



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE
COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

WESLEY OLIVEIRA DA ROCHA

**Avaliação do Desempenho de Lâminas para Corte de
Vergalhões Revestidas por Soldagem FCAW
Utilizando a liga de FeCrC**

GOIÂNIA
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Wesley Oliveira da Rocha

3. Título do trabalho

Avaliação do Desempenho de Lâminas para Corte de Vergalhões Revestidas por Soldagem FCAW Utilizando a liga FeCrC

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Souza, Professor do Magistério Superior**, em 23/09/2024, às 08:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wesley Oliveira Da Rocha, Discente**, em 23/09/2024, às 09:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4845178** e o código CRC **27D39AEC**.

WESLEY OLIVEIRA DA ROCHA

**Avaliação do Desempenho de Lâminas para Corte de
Vergalhões Revestidas por Soldagem FCAW
Utilizando a liga de FeCrC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de Concentração: Ciências Mecânicas.
Orientador: Prof. Dr. Daniel Souza.
Coorientador: Prof^a. Dr^a. Alice Gonçalves Osorio.

Defesa de mestrado defendida e aprovada em 30 de agosto de 2024, pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. Daniel Souza

Orientador (UFG - Universidade Federal de Goiás)

Prof^a. Dr^a. Alice Gonçalves Osorio

Coorientador (UFPEL - Universidade Federal de Pelotas.)

Membro da banca

Prof. Dr. Kleber Eduardo Bianchi (Escola de Engenharia/FURG)

Membro da banca

Prof. Dr. Kléber Mendes de Figueiredo (UFG - Universidade Federal de Goiás)

GOIÂNIA

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rocha, Wesley Oliveira da
Avaliação do Desempenho de Lâminas para Corte de Vergalhões Revestidas por Soldagem FCAW Utilizando a liga de FeCrC [manuscrito] / Wesley Oliveira da Rocha. - 2024.
LVIII, 58 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Souza; co-orientadora Dra. Alice Gonçalves Osorio.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Goiânia, 2024.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras.

1. FCAW. 2. Revestimento. 3. Liga de FeCrC. 4. Corte Vergalhão.
I. Souza, Daniel, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 6 da sessão de Defesa de Dissertação de **Wesley Oliveira da Rocha**, que confere o título de Mestre(a) em **Engenharia Mecânica**, na área de concentração em **Ciências Mecânicas**.

Aos trinta dias do mês de agosto de dois mil e vinte quatro, a partir da(s) **08h30**, no(a) na sala virtual meet.google.com/xhj-zmtd-wte, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “Efeito do Revestimento por Soldagem na Resistência ao Desgaste no Desempenho de Lâminas para Corte de Vergalhões”. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), Professor(a) Doutor(a) **Daniel Souza (UFG)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor(a) Doutor(a) **Kléber Mendes de Figueiredo (UFG)**, membro titular interno, Professor(a) Doutor(a) **Kleber Eduardo Bianchi (Escola de Engenharia/FURG)**, membro titular externo, e **Profa. Dra. Alice Gonçalves Osorio - Centro de Desenvolvimento Tecnológico/UFPel**, co-orientadora. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho **conforme explicitado abaixo**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta, a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido(a) o(a) candidato(a) **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo(a) Professor(a) Doutor(a) **Daniel Souza**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao(s) **trinta dias do mês de agosto de dois mil e vinte quatro**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Avaliação do Desempenho de Lâminas para Corte de Vergalhões Revestidas por Soldagem FCAW Utilizando a liga FeCrC



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Souza, Professor do Magistério Superior**, em 30/08/2024, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alice Gonçalves Osorio, Usuário Externo**, em 30/08/2024, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kleber Eduardo Bianchi, Usuário Externo**, em 30/08/2024, às 11:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kleber Mendes De Figueiredo, Professor do Magistério Superior**, em 30/08/2024, às 11:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4633524** e o código CRC **F09BAB6E**.

Referência: Processo nº 23070.028691/2024-63

SEI nº 4633524

*Dedico este trabalho à minha família,
minha esposa, Lorena Rocha, e meus filhos, Isabely Rocha e Enzo Rocha.*

AGRADECIMENTOS

Fica aqui meus sinceros agradecimentos aos professores que empenharam para realização desta conquista, pois, nada disso seria possível de realizar. Agradeço Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pela bolsa de Mestrado do programa 001/2022 concedida durante o curso.

Sempre o homem buscou a utilização de determinada técnica para o seu desenvolvimento, ou que auxiliasse nas tarefas do dia a dia para facilitar sua vida, como também, agilizando-a. Essas buscas, às vezes, incessantes e árduas para compreender determinados fenômenos e técnicas, geram conhecimento que é transferido aos grupos mais próximos, como no desenvolvimento de uma nova técnica de produção individual ou coletiva. Conhecimento difundido com base sustentável, e embasado em princípios físicos e éticos ao longo dos tempos; com isto construindo novos pilares para o desenvolvimento do saber científico da humanidade. O compartilhamento desses conhecimentos é importante para não chegar e partir sempre do mesmo ponto em suas descobertas. É claro, dando importância, uma mesma pesquisa pode habitar grau de resultado distinto, essa diferença que gera pilares sustentáveis para perpetuação do saber científico e confronto entre ideias.

RESUMO

Este trabalho é uma pesquisa aplicada, ou prática, de um problema real na indústria do seguimento metalúrgico que corta vergalhões para usar em estruturas metálicas para construção civil. Essa empresa utiliza facas ou lâminas para cortar barras de vergalhões para produção de estrutura como vigas, treliças, colunas, entre outros. Essas facas trabalham com carregamento dinâmico quando cisalham o material, o que proporcionando deterioração de sua superfície ao longo do tempo de trabalho. Essa deterioração pode ter ocorrido por fatores como atrito, abrasão e fadiga. A recuperação das facas de corte de vergalhões é necessária, pois, com o uso constante, há ocorrência de falhas severas no momento que estão sendo utilizadas, pode ocorrer perda de materiais que afeta a qualidade dos cortes, risco de acidentes e baixa produtividade. Visando recuperar as facas devido ao desgaste, para reduzir custo do processo e uma durabilidade maior no ciclo de trabalho, foi feito revestimento pelo processo de soldagem FCAW com consumível a base de ferro, cromo e carbono. O consumível apresenta boas propriedades mecânicas e características como resistência abrasiva e dureza elevada devido a formação em suas microestruturas de carbonetos. A metodologia consistiu em realizar ensaios em facas revestidas com uma e duas camadas de revestimento sobre o material originalmente utilizada pela empresa e sobre um aço carbono comum. Também foram feitos os testes em uma faca nova da empresa. A escolha dos parâmetros para o revestimento foi por análise dos cordões de solda, levando em consideração sua largura e penetração, bem como a diluição. Os testes de corte foram realizados utilizando-se como critério de parada, aproximadamente 1.000 cortes ou o colapso da faca. Os resultados mostraram que a faca nova, sem revestimento, apresentou melhor desempenho do que as facas revestidas. Dentre as facas revestidas a que apresentou melhor desempenho foi com um camada sobre o substrato do aço VC-131. Todas as amostras de revestimento apresentaram, em suas microestruturas, carbonetos primários (Cr_7C_3) em forma de bastão e hexagonal.

Palavras-chaves: FCAW; Revestimento duro; Liga de FeCrC; Corte de vergalhão.

ABSTRACT

This work is an applied or practical research of a real problem in the metallurgical industry segment that cuts rebar for use in metal structures for civil construction. This company uses knives or blades to cut rebar bars for the production of structures such as beams, trusses, columns, among others. These knives operate under dynamic loading when shearing the material, which leads to the deterioration of their surface over time. This deterioration may occur due to factors such as friction, abrasion, and fatigue. The recovery of rebar cutting knives is necessary because, with constant use, severe failures can occur during operation, leading to material loss that affects the quality of cuts, accident risks, and low productivity. To restore the knives due to wear, reduce process costs, and achieve longer durability in the work cycle, a coating was applied using the FCAW welding process with a consumable based on iron, chromium, and carbon. The consumable has good mechanical properties and features such as abrasive resistance and high hardness due to the formation of carbides in its microstructures. The methodology consisted of conducting tests on knives coated with one and two layers of coating on the material originally used by the company and on common carbon steel. Tests were also carried out on a new knife from the company. The parameters for the coating were chosen by analyzing the weld beads, considering their width and penetration, as well as dilution. The cutting tests were conducted using approximately 1,000 cuts or knife failure as the stopping criterion. The results showed that the new knife, without coating, performed better than the coated knives. Among the coated knives, the one that showed the best performance had a single layer on the VC-131 steel substrate. All coating samples presented primary carbides (Cr_7C_3) in their microstructures in rod and hexagonal shapes.

Keywords: FCAW; Hardfacing; FeCrC alloy; Cut rebar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Quantidade de artigos em anos na plataforma Google Acadêmico	4
Figura 2.2 – Pesquisa relacionado aos temas nas plataformas	5
Figura 2.3 – Pesquisa relacionada a quantidade de artigos por anos nas plataformas Scielo, Scopus e ScienceDirect com as palavras chaves "Hardfacing + FCAW"	5
Figura 2.4 – Artigos baixados referente as repetições nas plataformas SciELO, Scopus, Engineering Village e ScienceDirect	6
Figura 2.5 – Eixo sem fim do moedor recuperado pelo processo de soldagem	7
Figura 2.6 – Em A) - observa-se as cavidades na linha de fusão do revestimento, B) - trincas e C) - porosidades nos cordões de soldas	8
Figura 2.7 – Microestrutura dos revestimentos: (a) FCAW e (b) SMAW	10
Figura 2.8 – Módulo de elasticidade e dureza das duas camadas em relação a variação de temperatura do revestimento	10
Figura 2.9 – Peças recuperadas por soldagem: a) Lâmina escavadeira, b) Eixo, c) Roda e d) Mesa para forjamento	11
Figura 2.10–DRX em relação ao número de camadas (1, 2 e 3 camadas) para quatro tipos diferentes de eletrodo	12
Figura 2.11–Gráfico comparativo entre dureza das camadas	13
Figura 2.12–Microestrutura seção transversal, a) amostra O1 (uma camada) e b) amostra O2 (duas camadas)	15
Figura 2.13–Resultados dos testes de dureza em relação ao número de camadas, O1 (uma camada) e O2 (duas camadas)	15
Figura 2.14–Dureza das amostras e perda de massa com relação ao número de camadas do revestimento a base de FeCrC+Ti (AC1 - 1 camada, AC2 - 2 camadas, AC4 - 4 camadas)	16
Figura 2.15–Microscopia ótica da microestrutura do revestimento duro a base da liga de FeCrC+Ti	17
Figura 2.16–Perda de massa nos testes abrasivos em relação ao número de camadas, O1 e A1 com uma camada, O2 e A2 com duas camadas	17
Figura 2.17–Áreas onde os testes foram feitos nas amostras	18
Figura 2.18–A figura mostra difratogramas das fases presentes nos testes realizados em A1 e A2	19
Figura 2.19–Resultado de dureza em relação ao número de camadas das amostras, A1 - 1 camada e A2 - 2 camadas	19
Figura 2.20–Perda de massa com camada simples e camadas de soldas em relação aos diferentes processos	20

Figura 2.21–Gráfico comparativo da resistência a corrosão do revestimento a base de FeCrC com as seguintes porcentagem em peso dos carbonos: a) 3,736, b) 4,21 e c) 4,85	21
Figura 2.22–Microestrutura hipereutética com revestimento de FeCrC com % em peso do C: a) 3,37, b) 4,21 e c)4,85	22
Figura 2.23–Análise comparativo da resistência ao desgaste por consumível realizado com roda de borracha em laboratório	23
Figura 2.24–Resistência ao desgaste médio por consumível realizado em campo . . .	23
Figura 2.25–Formação das microestruturas do revestimento duro com diferente adição de nióbio em peso, a) 0%, b) 6%, c) 12%, d) 18%, e) 24%	24
Figura 2.26–Efeito do nióbio na dureza e desgaste do revestimento	25
Figura 2.27–Difratograma do revestimento	26
Figura 2.28–Revestimento com adição de simultânea em peso, a) 0%Fe-Nb e 0 %Fe-Ti, b) 18%Fe-Nb e 6%Fe-Ti, c) 12%Fe-Nb e 12%Fe-Ti, d) 6%Fe-Nb e 18%Fe-Ti	27
Figura 2.29–Gráfico comparativo da dureza e teste de abrasão com adição de Fe-Nb e Fe-Ti	28
Figura 2.30–Microestrutura dos revestimentos feitos com as condições: (a) FeCrC-FeCrC, (b) FeCrC-FeCrC com amanteigamento, (c) FeCrC-FeCrC+Ti, (d) FeCrC+Ti-FeCrC+Ti, (e) FeCrC+Nb-FeCrC+Nb, (f) FeCrC+Nb-FeCrC+Nb com amanteigamento, (g) FeCrC-FeCrC+Ti, (h) FeCrC-FeCrC+Ti com amanteigamento, (i) FeCrC-FeCrC+Nb (j) FeCrC-FeCrC+Nb com amanteigamento, (l) FeCrC+Ti-FeCrC+Nb e (m) FeCrC+Ti-FeCrC+Nb com amanteigamento	30
Figura 2.31–Micrografia SEM da microestrutura do composito depositado por FCAW, os pontos indicam o local da melhor performance da análise	31
Figura 2.32–Distribuição da microdureza no revestimento duro	31
Figura 2.33–Formação da estrutura do NbC e (Nb,M)C e dureza teórica dos carbonetos	32
Figura 2.34–Diagrama de fase da formação do VC com relação ao teor do V em %p, a) com 0,8% de V e b) 1,0% de V	32
Figura 2.35–Trincas na superfície da solda	33
Figura 2.36–Microestrutura do revestimento duro	34
Figura 2.37–Resistência abrasiva e dureza do revestimento duro na liga a base de Fe	34
Figura 2.38–Resultado com líquido penetrante nas trincas com revestimento de 1 e 2 camadas com FeCrC ou FeCrC +Nb	35
Figura 2.39–Micrografia via MEV de ambas ligas, a) FeCrC e b) FeCrC+Nb	36
Figura 2.40–Microestrutura do revestimento FeCrC 50°C com MEV, b) EDS das regiões M_7C_3 para 50°C, c) microestrutura do revestimento FeCrC 200°C com MEV, d) EDS das regiões M_7C_3 200°C	37

Figura 2.41–Perda de massa (mg) dos revestimentos em relação a energia de soldagem, A - Alta energia de solagem e B - Baixa energia de solda	38
Figura 2.42–Testes feitos para velocidade de 3 mm/s com dois tipos diferentes de potência, L para 5,0 kW e H para 10,5 kW	38
Figura 2.43–Comparativo entre penetração, largura e reforço em relação a potência, L para 5,0 kW e H para 10,5 kW	39
Figura 2.44–Média de dureza versus diluição dos cordões de soldas	40
Figura 2.45–Média de dureza versus perda de massa dos cordões de soldas	40
Figura 2.46–Comparativo entre penetração, largura e reforço em relação a velocidade da soldagem de 3, 5, 7 e 10 mm/s	40
Figura 2.47–Revestimento com FeCrC das amostras C1, C2, C3 e C4	42
Figura 2.48–Microestrutura formada no revestimento com diferente taxa de Cr/C, em a) seção transversal horizontal superior da amostra A, b) seção trans- versal horizontal superior da amostra B, c) seção transversal horizontal superior da amostra C, d) seção transversal na vertical da amostra A, e) seção transversal na vertical da amostra B e e) seção transversal na vertical da amostra C	44
Figura 2.49–Microdureza dos revestimentos das amostras A, B e C com diferentes razões de Cr/C	44
Figura 2.50–Efeito da fração superficial do carboneto na resistência ao desgaste do revestimento duro	45
Figura 2.51–Micrografia SEM realizada na estrutura hipereutética no revestimento de FeCrC	46
Figura 2.52–Em a) Volume fracionado dos carbonetos M_7C_3 e b) diluição (%) em relação a microdureza das amostras C1, C2, C3 e C4	47
Figura 2.53–Microestrutura do depósito do revestimento duro	48
Figura 3.1 – a) Mecanismo de tração e endireitamento das barras de vergalhões, b) Faca em repouso e c) Faca atuando no corte	49
Figura 3.2 – Parte das facas que sofre desgaste com o tempo de uso (linhas brancas) e os cortes realizado no vergalhão	50
Figura 3.3 – Chapa base para os testes de parametrização da solda	52
Figura 3.4 – Manipulador robótico Yaskawa Motoman HP20 e fonte IMC DIGIPlus A7	52
Figura 3.5 – Ilustração do processo de soldagem FCAW	53
Figura 3.6 – Distância Bico Contato à Peça - DBCP	53
Figura 3.7 – Cortes realizado no cordão de solda das amostras, com realização dos testes na seção 1, 2 ou 3 e 4	54
Figura 3.8 – Representação esquemática do desenho do cordão solda e suas medidas	54
Figura 3.9 – Modelos de cálculo das medidas do cordão de solda realizado pelo software ImageJ	55

