p. 230–239, 2006.

KATHERASAN, D. et al. Simulation and parameter optimization of flux cored arc welding using artificial neural network and particle swarm optimization algorithm. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Springer, v. 25, n. 1, p. 67–76, 2014.

KONG, X. China must protect high-quality arable land. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 506, n. 7486, p. 7, 2014.

LI, X. et al. Contaminated sites in china: Countermeasures of provincial governments. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 147, p. 485–496, 2017.

LIMA, A. C.; FERRARESI, V. A. Desgaste em equipamentos de processamento da cana-de-açúcar em destilaria de álcool. **16º POSMEC-Simpósio de Pós-graduação em Engenharia. Universidade Federal de Uberlândia-FEMEC**, 2006.

LIMA, A. C.; FERRARESI, V. A. Análise da resistência ao desgaste de revestimento duro aplicado por soldagem em facas picadoras de cana-de-açúcar. **Soldagem e Inspeção, São Paulo**, v. 15, n. 2, p. 94–102, 2010.

MINISTRY OF THE ENVIRONMENT FINLAND, MEF. **Government Decree on the Assessment of Soil Contamination and Remediation Needs**. Filand, 2007. 14 p.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem-fundamentos e tecnologia**. [S.l.]: Editora UFMG, 2005.

MONTGOMERY, S. L. et al. Mississippian barnett shale, fort worth basin, north-central texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential. **AAPG bulletin**, American Association of Petroleum Geologists (AAPG), v. 89, n. 2, p. 155–175, 2005.

MULHEARN, T.; SAMUELS, L. The abrasion of metals: a model of the process. **Wear**, Elsevier, v. 5, n. 6, p. 478–498, 1962.

NASSIF, D. 1999. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_98\\_22122006154841.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_98_22122006154841.html)>. Acesso em: 07/08/2018.

PARANHOS, R.; MELLO. Influência dos parâmetros de soldagem com arco submerso empregando fluxo ligado e arame de aço-c nas características de revestimento de ligas fe-cr-c resistentes ao desgaste abrasivo. xxiv encontro nacional de tecnologia da soldagem. In: **XI Congresso Latino-Americano e V Ibero-Americano de Soldagem. Fortaleza-CE**. [S.l.: s.n.], 1998.

PELOIA, P. R.; MILAN, M.; ROMANELLI, T. L. Capacity of the mechanical harvesting process of sugar cane billets. **Scientia Agricola, SciELO Brasil**, v. 67, n. 6, p. 619–623, 2010.

PINTAUDE, G.; ALBERTIN, E.; SINATORA, A. A review on abrasive wear mechanisms of metallic materials. **Anais do abrasion**, 2005.

PRISCO, M. Revestimentos protetores contra desgaste. **Soldagem de Manutenção. ABS-ABRAMAN**, p. 231–284, 1993.

RABINOWICZ, E.; DUNN, L.; RUSSELL, P. A study of abrasive wear under three-body conditions. **Wear**, Elsevier, v. 4, n. 5, p. 345–355, 1961.

RIBEIRO, R. Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo fe-c-cr utilizados na indústria sucroalcooleira. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2004.

RICHARDSON, R. The wear of metals by relatively soft abrasives. **Wear**, Elsevier, v. 11, n. 4, p. 245–275, 1968.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. Planejamento de experimentos e otimização de processos: uma estratégia sequencial de planejamentos. 2005.

SCOTTI, A.; ROSA, L. A. A. Influence of oscillation parameters on crack formation in automatic fe b hardfacing. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 65, n. 1-3, p. 272–280, 1997.

SILVA, E. P. da; SILVA, F. M. da; MAGALHÃES, R. R. Application of finite elements method for structural analysis in a coffee harvester. **Engineering**, Scientific Research Publishing, v. 6, n. 03, p. 138, 2014.

SILVA, R. D.; BERVIAN, P. A.; CERVO, A. L. **Metodologia científica**. [S.l.]: São Paulo. Perason Prentice Hall, 2007.

STEMPFLÉ, P. et al. Triboactive surfaces in multi-asperity nanotribology. In: **42nd Leeds-Lyon Symposium on Tribology**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 0.