Figura 3.10–Ensaio de dureza das camadas de soldas	56
Figura 3.11–Desgastes abrasivos das facas em contato com o vergalhão	56
Figura 3.12–Medidas originais	57
Figura 3.13–Projeto do suporte para fixação das facas	57
Figura 3.14–Linha de corte na peça para análise microestrutural (a-b)	58
Figura 4.1 – Defeitos apresentados em alguns cordões de soldas, como porosidade e baixa penetração	59
Figura 4.2 – Seção transversal dos cordões de solda selecionados para parametrização	60
Figura 4.3 – Representação de um cordão de solda com IC maior que 0,46 com pouca penetração do cordão de solda e região de concentração de tensão . . .	61
Figura 4.4 – Média de dureza HV10 em função das camadas Tab. 4.2	63
Figura 4.5 – Facas prontas para revestimento por soldagem, com os materiais VC-131 e aço carbono comum, o revestimento foi aplicado no local que teve a retífica plana do substrato do VC-131	64
Figura 4.6 – Início do revestimento da faca com material base o aço comum e modelo pronto para os testes de cortes	65
Figura 4.7 – Média de dureza apresentada nas facas após uso	66
Figura 4.8 – A figura mostra a região das facas afetada pelo corte	68
Figura 4.9 – Região de corte das facas após os testes realizados	69
Figura 4.10–Faca-o sem revestimento por soldagem após uso	70
Figura 4.11–Metalografia da região de corte da Faca-o com reagente Nital 5% . . .	71
Figura 4.12–Metalografia da região de corte da Faca-1, com uma camada de re- vestimento no substrato do aço carbono comum com reagente Nital 5%	72
Figura 4.13–Metalografia do revestimento da Faca-1 na região de corte com reagente Nital 5%	72
Figura 4.14–Defeito no revestimento da Faca-2, porosidade e trincas de solidificação	73
Figura 4.15–Microestrutura da Faca-2 na região de corte com reagente Nital 5% . .	74
Figura 4.16–Microestrutura da Faca-2 na região que não apresentou desgaste com reagente Nital 5%	74
Figura 4.17–Corte transversal da Faca-3	75
Figura 4.18–Microestrutura do revestimento da Faca-3 com reagente Nital 5% . . .	76
Figura 4.19–Micrografia apresenta as trincas da Faca-4 com reagente Nital 5% . . .	77
Figura 4.20–Micrografica da região afetada pelos cortes da Faca-4 com reagente Nital 5%	77
Figura 4.21–Comparação de trincas entre as facas	79
Figura 4.22–Microestrutura das facas de cortes, a) Faca-1, b) Faca-2, c) Faca-3 e d) Faca-4	81

Figura A.1 – Teste da soldagem realizado nas chapas de aço para parametrização da
solda. 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparativo entre os processos de soldagem a arco	8
Tabela 2.2 – Resultados dos testes de dureza realizados para 4 diferentes tipos de procedimentos, observa-se menor perda de massa para o processo FCAW	9
Tabela 2.3 – Valores da microdureza HV 0,1 para quatro processos diferentes	11
Tabela 2.4 – Composição química do arame empregado para fazer o revestimento por FCAW e SMAW em 1 e 3 camadas	14
Tabela 2.5 – Resultado dos testes de dureza em relação ao número de camadas . . .	14
Tabela 2.6 – Parâmetro de soldagem em relação ao número de camadas - O1 (uma camada) e O2 (duas camadas)	14
Tabela 2.7 – Composição química de cada amostra % em peso em relação ao número de camadas - O1 (uma camada) e O2 (duas camadas), balanceado com Fe	15
Tabela 2.8 – Números de fases em % em relação ao número de camadas, O1 (uma camada) e O2 (duas camadas)	15
Tabela 2.9 – Composição química do revestimento duro % em peso	18
Tabela 2.10 – Composição química usado no revestimento duro, F - carboneto primário, D - tamanho do carboneto primário e N quantidade de carbonetos primários por área	21
Tabela 2.11 – Composição química do revestimento duro, % em peso	24
Tabela 2.12 – Composição química das ligas do revestimento duro (% em massa) . .	25
Tabela 2.13 – Características apresentadas nos resultados do revestimento duro . . .	26
Tabela 2.14 – Composição química dos eletrodos usados nos revestimentos	29
Tabela 2.15 – Composição química material de solda	33
Tabela 2.16 – Composição química do eletrodo para revestimento duro	35
Tabela 2.17 – Parâmetro aplicado nos cordões de solda	39
Tabela 2.18 – Parâmetro usado na soldagem	42
Tabela 2.19 – Composição química dos elementos de ligas	42
Tabela 2.20 – Composição química do revestimento de MMC reforçada com partículas	43
Tabela 2.21 – Composição química do metal de solda % em peso	46
Tabela 3.1 – Comparativo da composição química dos aços D6 e VC-131	50
Tabela 3.2 – Propriedade do aço ferramenta D6	51
Tabela 3.3 – Dados químicos, características e parâmetros do arame usado na soldagem	51
Tabela 4.1 – Medidas médias dos cordões de soldas das amostras	61
Tabela 4.2 – Dados estatísticos de dureza HV10	62
Tabela 4.3 – Valores do ensaio de dureza na Faca-o	64

Tabela 4.4 – Quantidades de cortes feitos pelas facas, Faca-1 (base do aço comum com uma camada), Faca-2 (base do aço comum com duas camadas), Faca-3 (base do VC-131 com uma camada), Faca-4 (base do VC-131 com duas camadas) e Faca-o (faca original)	67
Tabela 4.5 – Resumo dos resultados encontrados (NA - Não apresentou)	78
Tabela B.1 – Dados para parametrização dos cordões de soldas (DBCP - distância do bico contra peça, U - tensão, V_{alim} - velocidade de alimentação, U_{med} - tensão média, I_{med} - corrente média e I_{RMS} - corrente RMS ou eficaz. .	89

LISTA DE SÍMBOLOS

W	Tungstênio
V	Vanádio
Si	Silício
Mn	Manganês
Nb	Nióbio
Ti	Titânio
V	Vanádio
Cr	Cromo
C	Carbono
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
FCAW	Flux-Cored Arc Welding
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
SAW	Submerged Arc Welding
VC-131	Aço ferramenta
Faca-1	Faca com uma camada de revestimento no substrato aço carbono comum
Faca-2	Faca com duas camadas de revestimento no substrato aço carbono comum
Faca-3	Faca com uma camada de revestimento no substrato aço ferramenta VC-131
Faca-4	Faca com duas camadas de revestimento no substrato aço ferramenta VC-131
IA	Inteligência Artificial
AW	Soldagem a Arco
B	Brasagem

SSW	Soldagem por Estado Sólido
OFW	Soldagem Gás Combustível
CO_2	Dióxido de carbono
Ar	Argônio
D_a	Diâmetro do arame eletrodo
I	Corrente elétrica
U	Tensão
v_a	Velocidade de alimentação
v_s	Velocidade de soldagem
E	Energia de soldagem
DBCP	Distância bico de contato a peça
D	Área de diluição
IC	Índice de convexidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Revisão bibliográfica sistemática	4
2.2	Revestimento duro por soldagem	6
2.3	Fatores do processo de soldagem para o revestimento duro . .	8
2.3.1	Influência do processo de soldagem	9
2.3.2	Influência do número de camadas no revestimento	11
2.3.3	Influência dos elementos químicos	20
2.3.4	Influência dos parâmetros	37
2.3.5	Influência da microestrutura no revestimento	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Materiais e Equipamentos	49
3.1.1	Máquina de corte	49
3.1.2	Facas	49
3.1.3	Material de adição	51
3.1.4	Metal base para os testes de parametrização efetuados nas amostras	51
3.1.5	Equipamentos utilizados para soldagem	52
3.2	Metodologia	53
3.2.1	Testes preliminares	53
3.2.2	Ensaio de dureza Vickers na faca de corte	53
3.2.3	Medições dos cordões de solda	54
3.2.4	Dureza em relação ao número de camadas da soldagem	55
3.2.5	Preparação das facas para o revestimento	56
3.2.6	Critério para fim de vida das facas e contagem dos cortes . .	58
3.2.7	Preparação das facas para análise metalográfica	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	Testes preliminares	59
4.1.1	Resultados das medições dos cordões de solda	60
4.1.2	Dureza em relação ao número de camadas	62
4.2	Caracterização das facas	64
4.3	Revestimento das facas	64
4.3.1	Ensaios de dureza dos revestimentos após testes	66

4.4	Ensaio de corte	66
4.4.1	Estrutura das facas após os cortes	67
4.5	Microestrutura do revestimento	69
5	CONCLUSÃO	82
6	TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICES	87
	APÊNDICE A – TESTES PARA PARAMETRIZAÇÃO	88
	APÊNDICE B – RESULTADO DOS TESTES DA PARAMETRIZAÇÃO	89

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de manufatura são empregados vários tipos de facas para cortar materiais, conforme suas finalidades e tipos. O uso contínuo destas facas pode alterar seu desempenho ou funcionalidade, devido, em grande parte, ao desgaste por impacto, fadiga ou falhas prematuras. A indústria, que utiliza essas facas para cortar barras de vergalhões, atende às necessidades das empresas da construção civil com corte de barras de diferentes tamanhos e espessuras, oferecendo outras variedades de produtos como fabricação de colunas, sapatas, vigas, armações, treliças e estacas. Esses produtos são essenciais para proporcionar resistência às estruturas como fundações, pilares, lajes e outras partes de edifícios e obras de engenharia. As barras são em aço com estrias ou ranhuras que melhora a aderência ao concreto e são classificadas por um sistema de numeração que indica seu diâmetro e resistência à tração.

A presente investigação é sobre o desempenho do revestimento realizado em facas utilizadas para cortar barras de vergalhões. Esse revestimento é feito por soldagem, sendo aplicado por camada de material resistente ao desgaste sobre a superfície sujeita à solicitação. O revestimento por soldagem é uma técnica utilizada para melhorar a superfície de um material, tipicamente aumentando a resistência ao desgaste e/ou corrosão. Essa técnica que envolve a deposição do material de revestimento resistente sobre a superfície do componente por meio do processo de soldagem foi feita em facas usadas para cortar barras de vergalhões que sofrem constantes desgastes, com isto, gerando perda de massa na estrutura, perdendo, assim, sua funcionalidade e aumentando custo adicional no final da produção.

A recuperação foi feita com coberturas protetoras por soldagem, revestimento duro ou anti-desgaste. Para esse tipo de proteção com cobertura por soldagem consegue obter excelentes propriedades mecânicas utilizando materiais de adição que têm como base os elementos Fe, Cr e C. Como são formadores de carbonetos, proporcionam as qualidades desejadas e têm maior resistência ao desgaste, devido à alta dureza do material depositado. Outros elementos também podem ser adicionados ao material de adição como tungstênio (W), vanádio (V), silício (Si), manganês (Mn), nióbio (Nb) e titânio (Ti).

A aplicação do revestimento pode ser realizado por diversos processos (ou métodos de aplicação) e consumíveis, sendo alguns como soldagem a arco elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW - Shielded Metal Arc Welding), soldagem por Eletrodo Tubular (FCAW - Flux-Cored Arc Welding), soldagem por MIG/MAG (Metal Inert Gas/ Metal Active Gas) e Arco Submerso (SAW - Submerged Arc Welding). Cada método pode apresentar vantagens e desvantagens. A escolha do método ideal depende do tipo de desgaste que o componente sofra e das condições de operação do equipamento.

Para este estudo, a aplicação do revestimento por soldagem foi feita pelo processo FCAW com os mesmos parâmetros (tensão, corrente e DBCP - Distância Bico Contato a Peça) em quatro peças de facas picotadoras (facas que são usadas no corte de vergalhões). Na primeira faca, foi aplicada uma camada de solda sobre substrato do aço carbono comum (Faca-1). Na segunda, foram aplicadas duas camadas de solda sobre o substrato do aço comum (Faca-2). Na terceira, foi aplicada uma camada de solda sobre o substrato do aço VC-131 (Faca-3). Na quarta, foram aplicadas duas camadas de solda sobre o substrato do aço VC-131 (Faca-4). As facas Faca-3 e Faca-4 são facas de reúso que passaram pelo processo de remoção de materiais para poderem ser revestidas com uma e duas camadas, respectivamente. As quatro facas serão retificadas após a soldagem para terem as dimensões da faca original (Faca-o), faca com material aço ferramenta VC-131 sem revestimento.

Estudar este tipo de revestimento com arame a base de FeCrC é importante para conhecer sua capacidade de substituir o material empregado nas facas de corte quando tiver uma avaria, podendo proporcionar economia e alta qualidade para ser implementado na linha de produção da indústria, porque as facas desgastadas ou danificadas podem levar a corte de baixa qualidade, aumento do consumo de energia e risco de acidente. É importante compreender as interfaces entre o material base e a camada de deposição feita pelo processo de soldagem, que são áreas críticas e podem influenciar a aderência do revestimento, bem como a transmissão de tensões entre as camadas. Essas camadas mal unidas podem ocorrer remoção do cordão de solda em forma de escama ou delaminação, conseqüentemente afetando a integridade do revestimento e devem ser minimizadas. Em alguns casos, podem surgir microtrincas ou porosidade na microestrutura do revestimento, especialmente se o processo de deposição não for controlado adequadamente. Esses defeitos podem reduzir a resistência mecânica e a vida útil do revestimento. A análise da microestrutura do revestimento duro foi realizada por meio de técnicas metalográficas.

As análises ajudam a entender a qualidade do revestimento, identificar possíveis defeitos e otimizar os parâmetros de soldagem para alcançar as propriedades desejadas. Podem ter uma importância futura na escolha do material adequado para esse tipo de recuperação em peças desgastadas, como um aumento no ciclo de vida operacional dos componentes e se é satisfatório esse processo.

Devido a isso, o objetivo deste trabalho é usar essa técnica de revestimento pelo processo de soldagem, e avaliar sua resistência ao desgaste, quando aplicada às facas já desgastadas em serviço para reutilizá-las novamente, prolongando a vida útil e reduzindo a necessidade de substituição frequentemente. Especificamente, foi realizada a parametrização do processo de soldagem para realização dos revestimentos, avaliação da influência do substrato, número de camadas e caracterização do revestimento.

A dissertação está dividida em Revisão Bibliográfica, Materiais, Métodos, Resultado e Discussão e Conclusão. Em Revisão Bibliográfica, envolve a análise sistemática como

tipo de pesquisa, plataformas pesquisadas, palavras chaves usadas, entre outros, bem como o que foi estudado sobre o tema do trabalho, como conceitos, teorias, métodos e resultados de pesquisa anteriores. Materiais e Métodos, essa parte descreve detalhadamente como a pesquisa foi conduzida, como os materiais foram utilizados, as técnicas e procedimentos aplicados, parâmetros e as condições experimentais. Resultados e Discussão, nesta seção é apresentado os dados coletados durante a pesquisa e interpretação dos resultados apresentados, comparando-os com as descobertas de outros estudos abordados na revisão bibliográfica. Em conclusão, resume as principais descobertas da pesquisa e responde aos objetivos inicialmente propostos, enfatizando a relevância dos resultados nas aplicações práticas.