STOETERAU, R. L. **TRIBOLOGIA- EMC 5315**. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. 179 p.

TORRANCE, A. A. An explanation of the hardness differential needed for abrasion. **Wear**, Elsevier, v. 68, n. 2, p. 263–266, 1981.

TÓTH, G. et al. Heavy metals in agricultural soils of the european union with implications for food safety. **Environment international**, Elsevier, v. 88, p. 299–309, 2016.

UNICA. 2018. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/mapa-da-producao>>. Acesso em: 28/06/2018.

VERNHES, L.; AZZI, M.; KLEMBERG-SAPIEHA, J. Alternatives for hard chromium plating: Nanostructured coatings for severe-service valves. **Materials Chemistry and Physics**, Elsevier, v. 140, n. 2-3, p. 522–528, 2013.

VOLTARELLI, M. A. et al. 2014. Disponível em: <<http://www.grupocultivar.com.br/artigos/desafios-da-colheita-mecanizada-da-cana>>. Acesso em: 28/06/2018.

VOLTARELLI, M. A. et al. Qualidade do corte basal de cana-de-açúcar utilizando-se de três modelos de facas. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, p. 528–541, 2015.

WANG, J. Carbon-nanotube based electrochemical biosensors: A review. **Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis**, Wiley Online Library, v. 17, n. 1, p. 7–14, 2005.

WELDING-HANDBOOK. Welding processes. **American Welding Society**, v. 2, p. 8, 1991.

ZHUK, Y. **Improving component life in abrasive, corrosive aerospace environments**. UEA, 2017. Disponível em: <<http://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/improving-component-life-in-abrasive-corrosive-aerospace-environments>>.





**Teste de roda de areia seca / borracha**  
**Procedimento ASTM G – 65 / 2016**

Qualificação do Equipamento (11.4): \_\_\_\_\_ Data: 08/04/2019  
 Materiais de Referência: H13 \_\_\_\_\_ Quantidade: 05  
 Ajuste de Perda de Volume (avg) \_\_\_\_\_ Coeficiente de Variação: 4,46%

**Dados de Teste**

Descrição do Material: Revestimento de TiC sem adição de Cr  
 Tratamento Térmico: Temperado  
 Dureza: 61 HRV  
 Preparação da Superfície: Retificado com Ra = 0.06µm

Teste nº	01	02	03	04
Tipo de borracha	RT-LL-82-80	RT-LL-82-80	RT-LL-82-80	RT-LL-82-80
Rotação da Roda [rpm]	200	200	200	200
Fluxo de areia [g/min]	360	360	360	360
Massa inicial [g]	123,9224	127,4427	128,8215	108,6428
Massa final [g]	123,8784	127,4015	128,7763	108,5973
Perda de massa [g]	0,0,0440	0,0412	0,0452	0,0455
Densidade [g/cm³]	-	-	-	-
Perda Volumétrica [mm³]	-	-	-	-
Ajuste perda de volume [mm³]	0	0	0	0

Comentários: \_\_\_\_\_

Diâmetro da roda: 718 mm  
 Largura da roda: 12,7 mm  
 Dureza da roda: 60 ShoreA

Nome da empresa: \_\_\_\_\_ Testado por: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

**Teste de roda de areia seca / borracha**  
**Procedimento ASTM G – 65 / 2016**

Qualificação do Equipamento (11.4): \_\_\_\_\_ Data: 08/04/2019  
 Materiais de Referência: H13 \_\_\_\_\_ Quantidade: 05  
 Ajuste de Perda de Volume (avg) 0 mm³ \_\_\_\_\_ Coeficiente de Variação: 2,99%

**Dados de Teste**

Descrição do Material: Revestimento de WC com adição de Cr      Diâmetro da roda: 718 mm  
 Tratamento Térmico: Temperado      Largura da roda: 12,7 mm  
 Dureza: 62 HRV      Dureza da roda: 60 ShoreA  
 Preparação da Superfície: Retificado com Ra = 0.06µm

Teste nº	01	02	03	04
Tipo de borracha	RT-LL-82-80	RT-LL-82-80	RT-LL-82-80	RT-LL-82-80
Rotação da Roda [rpm]	200	200	200	200
Fluxo de areia [g/min]	360	360	360	360
Massa inicial [g]	131,8679	132,883	132,0908	130,7024
Massa final [g]	131,793	132,8088	132,0127	130,6226
Perda de massa [g]	0,0749	0,0742	0,0781	0,0798
Densidade [g/cm³]	-	-	-	-
Perda Volumétrica [mm³]	-	-	-	-
Ajuste perda de volume [mm³]	0	0	0	0

Comentários: \_\_\_\_\_

---

Nome da empresa: \_\_\_\_\_ Testado por: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_


Fonte: Adaptado de ASTM (2016)

ANEXO B – Certificado de qualidade do metal base.