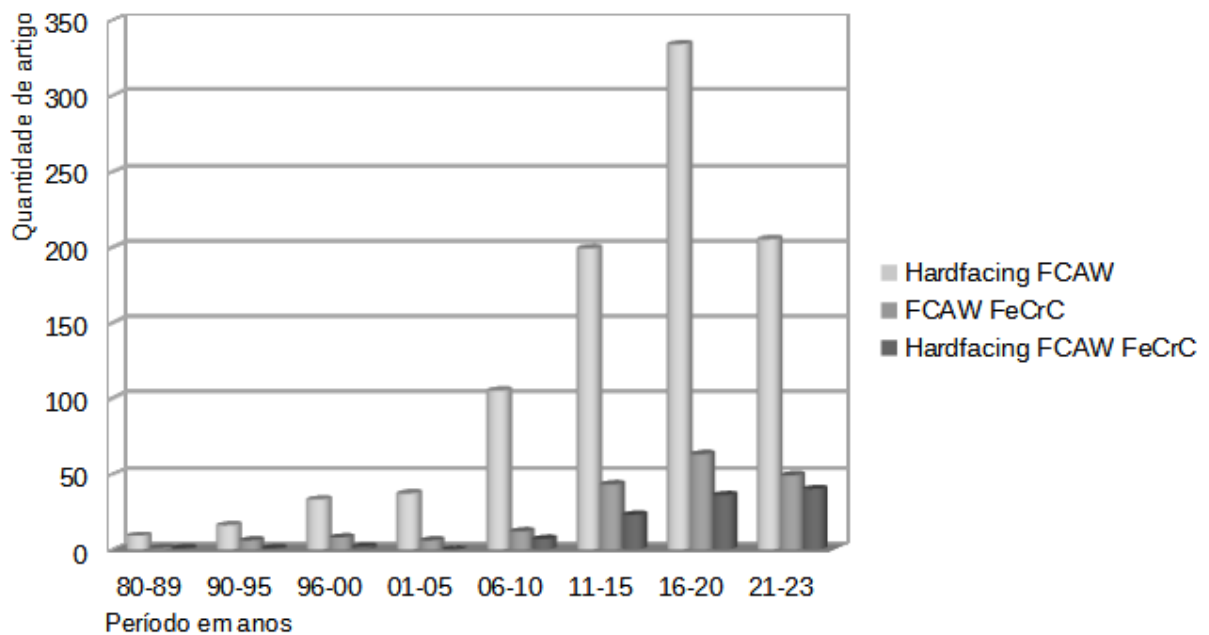
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Revisão bibliográfica sistemática

A revisão sistemática busca identificar, avaliar e sintetizar a literatura disponível nas plataformas *on-lines* sobre o assunto do presente trabalho. Um processo importante para coletar e analisar a literatura existente relacionada a um tópico específico, bem como, observar o desenvolvimento do tema por períodos específicos.

Foi feito uma coleta dos artigos por ano de publicação com as palavras chaves (ou filtros) "*Hardfacing + FCAW*", "*FeCrC + FCAW*" e "*Hardfacing + FCAW + FeCrC*" com objetivo de observar a evolução do tema nas plataformas em período específico e o crescimento desse tema, como apresentado no gráfico da Fig. 2.1.

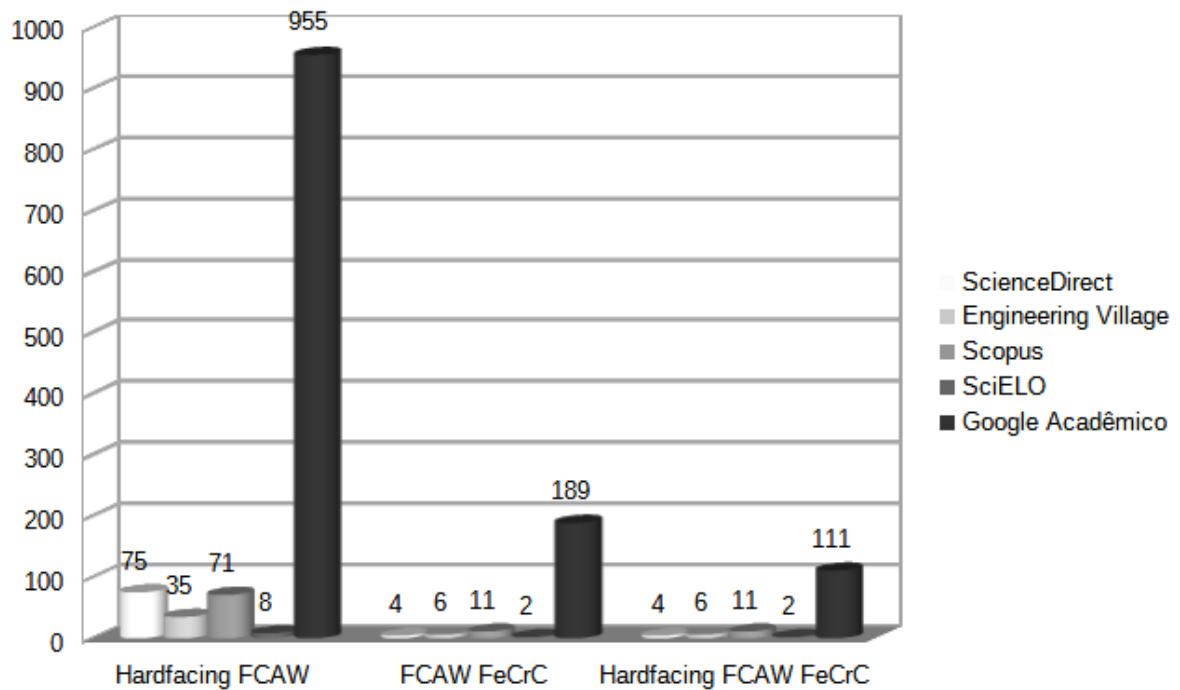
Figura 2.1: Quantidade de artigos em anos na plataforma Google Acadêmico



Fonte: produzida pelo autor

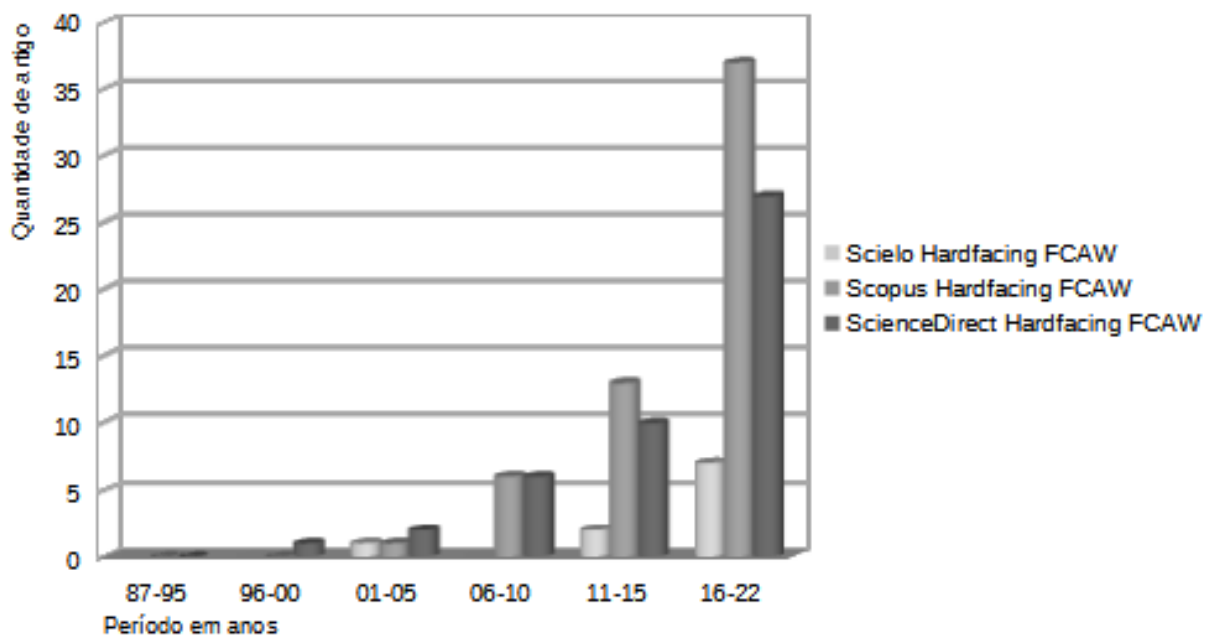
A utilização das bases de dados com as palavras chaves mencionadas, teve como resposta em número de artigos os dados apresentados pelo gráfico da Fig. 2.2. A Fig. 2.3 mostra a pesquisa em período por ano com as palavras chaves "*Hardfacing + FCAW*" nas seguintes plataformas SciELO, Scopus, Engineering Village e ScienceDirect.

Figura 2.2: Pesquisa relacionado aos temas nas plataformas



Fonte: produzida pelo autor

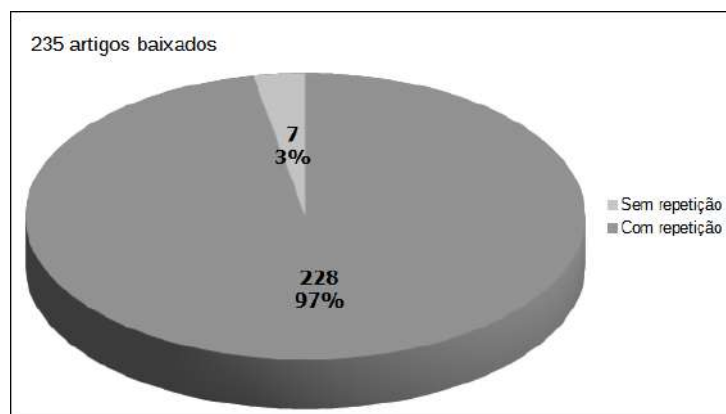
Figura 2.3: Pesquisa relacionada a quantidade de artigos por anos nas plataformas Scielo, Scopus e ScienceDirect com as palavras chaves "Hardfacing + FCAW"



Fonte: produzida pelo autor

Após as coletas dos dados nas plataformas SciELO, Scopus, Engineering Village e ScienceDirect com as palavras chaves específicas, totalizaram 235 artigos, sendo 228 com repetições, cerca de 97%, como apresentado pela Fig. 2.4. Isso ocorre pela otimização de busca oferecida pelas plataformas em seus servidores com cruzamento de dados por meio da Inteligência Artificial (IA).

Figura 2.4: Artigos baixados referente as repetições nas plataformas SciELO, Scopus, Engineering Village e ScienceDirect



Fonte: produzida pelo autor

As combinações de palavras chaves como "*hardfacing + rebar + cutting + knives*" e "*rebar + cutting + machine + wear + resistance + hardfacing*" foram usadas nas plataformas para ampliar as buscas, mas a pesquisa não retornou resultados referentes a esses tópicos específicos.

Com interesse de contar o número de vezes que um artigo específico foi mencionado em plataformas digitais como sites, redes sociais ou fóruns, foram utilizados no Google Alerts os títulos "*hardfacing + rebar + cutting + knives*" e "*rebar + cutting + machine + wear + resistance + hardfacing*" para monitoramento da rede em buscar desses assuntos em qualquer idioma e lugar, porém não apresentou resultado na consulta relacionado a faca de cortar vergalhões. Há trabalhos relacionados ao revestimento por FeCrC e correlatos, porém o assunto sobre revestimento em facas de cortar vergalhões não foi encontrado nada a respeito na literatura existente até o momento. Por isso, vale a pena o estudo por ser uma pesquisa original que pretende preencher essa lacuna com coletas de dados, condução de experimentos e estudo de caso.

2.2 Revestimento duro por soldagem

O revestimento duro por soldagem é um processo de deposição de materiais com objetivo de aumentar a resistência ao desgaste. Esse aumento da resistência aos desgastes por preenchimento é realizado com um material de alta dureza sobre material de menor

dureza com objetivo de recuperar e/ou melhorar as características físicas e propriedades mecânicas da superfície do material degradado.

Existem diferentes tipos de tecnologia para aplicar o revestimento duro com características e requisitos específicos de resistência ao desgaste, corrosão, atrito e entre outras condições ambientais. Alguns processos como Eletrodo Revestido (SMAW), soldagem por Arame Tubular (FCAW), soldagem por MIG/MAG e Arco Submerso (SAW) podem ser realizados para fazer o revestimento duro - *hardfacing* ou *cladding*. Existem outras fontes como Plasma (PAW) (BOURITHIS; PAPANITRIOU, 2009) e feixes a Laser (PANTELIS; MICHAUD; FREITAS, 1993) .

A recuperação, geralmente, é de elementos de máquina que trabalham em ambientes severos com ocorrência de falhas por fadiga que reduzem o tempo de vida dos equipamentos (exemplos: facas de cortes, moedores, britadeiras e lâminas de tratores). Diversos autores salientam a importância desse estudo devido à economia que podem proporcionar na recuperação dessas peças (MING; LIM; CHENG, 1998), (LIM; MING; CHEN, 1998), (CORONADO; CAICEDO; GÓMEZ, 2009). Segundo Dwivedi (2004), a aplicação do revestimento é uma solução importante para a recuperação das peças que sofrem constante falham por fadiga ao longo do tempo de uso.

Um exemplo de manejo severo é do moedor que está representado pela Fig. 2.5, sua operação pode ocasionar fratura repentina. E, a recuperação dessas peças desgastadas pode ser pelo processo de soldagem. Esse processo de recuperação tem sido estudado para novos revestimentos de acordo com Kashani, Amadeh e Farhani (2007), por apresentar praticidade, rapidez e baixo custo de implementação.

Figura 2.5: Eixo sem fim do moedor recuperado pelo processo de soldagem



Fonte: Leitner et al. (2017)

A diversificação no uso desses processos de soldagem, tem tendência de crescimento ao longo dos anos, devido a novos estudos para o seguimento que podem ser utilizados. Cada grupo (AW - Soldagem a Arco, B - Brasagem, SSW - Soldagem por Estado Sólido, OFW - Soldagem Gás Combustível) é subdividido em vários processos diferentes que têm sido foco de estudos nas últimas décadas. Os mais utilizados para revestimento por soldagem é a arco elétrico (Arc welding – AW). A Tab. 2.1 mostra comparativos entre

processos de soldagem a arco que podem ser empregados como revestimento, devido à qualidade do cordão de solda, taxa de deposição e penetração, entre outros parâmetros. Há diversos fatores que podem ser usados no processo de soldagem com efeitos significativos no resultado final. Um deles é a proteção da poça de fusão por gás como o CO_2 (dióxido de carbono), ou a mistura de Argônio/ CO_2 com 15 até 25% de CO_2 , 100% de CO_2 ou sem gás de proteção como usado no processo FCAW-S.