CERTIFICADO DE QUALIDADE  
CERTIFIED MATERIAL TEST REPORT

BR-HL-BARRAO DE COCAIS-BECC  
AV. GETULIO VARGAS, 1555  
BARRAO DE COCAIS, Minas Gerais - CEP 35970-000  
Brasil / (51)38378100

CLIENTE / CUSTOMER GERDAU AÇOS LONDRES S A		PEDIDO CLIENTE / CUSTOMER ORDER 900021933		DATA / DATE 25.01.2018		TORÇAO DE VENDA / SALES ORDER		PROJETO / PRODUCT BARRAO CURVA		NORMA - SPECIFICATION - QUALIFICATION / NORM - SPECIFICATION - QUALIFICATION / ASTM A36 / 3887007 MR250	
NÚMERO / NUMBER 8102307413/00010		NOME FISCAL 900021933		NOME / CUSTOMER GERDAU AÇOS LONDRES S A		DATA / DATE 25.01.2018		PROJETO / PRODUCT BARRAO CURVA		NORMA - SPECIFICATION - QUALIFICATION / NORM - SPECIFICATION - QUALIFICATION / ASTM A36 / 3887007 MR250	
BT/OTA / SIZE	LOTE / HEAT	QTD / QUANT	C	Ms	S	P	Cu	CE	ZE	LR	Aling
1.1/2 X 1/4	4666895003	1.081.000 KG	0,14	0,62	0,14	0,023	0,02	0,03	308	455	28,00
PROPRIEDADE MECANICA / MECHANICAL PROPERTIES Aling - Elongation LE - Limite de escoamento MPa / LE - Yield Strength MPa LR - Limite de Resistência MPa / LR - Tensile Strength MPa			OBSERVAÇÕES / OBSERVATIONS As propriedades físicas, químicas e mecânicas descritas no Certificado de Qualidade são garantidas no estado em que o material é fornecido. Qualquer transformação que o material venha a sofrer em terceiros pode alterar significativamente tais propriedades								
RESPONSÁVEL PELA QUALIDADE QUALITY ASSURANCE  FERNANDO VICTOR DE ENGET CREA 73766/D											

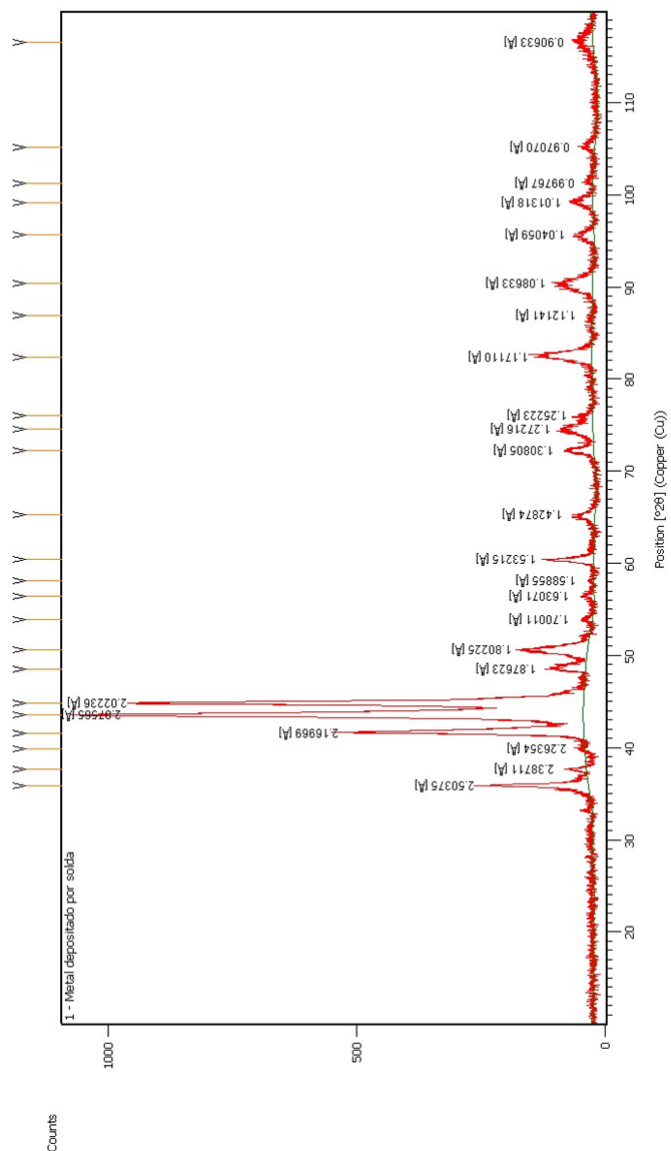
## ANEXO C – Certificado de qualidade da borracha.