Tabela 2.1: Comparativo entre os processos de soldagem a arco

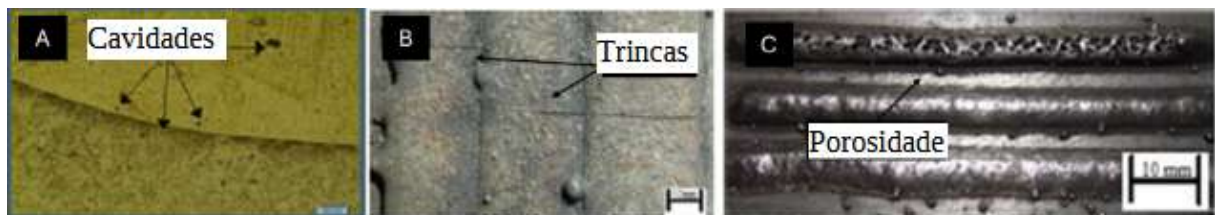
Parâmetro	Processo				
	SMAW	GTAW	GMAW	FCAW	SAW
Qualidade da solda	Bom	Excelente	Excelente	Bom	Excelente
Taxa de deposição da solda	Razoável	Pobre	Bom	Bom	Excelente
Trabalho de campo	Excelente	Pobre	Razoável/Bom	Razoável/Bom	Pobre
Manutenção de equipamento	Baixo	Baixo	Médio/alto	Médio/alto	Médio
Emissão de fumaça	Médio/alto	Baixo	Médio	Médio/alto	Muito baixo
Controle de entrada de calor	Bom	Pobre	Bom	Bom	Excelente
Visibilidade do arco e colocação do metal de adição	Bom	Excelente	Satisfatório	Satisfatório	Não aplicável
Variedade de metal soldável	Excelente	Excelente	Bom	Bom	Razoável

Fonte: modificado de ASM (2011)

2.3 Fatores do processo de soldagem para o revestimento duro

Alguns defeitos que ocorrem em revestimento feito pelo processo de soldagem são relatados no trabalho de Beczkowski e Gucwa (2016) como cavidades na linha de fusão do cordão da solda, trincas do cordão de solda e porosidade superficial, mostrados na Fig. 2.6. Os defeitos apresentados podem ser agravados nas escolhas dos parâmetros incorretos para o processo de soldagem com baixa qualidade do cordão de solda. Conhecer os fatores e efeitos que possam maximizar o ciclo de trabalho dos equipamentos como número de camadas, elementos químicos, energia de soldagem, melhor controle da temperatura, as fases e microestrutura podem trazer benefícios desejáveis de resistência e dureza.

Figura 2.6: Em A) - observa-se as cavidades na linha de fusão do revestimento, B) - trincas e C) - porosidades nos cordões de soldas



Fonte: Beczkowski e Gucwa (2016)

2.3.1 Influência do processo de soldagem

A primeira seleção do projeto é do processo que será usado no revestimento por soldagem. Escolher o processo de forma criteriosa é importante para que o projeto saia de acordo com o esperado, a fim de evitar falhas. Existem várias opções diferentes de processos que podem ser utilizadas, entre elas o FCAW.

O processo FCAW foi desenvolvido nos Estados Unidos entre 1957-1958, desde então vem sendo utilizado largamente nas indústrias devido à facilidade de operação, excelente resistência e acabamento nos cordões de solda (ASM, 2011). A utilização do processo FCAW, tendo como consumível Arame Tubular autoprottegido, é que pode apresentar melhor qualidade em relação a outros processos como GTAW e SAW, com uma variedade de metal de base soldável, facilidade de ajuste dos parâmetros e alta taxa de deposição do metal de adição. Esse metal de adição pode ter em sua composição os elementos Fe, Cr e C que favorecem o aparecimento na microestrutura de precipitado como carboneto de cromo (Cr_7C_3). Este tipo de precipitado consiste em estrutura com propriedades mecânicas de alta dureza e pode, em algumas situações, aumentar a resistência abrasiva que favorece o uso em ambientes onde os materiais sofrem constantemente desgastes mecânico.

Comparação entre os processos de soldagem

Os testes abrasivos e de dureza feitos por Coronado, Caicedo e Gómez (2009), entre dois tipos diferentes de processo de soldagem, um FCAW e o outro SMAW, depositados no material de base do aço ASTM A36 com o objetivo de comparar os resultados entre os processos. Os testes realizados pelos autores foram com roda de borracha (carga de 130 N, 200 rpm e 4.309 m) e ensaio de dureza vickers, os resultados estão representados na Tab. 2.2. O processo FCAW apresentou maior resistência ao desgaste abrasivo, com menor quantidade de massa perdida nos testes para o processo FCAW, isso se deve porque na microestrutura foi composta de matriz eutética rica em carboneto de titânio, segundo os autores, esses carbonetos atuam como barreiras à penetração em sua estrutura.

Tabela 2.2: Resultados dos testes de dureza realizados para 4 diferentes tipos de procedimentos, observa-se menor perda de massa para o processo FCAW

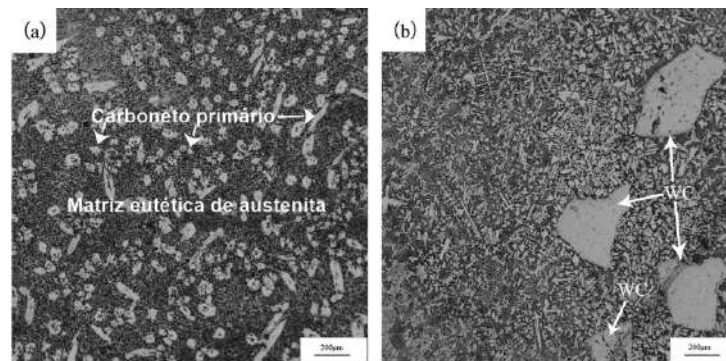
Tipo de revestimento	Camadas depositadas	Corrente (A)	Massa perdida (mg)	Dureza Vicker's
FCAW-A	1	250	2.563,33	695
	3	250	2.438,33	678
FCAW-B	1	250	1.206,67	597
	3	250	779,33	667
SMAW-C	1	100	3.444,00	470
	3	100	3.079,33	610
SMAW-D	1	130	4.165,67	632
	3	130	4.395,00	626

Fonte: Coronado, Caicedo e Gómez (2009)

No trabalho de Tian et al. (2019), foram utilizados dois processos diferentes de

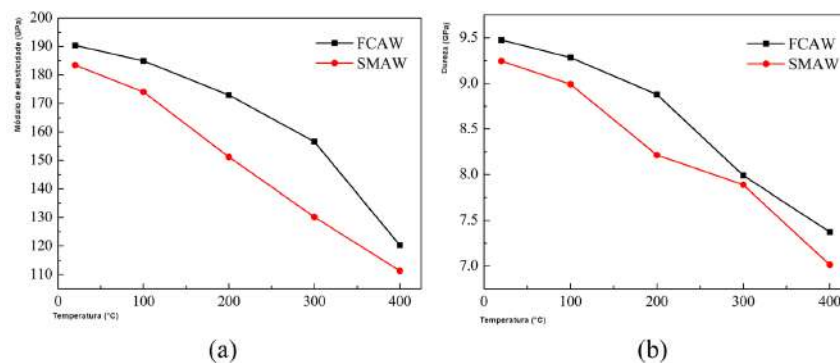
soldagem para serem comparados, o primeiro com FCAW ($D_a = 1,2$ mm - diâmetro do arame eletrodo, $I = 130$ A - corrente, $U = 21$ V - tensão, $v_a = 3,7$ mm/s - velocidade de alimentação) e o segundo com SMAW ($D_a = 3,2$ mm, $I = 100$ A, $U = 22$ V, $v_a = 3$ mm/s). A Fig. 2.7 apresenta as microestruturas entre os processos de revestimentos FCAW e SMAW, há a formação de carbonetos primários na região clara (Cr_7C_3), na região escura é formada por matriz eutética de austenita para o processo FCAW e partículas de WC com elevadas quantidades de dendritas no SMAW. E também realizando testes com variações de temperatura, o módulo de elasticidade e dureza foram maiores com o revestimento realizado pelo processo FCAW para todas as amostras, conforme apresentado na Fig. 2.8.

Figura 2.7: Microestrutura dos revestimentos: (a) FCAW e (b) SMAW



Fonte: modificada de Tian et al. (2019)

Figura 2.8: Módulo de elasticidade e dureza das duas camadas em relação a variação de temperatura do revestimento

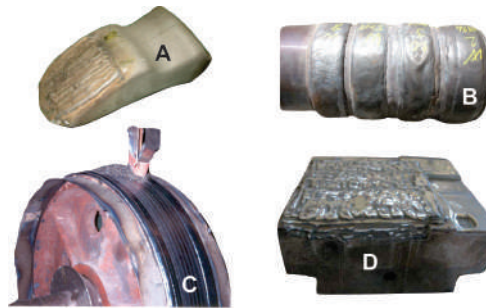


Fonte: modificada de Tian et al. (2019)

Para o estudo utilizando quatro processos de revestimento diferentes realizados por Viňáš, Greš e Vaško (2016), o primeiro sendo por SMAW para revestimento de dentes de retroescavadeira com material de adição E 10-UM-60-CGP-DIN8555-83 ($D_a = 3,2$ mm, $I = 90-120$ A, $U = 18$ V). O segundo por SAW para o revestimento do rolo de suporte que foi utilizado o material de adição WeldClad WLDC 2-DIN 8555-83 (com $D_a = 2,4$ mm, $I = 300$ A, $U = 29$ V). O terceiro por FCAW foi utilizado para preenchimento das rodas de

guindaste com material MF1-GF-400-GPS DIN 8555-83 ($D_a = 2,00$ mm, $I = 200-325$ A, $U = 23-29$ V). O quarto foi utilizado para a matriz de forjamento pelo método GMAW com material de revestimento ForgeWeld FW6 ($D_a = 2,4$ mm, $I = 250-400$ A, $U = 29-32$ V, com gás M21). A Fig. 2.9 representa os equipamentos que foram utilizados nos testes de revestimento. As microdurezas apresentadas para os componentes são referenciadas pela Tab. 2.3. O revestimento no dente da retroescavadeira utilizando o processo SMAW, segundo os autores, apresentou a maior dureza e a roda, utilizando o processo FCAW, apresentou a menor dureza. As perdas de massa seguiram inversamente proporcionais à dureza dos revestimentos, isto é, maior dureza menor perda de massa nos testes.

Figura 2.9: Peças recuperadas por soldagem: a) Lâmina escavadeira, b) Eixo, c) Roda e d) Mesa para forjamento



Fonte: modificada de Viňáš, Greš e Vaško (2016)

Tabela 2.3: Valores da microdureza HV 0,1 para quatro processos diferentes

Peças soldadas	Metal base	Zona termicamente afetada	Camada de cobertura	Perda de massa (g)
Dentes da retroescavadeira	364	422	679	0,015
Rolo	248	451	532	0,027
Roda	193	228	420	0,033
Mesa forjadora	484	512	553	0,024

Fonte: modificada de Viňáš, Greš e Vaško (2016)

2.3.2 Influência do número de camadas no revestimento

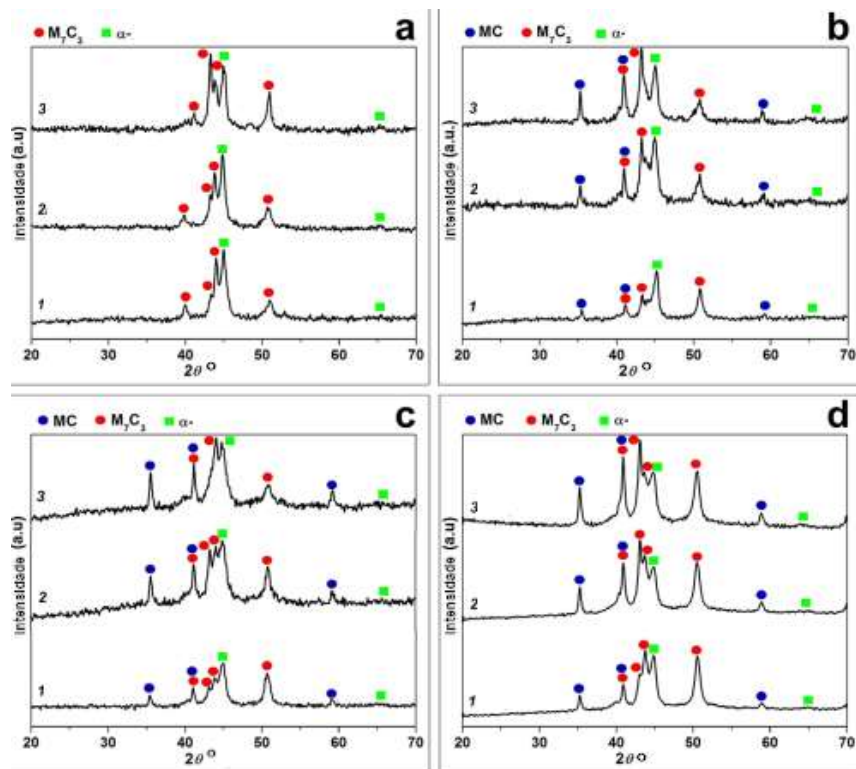
A espessura do revestimento é determinada pelo número de camadas e pode afetar a qualidade, tensão residual, microestrutura e propriedades mecânicas. Vários autores, com objetivo de reduzir o efeito do material base na composição do material de adição, fizeram o revestimento em mais de uma camada, Bahoosh, Shahverdi e Farnia (2018), Bahoosh, Shahverdi e Farnia (2019), Viňáš, Greš e Vaško (2016) e Yang et al. (2016).

Foram observadas mudanças na microestrutura do trabalho realizado por Luz et al. (2020) em relação ao número de camadas. Na primeira camada foi constatada mais carbonetos de nióbio e menos carbonetos primários, com a adição de mais uma camada

no revestimento, observou-se a formação do carboneto de nióbio e maior quantidade de carbonetos primários em forma de agulha e hexagonal.

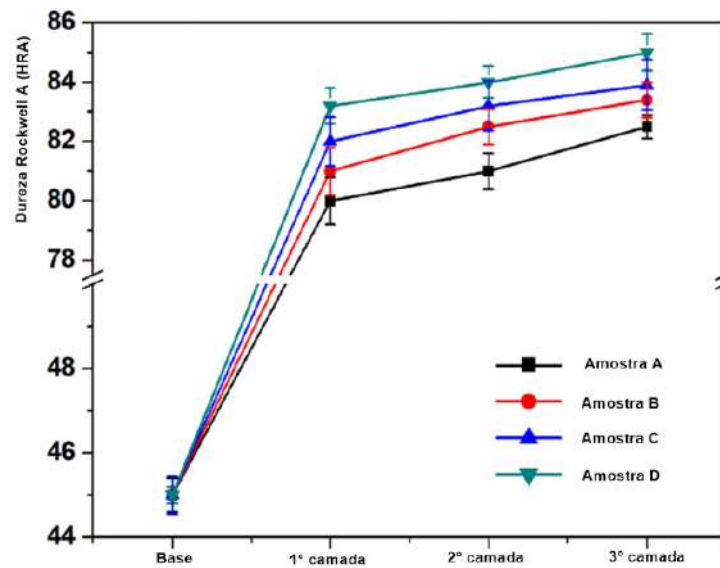
O trabalho de Jilleh et al. (2021) usando o processo FCAW-S ($I = 250$ A, $U = 30$ V, $v_s = 15$ cm/min - velocidade de soldagem), as quantidades de camadas no revestimento refletiram diretamente na dureza do material de deposição. Com a adição das camadas, o preenchimento foi tendo pouca interferência no material de base. A Fig. 2.10 mostra um aumento nas quantidades dos carbonetos quando teve um aumento no número de camadas, isto se deve pelo distanciamento do material de adição com material base. A Fig. 2.11 mostra uma variação da dureza em relação às camadas, apresentando maior dureza com aumento do número de camadas.

Figura 2.10: DRX em relação ao número de camadas (1, 2 e 3 camadas) para quatro tipos diferentes de eletrodo



Fonte: modificada de Jilleh et al. (2021)

Figura 2.11: Gráfico comparativo entre dureza das camadas



Fonte: modificada de Jilleh et al. (2021)

A quantidade de camada do revestimento pode afetar a composição química do cordão de solda como já mencionado. Essa alteração na composição foi mostrada no trabalho de Coronado, Caicedo e Gómez (2009), utilizando os materiais de adição mostrados na Tab. 2.4, pelos processos FCAW-A ($I = 250$ A, $E = 12,5$ kJ/cm - energia de soldagem), FCAW-B ($I = 250$ A, $E = 17,5$ kJ/cm), SMAW-C ($I = 100$ A, $E = 7,1$ kJ/cm) e SMAW-D ($I = 100$ A, $E = 17$ kJ/cm). O teor de Cr e Ti aumentou quando o revestimento foi em 3 camadas devido ao distanciamento do material de base. Comparando os testes feitos entre dois tipos diferentes de soldagem com 1 e 3 camadas depositadas no material base ASTM A36, tiveram variação dos elementos químicos Cr e Ti, isso foi devido à diluição do substrato com a primeira camada do cordão de solda. A dureza apresentou diferença entre o número de camadas como está representada na Tab. 2.5. O processo FCAW-A, com três camadas, apresentou menor dureza e menor perda de massa em relação a uma camada. Os processos FCAW-B e SMAW-C, com três camadas, apresentaram maiores durezas e menores perdas de massa em relação a uma camada e, o processo SMAW-D, com três camadas, apresentou menor dureza e maior perda de massa em relação a uma camada. Segundo os autores, isso pode estar relacionada com as mudanças microestruturais que ocorrem ao longo dos sucessivos passes de deposição.