 <p><b>PEÇAS EM POLIURETANO E BORRACHA</b></p> <p><b>Avenida João César do Oliveira, 6324</b>  <b>Bairro Beatriz, CEP 32040-000</b>  <b>Contagem MG</b>  <b>C.N.P.J. 01.527.393/0001-59</b>  <b>Telefone (31)3391-5511</b>  <b>FAX (31)3356-6550</b>  <b>comercial@pollyrubber.com.br</b></p>																	
<b><u>CERTIFICADO DE QUALIDADE</u></b>																	
<b>Cliente:</b>	ANDRE LUIS GONCALVES COSTA	<b>Número:</b>	6950/18														
<b>Pedido de Venda:</b>	10698	<b>Emissão:</b>	20/06/2018														
<b>Pedido do Cliente:</b>	EMAIL	<b>OP:</b>	44285														
<b>Material:</b>	RT-LL-83-60																
<b>Descrição:</b>	REVESTIMENTO DE BORRACHA EM RODA																
<b>Dimensional:</b>	Ø 228,6 X 203,2 X 12,7 MM																
<b>Quantidade:</b>	1 PEÇA																
<b>Lote:</b>	23-05(18)																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>CARACTERÍSTICAS</th> <th>RT-LL-83-60</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Dureza (Shore A) Norma NBR 7318</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>Densidade hidrostática (g/cm³) Norma NBR 14737</td> <td>1,207</td> </tr> <tr> <td>Abrasão (mm³) Norma NBR 15190</td> <td>128</td> </tr> <tr> <td>Resistência à rasgo (N/mm) Norma NBR 11911</td> <td>27,74</td> </tr> <tr> <td>Tensão de ruptura (kgf/cm²) Norma NBR 7462</td> <td>60,07</td> </tr> <tr> <td>Alongamento na ruptura (%) Norma NBR 7462</td> <td>545</td> </tr> </tbody> </table>				CARACTERÍSTICAS	RT-LL-83-60	Dureza (Shore A) Norma NBR 7318	60	Densidade hidrostática (g/cm³) Norma NBR 14737	1,207	Abrasão (mm³) Norma NBR 15190	128	Resistência à rasgo (N/mm) Norma NBR 11911	27,74	Tensão de ruptura (kgf/cm²) Norma NBR 7462	60,07	Alongamento na ruptura (%) Norma NBR 7462	545
CARACTERÍSTICAS	RT-LL-83-60																
Dureza (Shore A) Norma NBR 7318	60																
Densidade hidrostática (g/cm³) Norma NBR 14737	1,207																
Abrasão (mm³) Norma NBR 15190	128																
Resistência à rasgo (N/mm) Norma NBR 11911	27,74																
Tensão de ruptura (kgf/cm²) Norma NBR 7462	60,07																
Alongamento na ruptura (%) Norma NBR 7462	545																
<b>Observações:</b>	Concluimos que o composto mencionado está aprovado de acordo com os requisitos de suas respectivas normas e tolerâncias de processo.																
 Químico responsável Lucinéia Antunes CRQ 02101403																	

## ANEXO D – Certificado de qualidade do metal de referência H13.

<b>CERTIFICADO DE QUALIDADE</b> <b>QUALITY CERTIFICATE</b>		CERT. Nº CERTIFICANR 16634	Nº CONTROLE CERTIFICADO/CERTIF. CONTROL NR 16634										
CLIENTE / CUSTOMER ANDRÉ LUIZ GONCALVES COSTA		NOTA FISCAL Nº / INVOICE NR 16634	DATA / DATE 24/09/2018										
IDENTIFICAÇÃO DO MATERIAL / MATERIAL IDENTIFICATION		REFERÊNCIA CLIENTE / CUSTOMER REFERENCE		Nº FICHA / CARD NR. 5680									
03.01.0600 2344 (H13C) - 600X 600		PESO / WEIGHT (KG) 3,63	OS / SERVICE ORDER 1567204										
<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA / CHEMICAL COMPOSITION</b>													
CORRIDANº HEAT NR. 171231	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V	Cu	Co	Ti
	0,390	0,430	1,060	0,015	0,004	5,030	0,000	1,140	0,000	0,830	0,000	0,000	0,000
Fe	Mg	Zn	Zr	Pb	W								
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000								
USINA DE ORIGEM / MEL SUPPLIER		Nº CERTIFICADO / CERTIFICATE NR.											
<b>TRATAMENTO TÉRMICO / HEAT TREATMENT</b>													
CERTIFICADO / CERTIFICATE Nº ITEM	TIPO / TYPE	TAMANHO GRãos / GRAIN SIZE	DUREZA / HARDNESS		EMPRESA / COMPANY								
			225 HB										
<b>ENSAIOS MECÂNICOS / MECHANICAL TESTS</b>													
CERTIFICADO / CERTIFICATE	L.E. / Y8	L.R. T.5	ALONGAMENTO / ELONGATION		ESTRIBIÇÃO / RA								
CERTIFICADO / CERTIFICATE	TEMPERATURE / TEMPERATURA (°C)	QFT (SPECIMEN NUMBER)	QFT (SPECIMEN NUMBER)		QFT (SPECIMEN NUMBER)								
<b>ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS / NON - DESTRUCTIVES TESTS</b>													
ENSAIO / TEST	NORMA DE REFERÊNCIA / STANDARD	NÚMERO DO RELATÓRIO / REPORT NUMBER		RESULTADO / RESULT									
OBSERVAÇÕES / OBSERVATION (18x30x78 - Peso: 3,63)					ASSINATURA / SIGNATURE Claudio Cândido de Araújo CFEA: 14026/6139-9								
<p>Nós certificamos que a informação neste documento é uma reprodução exata do certificado da usina We hereby certify that the information presented in this document is an exact reproduction of the certificate of the steel MII.</p>													

**ANEXO E – Espectro de difração de raio X para o revestimento de metal duro sem a adição de Cr, depositado pelo processo de soldagem FCAW.**