Tabela 2.4: Composição química do arame empregado para fazer o revestimento por FCAW e SMAW em 1 e 3 camadas

Tipo de revestimento	Camadas depositadas	Cr	Mn	Mo	Si	P	Ti
FCAW-A	1	6,73	1,69	1,01	1,75	0,12	0,16
	3	7,86	1,33	1,13	1,98	0,14	0,20
FCAW-B	1	3,04	0,85	0,83	0,40	0,05	2,46
	3	5,85	1,12	1,49	0,48	0,11	4,66
SMAW-C	1	16,48	0,33	0,39	1,16	0,14	-
	3	26,39	0,08	0,35	1,27	0,12	-
SMAW-D	1	4,15	0,73	0,49	1,60	0,19	-
	3	8,10	0,59	0,27	2,62	0,08	-

Fonte: modificada de Coronado, Caicedo e Gómez (2009)

Tabela 2.5: Resultado dos testes de dureza em relação ao número de camadas

Tipo de revestimento	Camadas depositadas	Perda de massa (mg)	Dureza Vicker's
FCAW-A	1	2.563,33	695
	3	2.438,33	678
FCAW-B	1	1.206,67	597
	3	779,33	667
SMAW-C	1	3.444,00	470
	3	3.079,33	610
SMAW-D	1	4.165,97	632
	3	4.395,00	626

Fonte: modificada de Coronado, Caicedo e Gómez (2009)

Na soldagem feita com uma e duas camadas com os parâmetros apresentados na Tab. 2.6, o trabalho Gualco, Svoboda e Surian (2016) analisa a microestrutura e resistência ao desgaste no aço comum, com deposição pelo processo FCAW ($D_a = 1,6$ mm). A composição química das amostras está representada pela Tab. 2.7, que apresentou uma variação dos elementos como C, Cr, Mn, Nb e B em relação à quantidade de camadas. Na microestrutura para duas camadas, teve redução das fases α -Fe e $M_7(BC)_3$, como aumento das fases de $M_{23}(BC)_6$ e NbC, mostrado na Fig. 2.12 e listado na Tab. 2.8. O resultado para amostra com duas camadas apresentou dureza superior, como mostrado na Fig. 2.13.

Tabela 2.6: Parâmetro de soldagem em relação ao número de camadas - O1 (uma camada) e O2 (duas camadas)

Amostras	Camadas	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade da soldagem (mm/s)	Energia de entrada (KJ/mm)
O1	1	35	300	3	3,5
O2	2	35	300	3	3,5

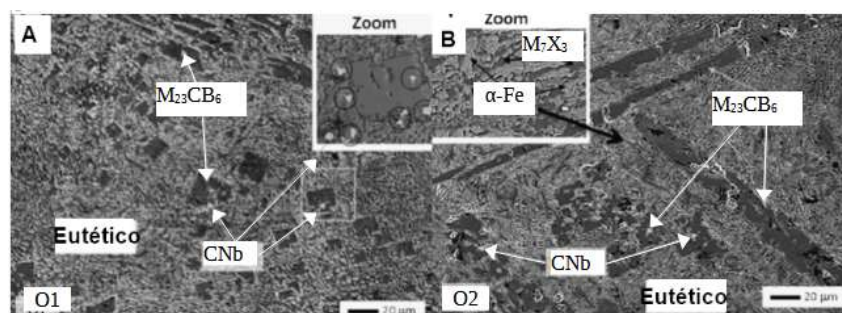
Fonte: Gualco, Svoboda e Surian (2016)

Tabela 2.7: Composição química de cada amostra % em peso em relação ao número de camadas - O1 (uma camada) e O2 (duas camadas), balanceado com Fe

Amostras	C	Mn	Si	Cr	Nb	B
O1	0,81	0,34	0,97	12,23	2,69	4,60
O2	1,00	0,27	0,97	14,55	2,79	4,95

Fonte: modificada de Gualco, Svoboda e Surian (2016)

Figura 2.12: Microestrutura seção transversal, a) amostra O1 (uma camada) e b) amostra O2 (duas camadas)



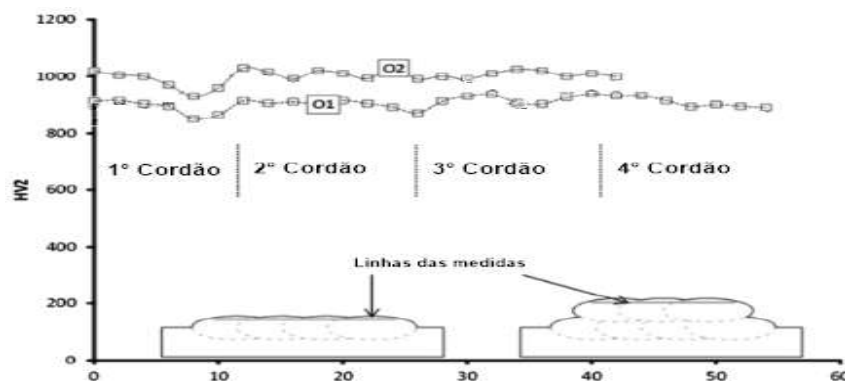
Fonte: modificado de Gualco, Svoboda e Surian (2016)

Tabela 2.8: Números de fases em % em relação ao número de camadas, O1 (uma camada) e O2 (duas camadas)

Amostra	α -Fe	$M_{23}(BC)_6$	$M_7(BC)_3$	NbC
O1	48 ± 3	26 ± 1	25 ± 1	$1 \pm 0,50$
O2	$36 \pm$	42 ± 3	20 ± 1	$2 \pm 0,50$

Fonte: Gualco, Svoboda e Surian (2016)

Figura 2.13: Resultados dos testes de dureza em relação ao número de camadas, O1 (uma camada) e O2 (duas camadas)

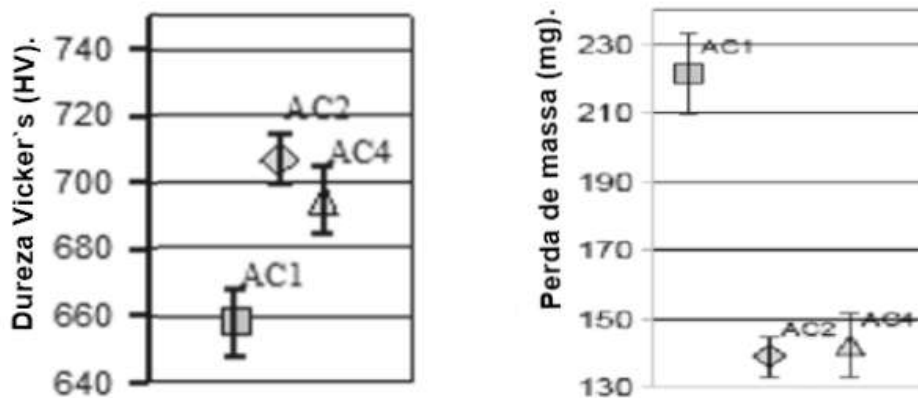


Fonte: modificada de Gualco, Svoboda e Surian (2016)

Dureza e perda de massa em relação ao número de camadas

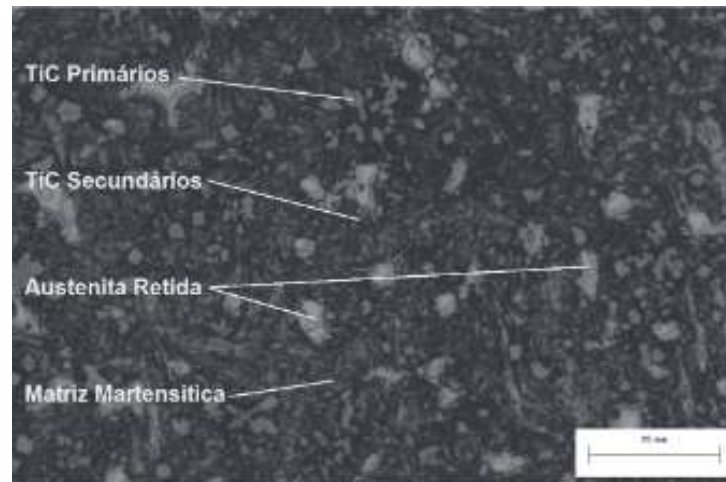
Avaliando a perda de massa do revestimento do trabalho de Colaço e Maranhão (2013), usando o processo FCAW ($I = 265$ A, $U = 28$ V, $v_a = 117$ mm/s, $E = 1.484$ J/mm e arame a base FeCrC+Ti), os testes foram realizados em relação ao número de camadas (1°, 2° e 4° camadas). Essas variáveis têm como objetivo explicar a influência na perda de massa do revestimento duro pelos testes realizados em roda de borracha com relação ao número de camadas. Os resultados de dureza encontrados foram entre 648-720HV, com maior dureza e menor perda de massa a partir da segunda camada, como mostra a Fig. 2.14. Na Fig. 2.15, a microestrutura apresentou na matriz a formação de martensita e austenita retida e, existência de carbonetos primários e secundários, sendo os primários dispersos na matriz e os secundários nos contornos de grão.

Figura 2.14: Dureza das amostras e perda de massa com relação ao número de camadas do revestimento a base de FeCrC+Ti (AC1 - 1 camada, AC2 - 2 camadas, AC4 - 4 camadas)



Fonte: modificada de Colaço e Maranhão (2013)

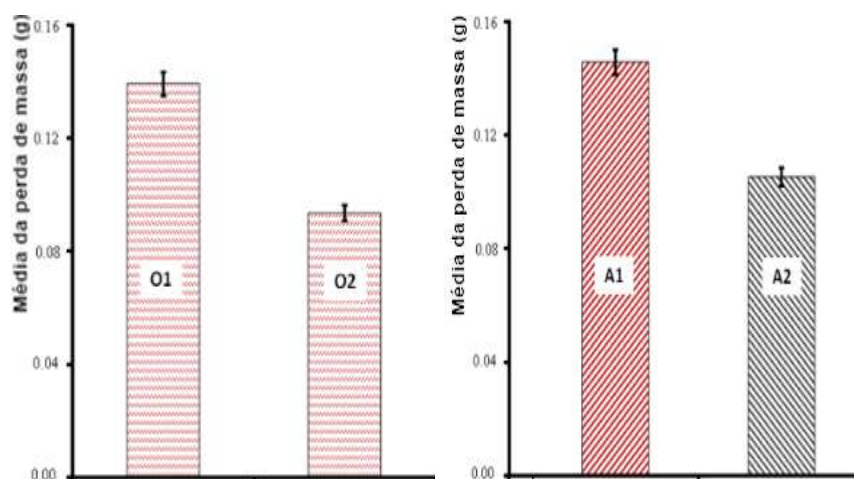
Figura 2.15: Microscopia ótica da microestrutura do revestimento duro a base da liga de FeCrC+Ti



Fonte: Colaço e Maranhão (2013)

Também foi observado no trabalho de Gualco, Svoboda e Surian (2016) pelo processo FCAW ($D_a = 1,6$ mm, $I = 300$ A, $U = 35$ V, $v_s = 3$ mm/s e $E = 3,5$ KJ/mm), sendo os testes abrasivos feitos por roda de borracha com resultados mostrados na Fig. 2.16. As menores perdas de massa ocorreram nas aplicações dos cordões em duas camadas (O_2 e A_2), com variação entre 30-40% a menos para perda de massa comparando com uma camada.

Figura 2.16: Perda de massa nos testes abrasivos em relação ao número de camadas, O1 e A1 com uma camada, O2 e A2 com duas camadas

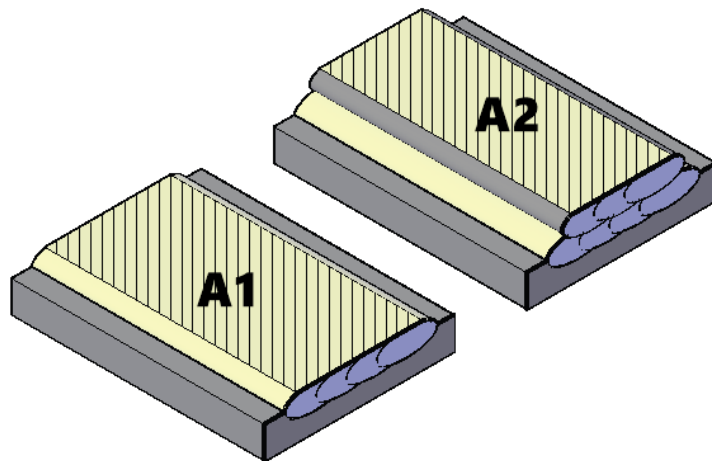


Fonte: modificada de Gualco, Svoboda e Surian (2016)

O estudo da resistência ao desgaste do revestimento no trabalho de Gualco et al. (2015), pelo processo FCAW ($D_a = 1,6$ mm, $I = 300$ A, $U = 35$ V, $v_s = 3$ mm/s e com gás de proteção), feito em 3 camadas, sendo a primeira com 4 cordões de solda, a

segunda com 3 cordões de solda e a terceira com 2 cordões de solda. Foram realizados dois testes em A1 na primeira camada e A2 na segunda, como está mostrado na Fig. 2.17. A composição química do material de adição está listado na Tab. 2.9. A Fig. 2.18 mostra os difratogramas com indicação das fases formadas pelo revestimento como α -Fe, γ -Fe, carboboretos complexos ($M_{23}(BC)_6$), carboboretos principais ($M_7(BC)_3$) e carbonetos de nióbio (NbC). Na amostra A2 teve uma redução da fase α -Fe e aumento das fases carboboretos complexos, carboboretos principais e carboneto de nióbio. Os ensaios de dureza encontrados nas amostras ficaram entre 800 e 920 HV. A amostra A2 apresentou uma dureza maior em relação a A1, apresentado pela Fig. 2.19. A perda de massa para as duas amostras A1 e A2 foram de 0,1457 g e 0,1053 g, respectivamente.

Figura 2.17: Áreas onde os testes foram feitos nas amostras



Fonte: Gualco et al. (2015)

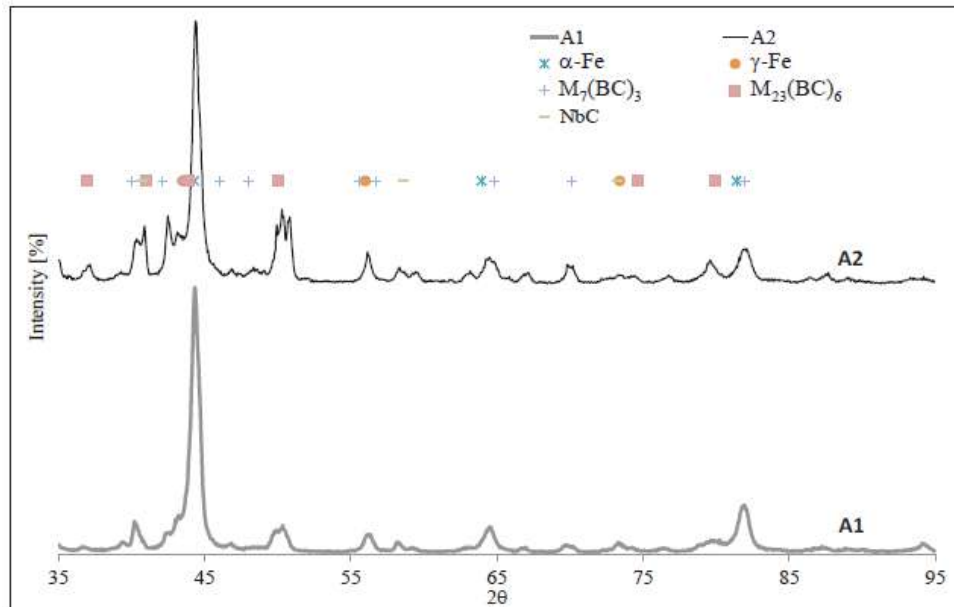
Tabela 2.9: Composição química do revestimento duro % em peso

C	Mn	Si	Cr	Nb	B	Fe
0,99	0,22	1,02	16,8	4,6	4,6	Bal.

Fonte: Gualco et al. (2015)

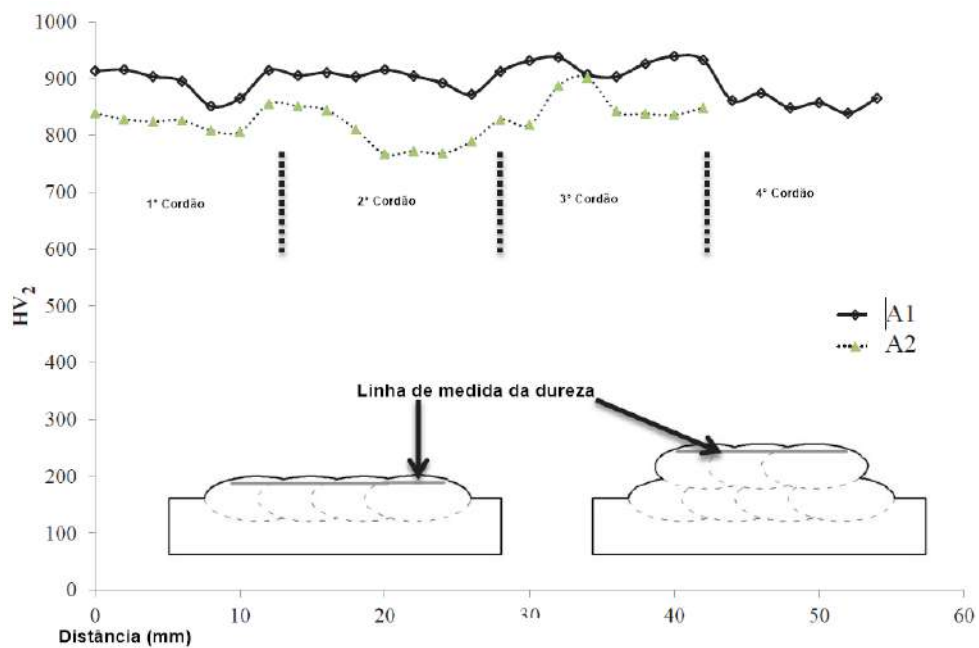
Comparando os testes de perda de massa feitos entre dois tipos diferentes de soldagem pelos processos FCAW e SMAW por Coronado, Caicedo e Gómez (2009), com 1 e 3 camadas depositadas no material base ASTM A36. A perda de massa foi menor para a deposição em três camadas com os processos FCAW (A e B) e SMAW C e, maior perda de massa com 3 camadas para o processo SMAW D, conforme observado no gráfico da Fig. 2.20.

Figura 2.18: A figura mostra difratogramas das fases presentes nos testes realizados em A1 e A2



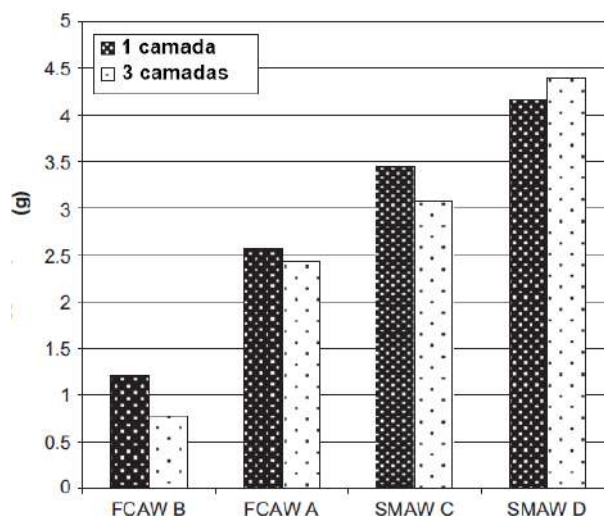
Fonte: Gualco et al. (2015)

Figura 2.19: Resultado de dureza em relação ao número de camadas das amostras, A1 - 1 camada e A2 - 2 camadas



Fonte: modificada de Gualco et al. (2015)

Figura 2.20: Perda de massa com camada simples e camadas de soldas em relação aos diferentes processos



Fonte: modificada de Coronado, Caicedo e Gómez (2009)

2.3.3 Influência dos elementos químicos

As composições químicas do revestimento podem variar de acordo com as ligas escolhidas para o processo e influenciar diretamente nos resultados finais em condições específicas. Essas ligas têm alguns elementos que podem ser adicionados, entre eles o carbono, cromo, níquel, molibdênio, vanádio, cobre, tungstênio, nióbio, titânio, silício, entre outros. A adição dos elementos pode ajudar a melhorar as propriedades mecânicas e características - resistência, dureza e tenacidade. A escolha desses elementos pode ser importante para controlar problemas como trincas, porosidades e falta de aderência do revestimento ao material metálico de base ou substrato.

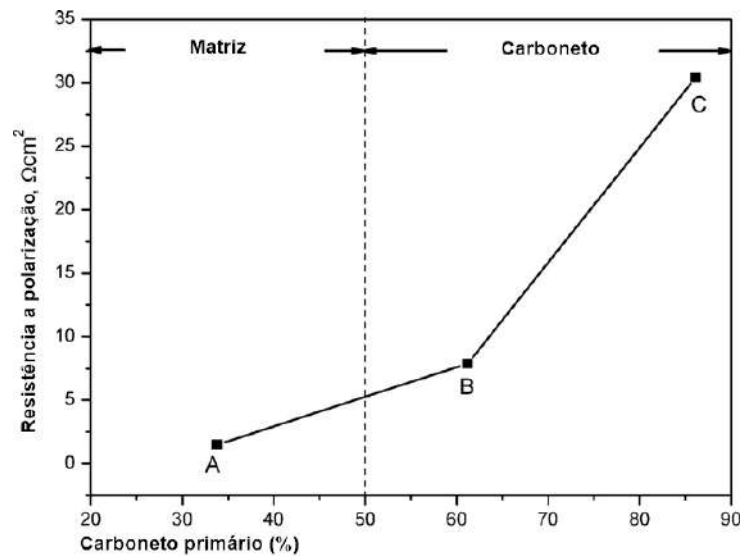
E, para isso, o trabalho de Chang et al. (2010b) teve como objetivo examinar a influência do elemento químico carbono na microestrutura e corrosão do revestimento hipereutético com as composições químicas das amostras listado na Tab. 2.10, usando o processo de soldagem FCAW com eletrodo a base de FeCrC ($D_a = 2,8$ mm, $I = 350$ A, $U = 33$ V, $v_s = 5$ mms⁻¹), observou-se o aumento da formação dos carbonetos primários de $(Cr, Fe)_7C_3$ e $Fe + (Cr, Fe)_7C_3$ de 33,81% para 86,14%, aumentando o carbono de 3,73% para 4,85% através do arame eletrodo, e aumento da resistência a corrosão, conforme ilustrado no gráfico da Fig. 2.21. Na Fig. 2.22, são apresentadas as microestruturas do revestimento em relação as porcentagens do carbono presente nas amostras, são formadas por carbonetos primários ($(Cr, Fe)_7C_3$) e matriz eutética [$\gamma - Fe + (Cr, Fe)_7C_3$]. Conforme foi aumentando a porcentagem do carbono teve uma transformação de lâmina dos carbonetos primários para a forma de bastão. Esse aumento do teor de carbono no revestimento aumentou a resistência à corrosão do revestimento.

Tabela 2.10: Composição química usado no revestimento duro, F - carboneto primário, D - tamanho do carboneto primário e N quantidade de carbonetos primários por área

Revestimento	Composição química					F (%)	D (μm)	N (mm^{-2})
	C	Si	Mn	Cr	Fe			
Metal Base	0,18	0,15	0,55	0,09	bal.	-	-	-
A	3,73	2,28	2,33	26,70	bal.	33,81	59,00	565
B	4,21	2,00	2,26	27,08	bal.	61,19	33,39	1.004
C	4,85	1,96	2,28	27,31	bal.	86,14	13,53	3.758

Fonte: modificada de Chang et al. (2009)

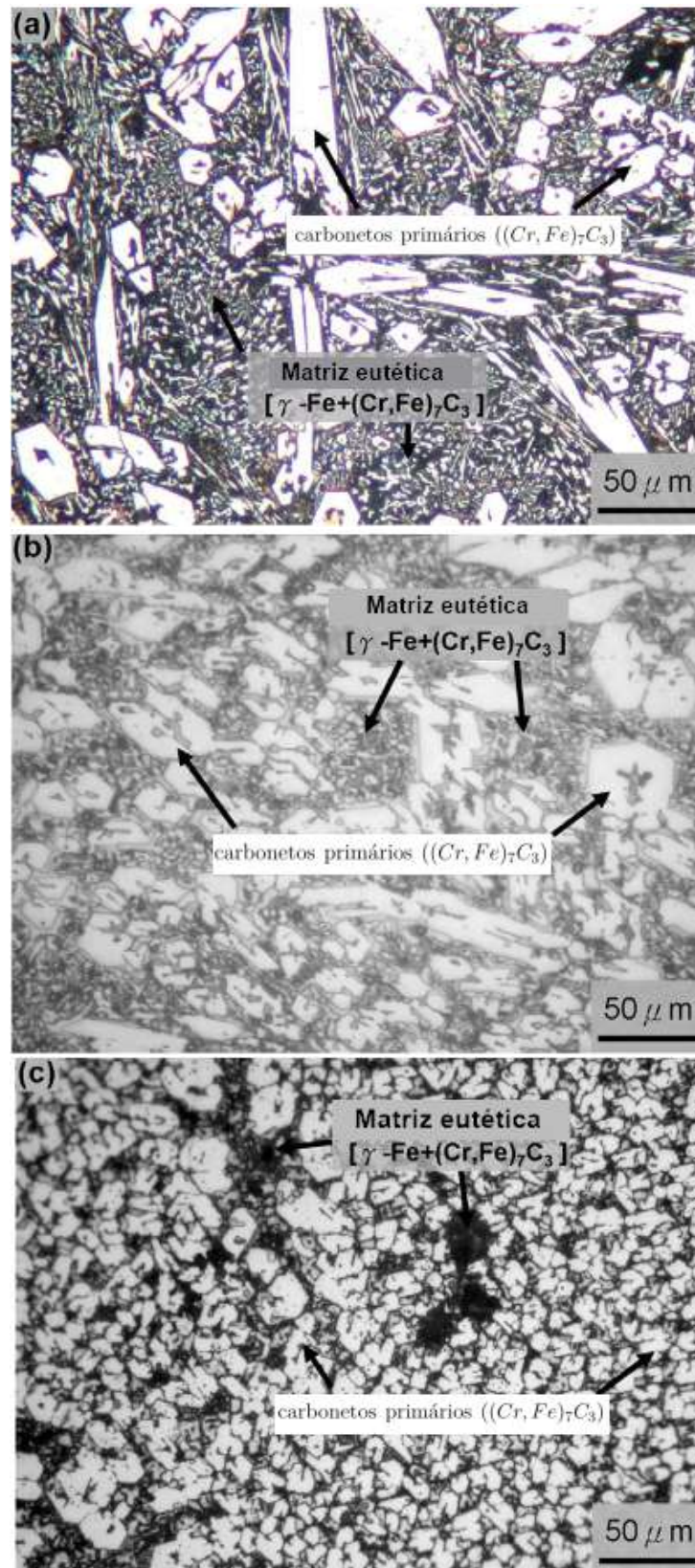
Figura 2.21: Gráfico comparativo da resistência a corrosão do revestimento a base de FeCrC com as seguintes porcentagem em peso dos carbonos: a) 3,736, b) 4,21 e c) 4,85



Fonte: Chang et al. (2010b)

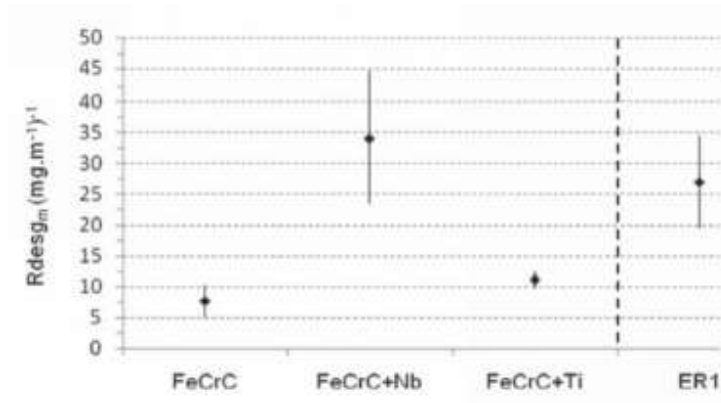
A influência dos elementos químicos também é relatado nos testes de soldagem realizado por Lima e Ferraresi (2010), usando quatro consumíveis diferentes com os materiais FeCrC, FeCrC + Nb, FeCrC + Ti e ER1 para avaliação do desgaste das facas picotadoras de cana-de-açúcar com testes feitos em laboratório, medindo a resistência ao desgaste por roda de borracha com análise da perda de massa, o outro em campo, usando as facas nos equipamentos de trabalho. Os resultados realizados em laboratório para resistência ao desgaste estão apresentados na Fig. 2.23, resistência maior foi com adição de Nb, seguido por eletrodo ER1, com adição de Ti e FeCrC. Na resistência ao desgaste em campo, o material com adição de Ti teve um desempenho maior, seguido de eletrodo ER1, com FeCrC e com adição de Nb, representado pela Fig. 2.24. Segundo o autor, essa inconsistência pode ter sido agravado pela presença de trincas e impacto com a cana ou estrutura do picotador.