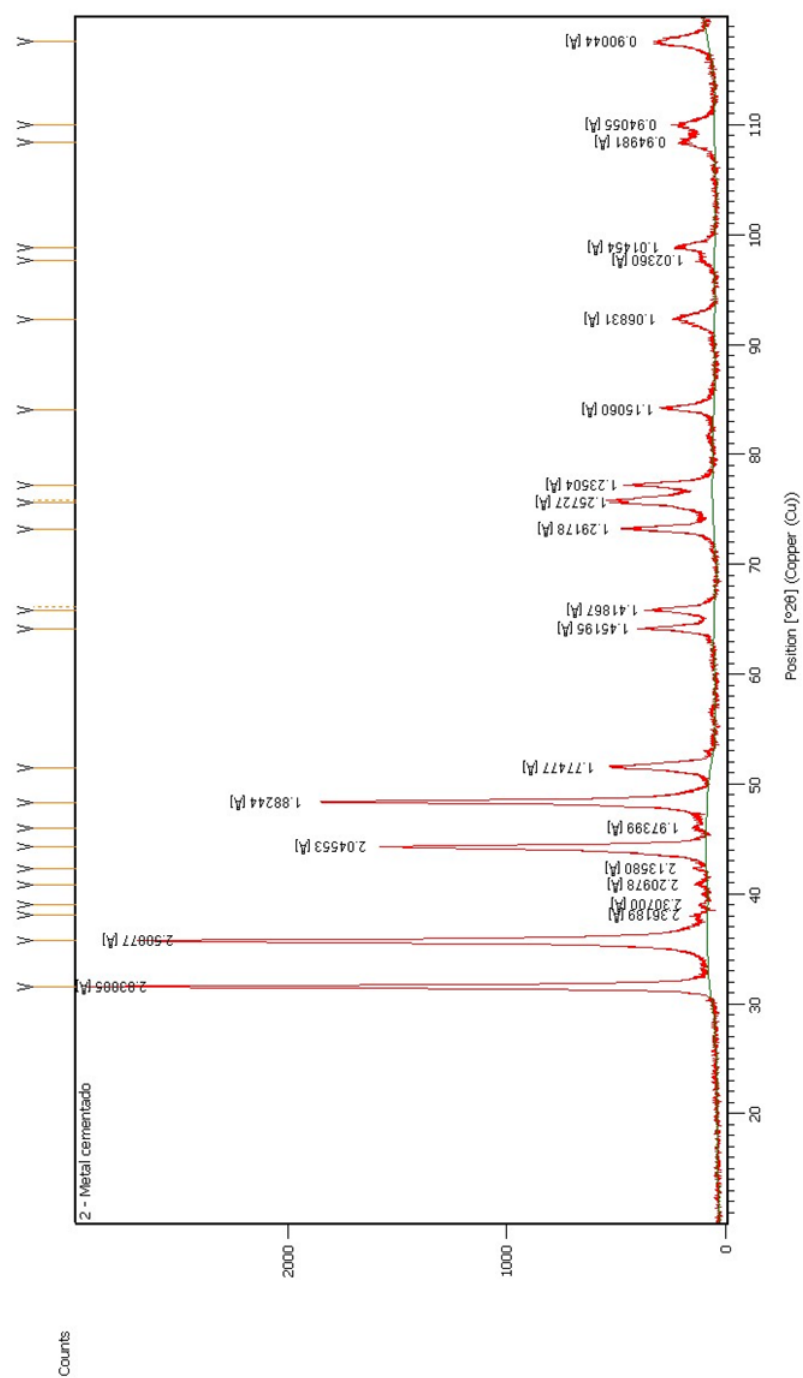
Fonte: Autor

Tabela 1 – Tabela de fases constituintes do revestimento de metal duro sem a adição de Cr, depositado pelo processo de soldagem FCAW, conforme espectro de difração de raio X do revestimento.

Pico	2	(RAD)	n	d	Elemento	Indice de Miller	Intensidade Relativa	
1	36	18	0,314	1,546	2,501	TiC	1 1 1	60
2	38	19	0,332	1,538	2,362	Fe3C	1 1 2	298
3	40	20	0,349	1,512	2,210	Fe3C	2 0 0	251
4	40	20	0,349	1,512	2,210	TiC	2 0 0	80
						VC	2 0 0	999
5	42	21	0,367	1,531	2,136	Fe3C	2 1 0	515
6	43,5	21,75	0,380	1,538	2,076	Martensita	1 1 0	100
7	44	22	0,384	1,515	2,022	Fe3C	0 2 2	495
8	48,5	24,25	0,423	1,541	1,876	Fe3C	2 0 2	22
						Martensita	1 1 1	100
9	51	25,5	0,445	1,552	1,802	FeC	2 0 0	80
						Fe3C	0 2 2	495
10	54	27	0,471	1,544	1,700	Fe3C	0 2 3	129
11	56	28	0,489	1,531	1,631	Fe3C	2 2 1	67
12	58	29	0,506	1,540	1,589	Fe3C	1 3 0	133
13	60	30	0,524	1,532	1,532	NbC	2 2 0	373
14	65	32,5	0,567	1,535	1,429	Martensita	2 0 0	20
15	72	36	0,628	1,538	1,308	TiC	3 1 1	80
						NbC	3 1 1	367
16	74	37	0,646	1,531	1,272	NbC	2 2 2	102
17	76	38	0,663	1,542	1,252	TiC	2 2 2	60
						VC	2 2 2	117
18	82,5	41,25	0,720	1,544	1,171	Martensita	2 1 1	30
19	87	43,5	0,759	1,544	1,121	Fe3C	0 0 6	88
20	90	45	0,785	1,536	1,086	FeC	3 1 1	80
21	96	48	0,838	1,547	1,041	FeC / TiC	2 2 2	50
						TiC	4 0 0	80
22	99	49,5	0,864	1,541	1,013	Martensita	2 2 0	10
23	101	50,5	0,881	1,540	0,998	TiC	3 3 1	60
24	105	52,5	0,916	1,540	0,971	TiC	4 2 0	100
25	117	58,5	1,021	1,546	0,906	Martensita	3 1 0	12