Figura 2.22: Microestrutura hipereutética com revestimento de FeCrC com % em peso do C: a) 3,37, b) 4,21 e c) 4,85



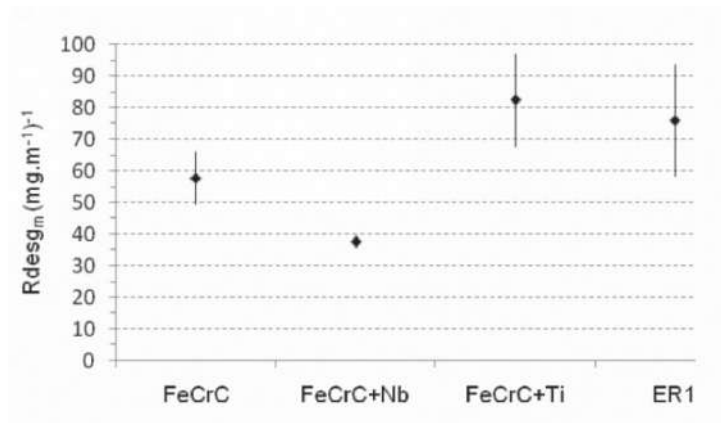
Fonte: Chang et al. (2010b)

Figura 2.23: Análise comparativo da resistência ao desgaste por consumível realizado com roda de borracha em laboratório



Fonte: Lima e Ferraresi (2010)

Figura 2.24: Resistência ao desgaste médio por consumível realizado em campo



Fonte: Lima e Ferraresi (2010)

Com adição do elemento químico de Nb e usando o processo FCAW-S ($D_a = 2,8$ mm), o trabalho de Liu, Wei e Liu (2015) é sobre análise da microestrutura e desgaste do revestimento. A fração de massa para ser adicionado com ferronióbio (Fe-Nb) é de 60% em peso do Nb no arame, sendo adicionado no enchimento interno do arame em quantidades de 0, 6, 12, 18 e 24%. A Tab. 2.11 mostra as composições químicas presentes nas amostras após o revestimento. O revestimento sem adição de Nb na composição foi composto por $(Cr, Fe)(C, B)_3$, $Fe_3(C, B)$, martensita e austenita residual, representado pela Fig. 2.25a. Com adição de ferronióbio de 6% em peso, observou a formação de NbC, refinamento da $M_7(C, B)$ e precipitação das colônias eutéticas, apresentado pela Fig. 2.25b. Com 12%, os carbonetos de nióbio tornaram irregulares, apresentado pela Fig. 2.25c. Com 18%, os carbonetos primários desapareceram, formando uma estrutura quase eutética, apresentado pela Fig. 2.25d. Com 24%, a distribuição dos carbonetos de nióbio foi relativamente densa em comparação com outras ligas do revestimento duro, a microestrutura transformou

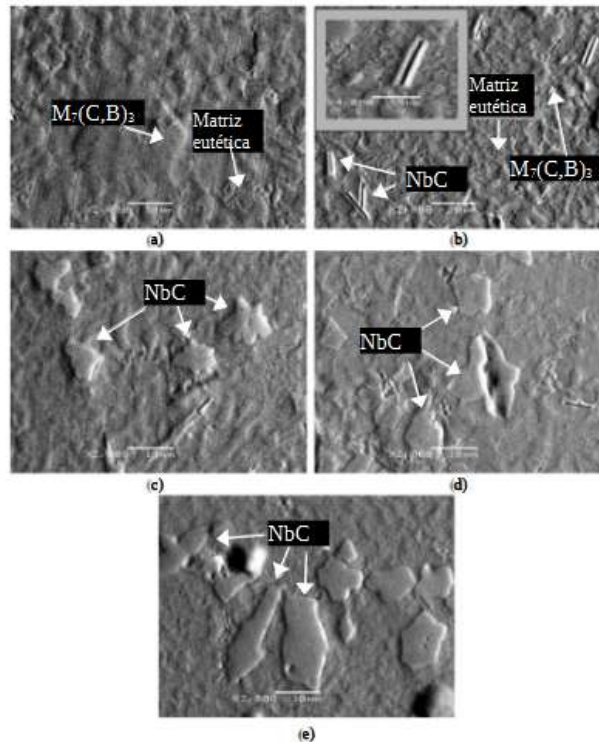
em hipoeutética, apresentado pela Fig. 2.25e. Na Fig. 2.26, os testes feitos em roda de borracha mostram as mudanças de dureza e desgaste do material com adição de nióbio na liga do revestimento. A dureza da liga sem adição de nióbio apresentou valor de 59 HRC e perda por desgaste de material aproximadamente de 64,3 mg. Na adição de 18% do nióbio, teve uma dureza de 64 HRC e uma perda por desgaste do material de 40 mg. Com aumento da porcentagem do nióbio para 24%, a dureza caiu para 63 HRC e a perda ficou em torno de 43 mg. Essas mudanças se devem pela formação do NbC que contribuiu com maiores durezas da liga.

Tabela 2.11: Composição química do revestimento duro, % em peso

Adição Fe-Nb	Nb	C	B	Cr	Mn	Si	Fe
0	0	3,10	0,89	18,89	2,41	1,05	Bal.
6	1,53	2,86	0,92	16,37	2,28	1,10	Bal.
12	3,27	2,97	0,90	15,95	2,15	0,96	Bal.
18	5,38	2,83	0,78	17,01	2,43	1,13	Bal.
24	7,70	3,06	1,03	16,30	2,30	1,20	Bal.

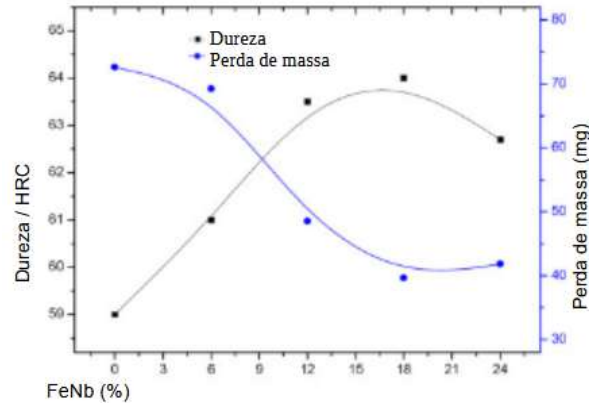
Fonte: modificada de Liu, Wei e Liu (2015)

Figura 2.25: Formação das microestruturas do revestimento duro com diferente adição de nióbio em peso, a) 0%, b) 6%, c) 12%, d) 18%, e) 24%



Fonte: modificada de Liu, Wei e Liu (2015)

Figura 2.26: Efeito do nióbio na dureza e desgaste do revestimento



Fonte: modificada de Liu, Wei e Liu (2015)

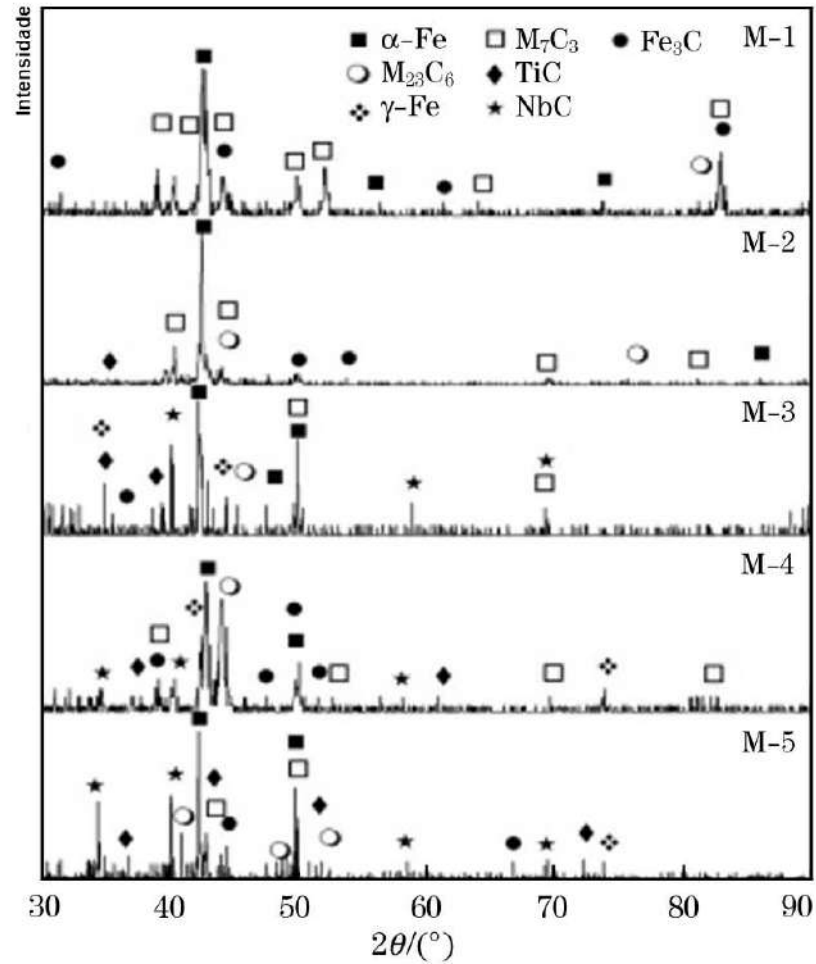
A contribuição dos elementos Nb e Ti também foi observado na microestrutura das ligas de FeCrC com reforço de TiC_2 -NbC para 5 amostras no trabalho de Liu et al. (2016), utilizando o processo FCAW ($D_a = 2,8$ mm) e aplicando 4 camadas com temperatura entre passe de 150 °C. Foi revestida a amostra M1 com FeCrC, M2 acrescentou 2% TiB_2 na liga de FeCrC; em M3, M4 e M5 acrescentou 1, 3 e 5% de Nb, respectivamente. Os resultados da composição química das amostras estão representado pela Tab. 2.12. A microestrutura consiste em martensita, austenita, carboneto primário e carboneto eutético, conforme representado na Fig. 2.27. Com a adição de Ti e Nb reduziu a concentração de C para formação de carbonetos de titânio e de nióbio, com isto, teve uma diminuição dos carbonetos primário. Conforme listado na Tab. 2.13, houve um aumento da média de dureza com a adição de TiC_2 e NbC. As médias de dureza do revestimento com adição do Nb tiveram quase as mesmas variações e não apresentaram significâncias de dureza com relação as amostras M3, M4 e M5. A fase do carboneto primário não apresentou variação de dureza entre as amostras M1, M2 e M4. A perda de massa foi menor com a adição do Nb para a amostra M5 de 0,0239 g.

Tabela 2.12: Composição química das ligas do revestimento duro (% em massa)

Amostras	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	B	Nb
M1	5,90	1,82	0,63	30,98	0,15	-	-	-
M2	5,56	1,89	0,58	31,38	0,16	0,56	0,24	-
M3	5,56	1,93	0,65	29,25	0,12	0,57	0,25	0,85
M4	5,53	0,90	0,60	26,40	0,16	0,52	0,20	2,45
M5	5,03	1,70	0,67	28,65	0,17	0,62	0,25	4,57

Fonte: Liu et al. (2016)

Figura 2.27: Difratoograma do revestimento



Fonte: modificada de Liu et al. (2016)

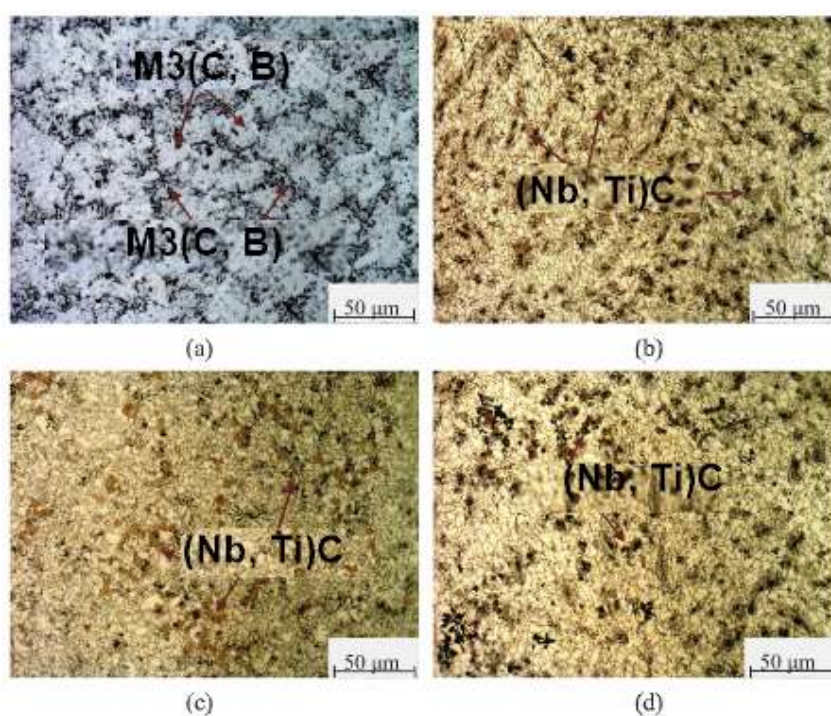
Tabela 2.13: Características apresentadas nos resultados do revestimento duro

Amostra	Dureza dos revestimentos HRC	M_7C_3 HRC	Microdureza na matriz HRC	Perda de massa (g)	Coefficiente abrasivo
M1	58,0	78	46	0,0472	1,00
M2	59,1	78	60	0,0307	1,53
M3	59,6	73	55	0,0302	1,56
M4	59,4	79	56	0,0270	1,75
M5	59,0	76	61	0,0239	1,97

Fonte: modificada de Liu et al. (2016)

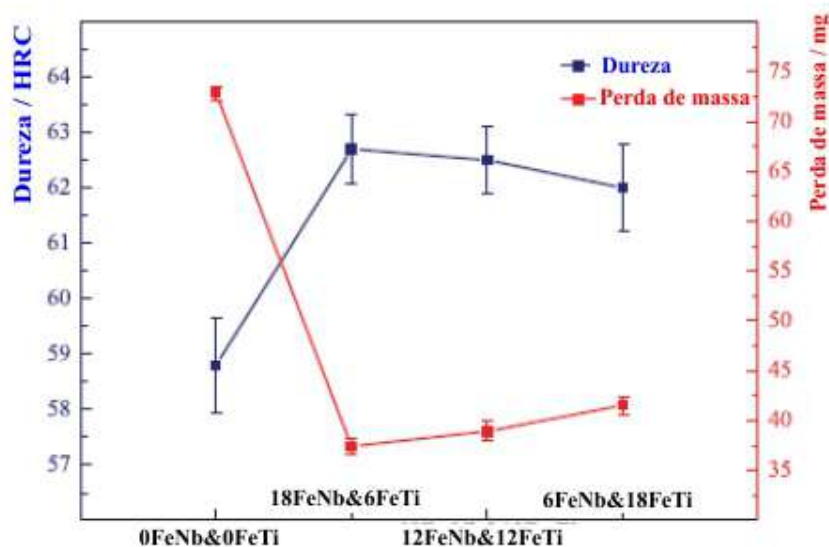
Para analisar o efeito simultâneo na adição do Fe-Nb (60% Nb em peso) e Fe-Ti (30% Ti em peso) pelo processo FCAW-S ($D_a = 2,8$ mm) com deposição na base do metal H08A. Também, os testes resultaram em mudança significativa na dureza e resistência abrasiva após o revestimento. A Fig. 2.28a mostra a microestrutura hipereutética primária hexagonal de $M_7(CB)_3$, colônia eutética de $M_3(C, B)$, martensita e austenita sem adição de Nb e Ti. A Fig. 2.28-bd mostra a formação da microestrutura hipoeutética com grão de austenita e partículas finas irregulares de carbonetos de nióbio e titânio - (Nb, Ti)C, na microestrutura com adição de Nb e Ti teve uma redução do carbono no estado líquido para estado quase eutético, pois, o Nb e Ti consumiu carbono da estrutura do sistema. Nos resultados, apresentado pela Fig. 2.29, são observadas as mudanças de dureza e perda de massa pelo desgaste abrasivo na liga de revestimento devido a adição simultânea dos componentes Fe-Nb e Fe-Ti. Sem adição dos elementos a dureza foi de 59 HRC e perda de material 73,9 mg, com a adição de 18% Fe-Nb&6% Fe-Ti a dureza aumentou para 63,7 HRC e a perda de material foi de 37,4 mg. Para dureza de 62,5 HRC foi adicionado 12% Fe-Nb&12%Fe-Ti e a perda de material ficou em 40 mg. Para 6%Fe-Nb&18%Fe-Ti, a dureza ficou em torno de 62 HRC e perda de material em 42,5 mg. Pode ressaltar que a adição simultânea do FeNb e FeTi favoreceu a formação de carbonetos (Nb, Ti)C, seguido de uma diminuição dos carbonetos primários M_7C_3 , sendo os melhores resultados para os testes de dureza ocorrendo com 18%Fe-Nb&6%Fe-Ti, (LIU et al., 2018).