Fonte: Autor

**ANEXO F – Espectro de difração de raio X para o revestimento de metal duro de WC, depositado pelo processo de sinterização.**



Fonte: Autor

Tabela 2 – Tabela de fases constituintes do revestimento de metal duro de WC, depositado pelo processo de sinterização, conforme espectro de difração de raio X do revestimento.

Pico	2	(RAD)	n	d	Elemento	Índice de Miller	Intensidade Relativa	
1	31,5	15,75	0,274889	1,568301	2,88885	WC	0 0 1	80
2	35	17,5	0,305433	1,503992	2,50077	WC	1 0 0	100
3	38	19	0,331613	1,537912	2,36189	Fe3C	0 2 1	298
4	39,5	19,75	0,344703	1,559148	2,30700	Cr3C2	1 1 2	999
5	41	20,5	0,357792	1,547763	2,20978	Fe3C	1 2 0	198
6	42,5	21,25	0,370882	1,549785	2,13800	Ni2W4C	5 1 1	100
7	44	22	0,383972	1,601818	2,04553	Fe3C	2 1 1	515
8	46	23	0,401426	1,598504	1,97399	Fe3C	2 1 1	476
9	48	24	0,418879	1,605788	1,88244	WC	1 0 1	100
10	52	26	0,453786	1,650415	1,77477	Ni2W4C	5 3 1	6
11	64	32	0,558505	1,88097	1,45195	WC	1 1 1	60
12	66	33	0,575959	1,581577	1,41867	WC	1 0 2	40
14	76	38	0,663225	1,746841	1,29178	WC	1 1 1	60
15	77	38,5	0,671952	1,608304	1,25727	WC	1 0 2	40
16	84	42	0,733038	1,682556	1,23504	WC	1 0 2	60
17	92,5	46,25	0,807215	1,784297	1,15060	WC	1 0 5	60
18	99	49,5	0,863938	1,749846	1,06831	Cr3C2	4 1 5	14
19	98	49	0,855211	1,612528	1,02360	WC	1 1 2	60
20	99	49,5	0,863938	1,556703	1,01540	WC	0 0 3	60
21	108	54	0,942478	1,642952	0,94981	WC	0 0 3	60
22	110	55	0,959931	1,556078	0,94055	WC	0 0 3	60
23	117	58,5	1,021018	1,603901	0,90044	FeC	4 0 0	30

Fonte: Autor

**ANEXO G – Tabela de valores típicos de perda de massa, ensaio de  
abrasão com roda de borracha com areia seca, norma ASTM G65-16  
(ASTM, 2016)**

Tabela 3 – Tabela X3.1 referente aos valores típicos de perda de massa, ensaio de  
abrasão com roda de borracha com areia seca, norma ASTM G65-16  
(ASTM, 2016)

H13										
Teste Lab	A	A	B	B	C	C	D	D	E	E
Perda de massa [g]	0.4271	0.4375	0.3385	0.3385	0.4958	0.4362	0.4273	0.3524	0.4772	0.4568
Perda de Volume [mm <sup>3</sup> ]	55.04	56.38	43.62	43.62	63.89	56.21	55.06	45.41	61.49	58.87
Média de Perda de Massa	0.4187				Variância		0.003209			
Desvio de Padrão	0.056649				Variância Populacional		0.002888			

Fonte: Adaptado da norma ASTM G65-16 (ASTM, 2016)