Figura 2.28: Revestimento com adição de simultânea em peso, a) 0%Fe-Nb e 0 %Fe-Ti, b) 18%Fe-Nb e 6%Fe-Ti, c) 12%Fe-Nb e 12%Fe-Ti, d) 6%Fe-Nb e 18%Fe-Ti



Fonte: Liu et al. (2018)

Figura 2.29: Gráfico comparativo da dureza e teste de abrasão com adição de Fe-Nb e Fe-Ti



Fonte: modificada de Liu et al. (2018)

Similarmente, através do processo de soldagem FCAW para tipos diferentes de consumíveis, tendo como objetivo avaliar o revestimento duro com uma camada, foi usado arame autoprotetido para o revestimento. As ligas utilizadas com FeCrC-FeCrC, FeCrC+Ti-FeCrC+Ti, FeCrC+Nb-FeCrC+Nb, FeCrC-FeCrC+Ti, FeCrC-FeCrC+Nb e FeCrC+Ti-FeCrC+Nb, com e sem amanteigamento, segundo Souza e Ferraresi (2017). A avaliação do desgaste foi realizado por pesagem das peças após testes serem feitos por roda de borracha e, para manter o depósito de material uniforme a relação de v_a/v_s foi mantido constante. O arame ER308LSi foi usado para preparação com amanteigamento, o objetivo era diminuir ou eliminar as trincas de solidificação, mas não apresentou efeito na prática, porém obteve uma redução de trincas com adição do Ti. Nas amostras com os dois arames iguais de FeCrC, representado pela Fig. 2.30, em (a) sem amanteigamento observou na microestrutura formada por austenita na matriz eutética com carboneto primário sem orientação definida, em (b) com amanteigamento os carbonetos encontram disformes na matriz. Com a inserção de dois arames no revestimento de FeCrC+Ti, sem e com amanteigamento representado pela Fig. 2.30-cd, respectivamente, apresentou carbonetos de titânio irregulares com vários tamanhos; em (c) teve uma ausência de carboneto primário devido ao baixo teor de cromo; em (d) apresenta forma similar de maior tamanho dos carbonetos de titânio. Nas condições do depósito de FeCrC+Nb de arame duplo, sem e com amanteigamento, representado pela Fig. 2.30-ef, respectivamente, formou carboneto primário e de nióbio de maneira aleatória em matriz hipereutética; em (e) o formato do NbC teve uma geometria hexagonal; apresentando menos quantidade de NbC e M_7C_3 , em (f) os carbonetos apresentaram de forma não uniforme e de tamanhos maiores.

No revestimento feito por FeCrC-FeCrC+Ti, sem e com amanteigamento, representado pela Fig. 2.30-gh, respectivamente, formou carboneto de titânio na matriz e carboneto primário, não aconteceu em (cd) a formação de carboneto primário devido ao teor de cromo 6,5% Cr em peso. Na Fig. 2.30-ij, com FeCrC-FeCrC+Nb sem e com amanteigamento, respectivamente, teve a formação de carboneto primário e carboneto de nióbio distribuído na matriz. A microestrutura representada pela Fig. 2.30-lm, usando os arames de revestimentos FeCrC+Ti-FeCrC+Nb, sem e com amanteigamento, respectivamente, verificou-se a presença de carbonetos primários, carbonetos de titânio e carbonetos de nióbio, com isto, a matriz teve uma mudança em sua microestrutura devido a um aumento na adição do Nb, superior a 2,5% em peso. A dureza apresentada com maior média teve um valor de 60 HRC para adição simultânea dos dois arames de (FeCrC+Ti) e (FeCrC+Nb), os testes feitos com amanteigamento apresentaram uma tendência de diminuição da dureza, mas não teve valores muito expressivo nas análises.

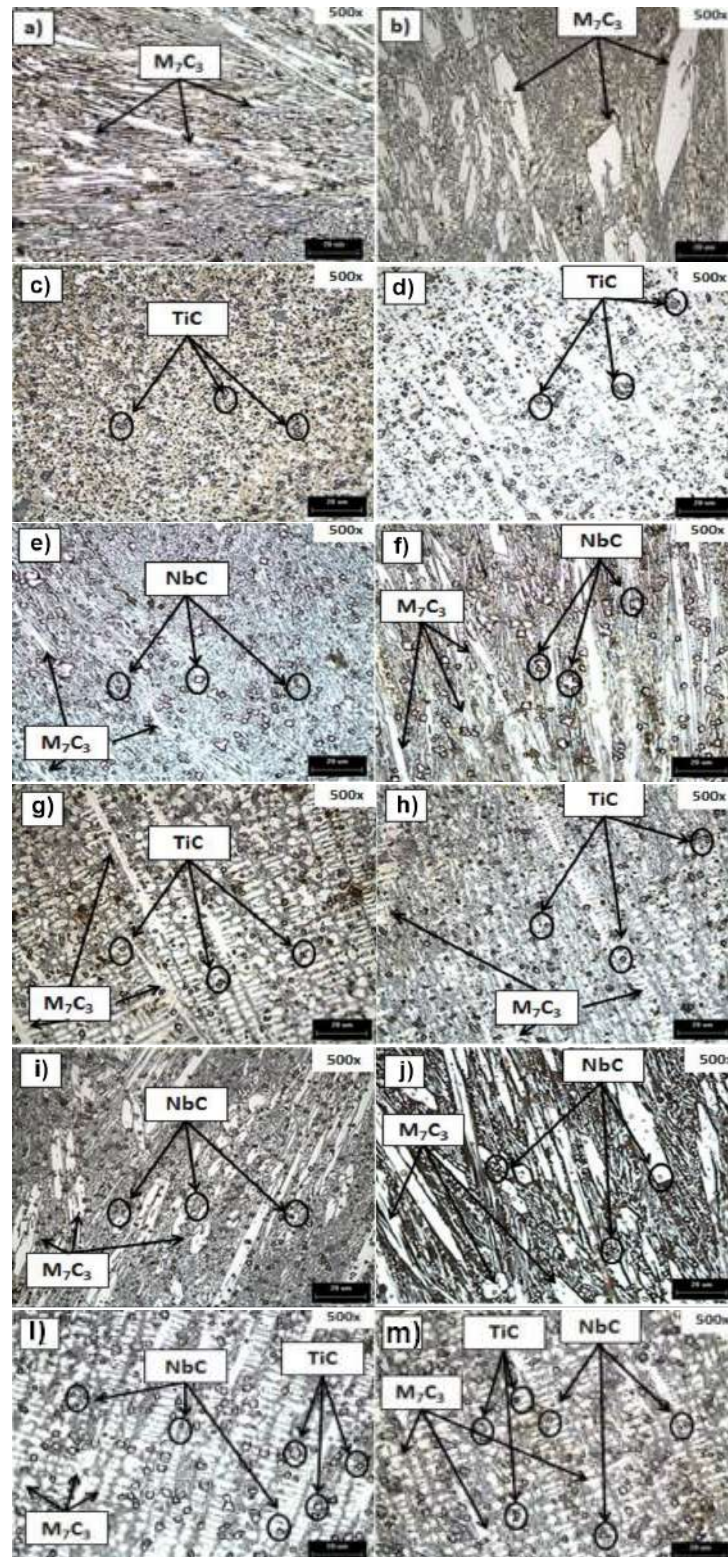
O trabalho de Chaidemenopoulos et al. (2019), realizando os testes com três tipos de revestimento duro em chapa de metal AISI 4130 pelos processos FCAW ($D_a = 1,6$ mm para todos os testes) e SMAW, com três eletrodos de composição química diferente listado na Tab. 2.14. Na amostra A foi com FCAW, a temperatura para formação de austenita foi de 1.450°C e do carboneto de tungstênio foi de 1.245°C . As fases detectadas foram austenita, ferrita, carboneto de tungstênio, η -carboneto Fe_3W_3C e formação de austenita retida na matriz devido ao resfriamento. A Fig. 2.31 apresenta o "Região 1" cinza escuro uma composição de 22,5 % em peso de C, 1,3 % Cr, 71,00 % Fe e 5,2 % de W, e relação $[Fe + Cr]/C$ de 3,21%. No "Região 2", região branca, ocorreu a formação de 55,50% de C, 0,50 % Fe e 44% de W. No revestimento B realizado pelo processo SMAW, a solidificação do NbC começa 1.931°C e carboneto primário a 1.330°C , a austenita em sua formação começa em 1.250°C . No revestimento C pelo processo SMAW, a solidificação começa em 1.330°C para a formação do carboneto primário, com a austenita começando em 1.282°C . Além disso, foi apresentado uma fina camada de austenita entre o material base e de revestimento. No revestimento feito em A, pelo processo FCAW, não apresentou falha superficial na soldagem, com microdureza variando de 650-1080 HV_{0,3} mostrado na Fig. 2.32. Os valores da microdureza em B ficaram entre 730-825 HV_{0,3} e em C a microdureza variou entre 600-740 HV_{0,3}. A adição de Nb com eletrodo B ocorreu precipitação dos carbonetos primários.

Tabela 2.14: Composição química dos eletrodos usados nos revestimentos

Eletrodo	C	Cr	Nb	W	Ni	Mn	Si	WC	Fe
A	0,80	2,20	-	1,80	-	0,40	1,20	0,50	Bal.
B	5,50	21,00	7,00	-	-	-	1,30	-	Bal.
C	3,50	31,00	-	-	0,22	0,85	1,10	-	Bal.

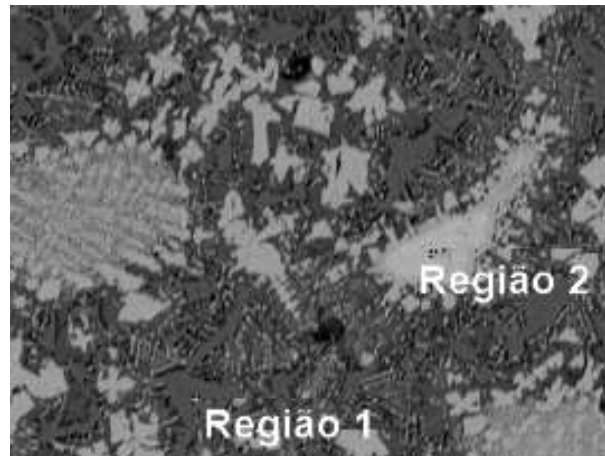
Fonte: modificada de Chaidemenopoulos et al. (2019)

Figura 2.30: Microestrutura dos revestimentos feitos com as condições: (a) FeCrC-FeCrC, (b) FeCrC-FeCrC com amanteigamento, (c) FeCrC-FeCrC+Ti, (d) FeCrC+Ti-FeCrC+Ti, (e) FeCrC+Nb-FeCrC+Nb, (f) FeCrC+Nb-FeCrC+Nb com amanteigamento, (g) FeCrC-FeCrC+Ti, (h) FeCrC-FeCrC+Ti com amanteigamento, (i) FeCrC-FeCrC+Nb (j) FeCrC-FeCrC+Nb com amanteigamento, (l) FeCrC+Ti-FeCrC+Nb e (m) FeCrC+Ti-FeCrC+Nb com amanteigamento



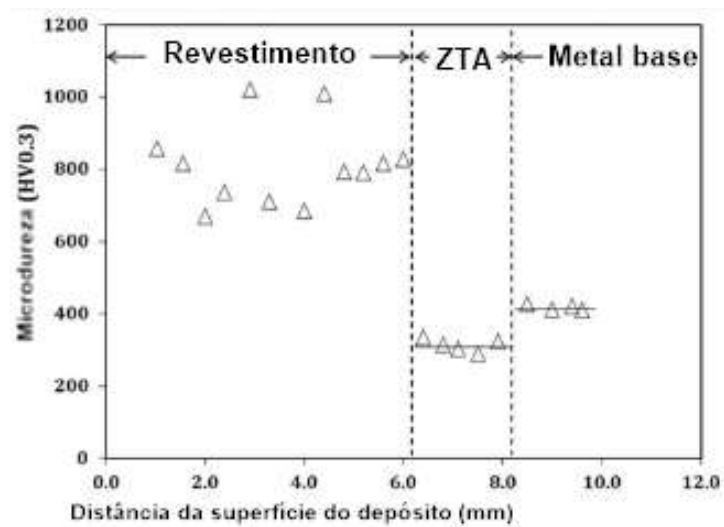
Fonte: Souza e Ferraresi (2017)

Figura 2.31: Micrografia SEM da microestrutura do composto depositado por FCAW, os pontos indicam o local da melhor performance da análise



Fonte: modificada de Chaidemenopoulos et al. (2019)

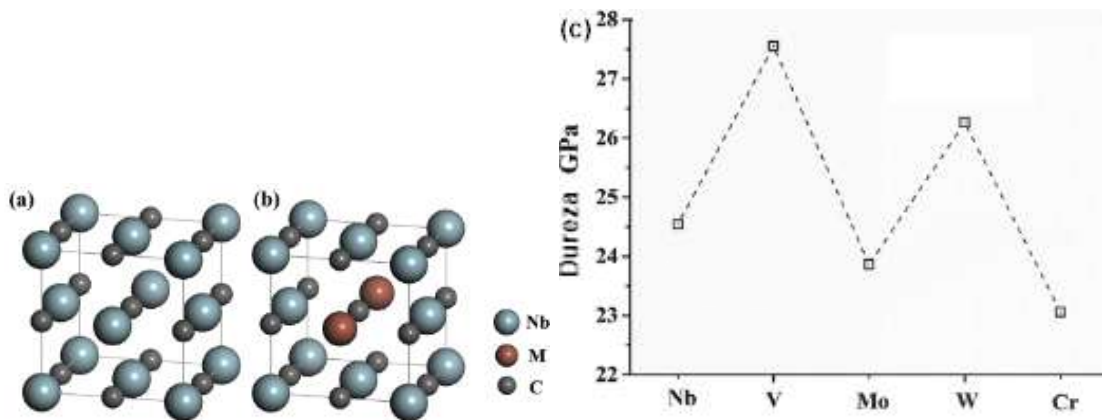
Figura 2.32: Distribuição da microdureza no revestimento duro



Fonte: modificada de Chaidemenopoulos et al. (2019)

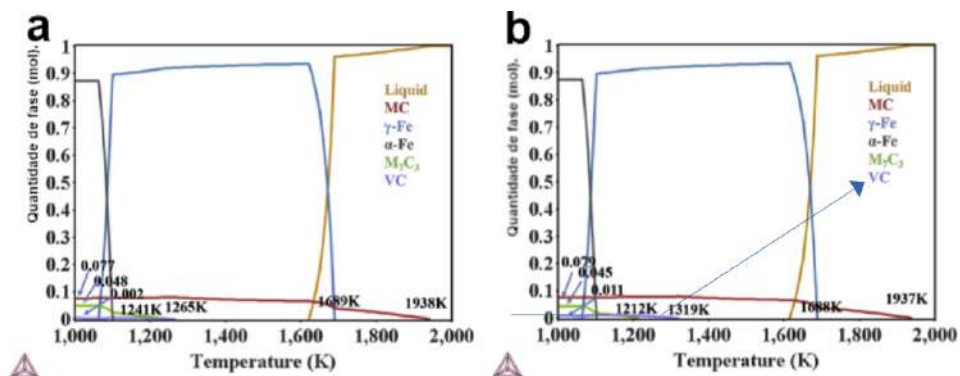
Usando processo FCAW para o revestimento com o objetivo de estudar a relação do comportamento do carboneto de nióbio com adição dos elementos V, Mo, W e Cr na estabilidade, dureza e na combinação com o carboneto primário (Nb, M)C. A Fig. 2.33-ab representa a estrutura cúbica de face centrada na formação do revestimento, onde o Nb do carboneto foi substituído pelos elementos adicionados de V, Mo, W e Cr. O gráfico da Fig. 2.33c mostra o comparativo dos testes de dureza com os elementos adicionados de V, Mo, W e Cr na liga de revestimento com os carbonetos (Nb, M)C. A adição de V e W é o principal fator para o aumento da dureza com relação aos elementos Mo e Cr. Pelo diagrama de fase representado na Fig. 2.34, a formação do VC ocorreu a partir de 0,8%p do vanádio, observa a formação do VC e a precipitação dos carbonetos primário, (ZHAO et al., 2019). Essa precipitação dos carbonetos primário foi observado nos trabalhos de Liu et al. (2016), Liu et al. (2018), Souza e Ferraresi (2017), Liu, Wei e Liu (2015) e Chaidemenopoulos et al. (2019) devido a adição de outros elementos.

Figura 2.33: Formação da estrutura do NbC e (Nb,M)C e dureza teórica dos carbonetos



Fonte: modificada de Zhao et al. (2019)

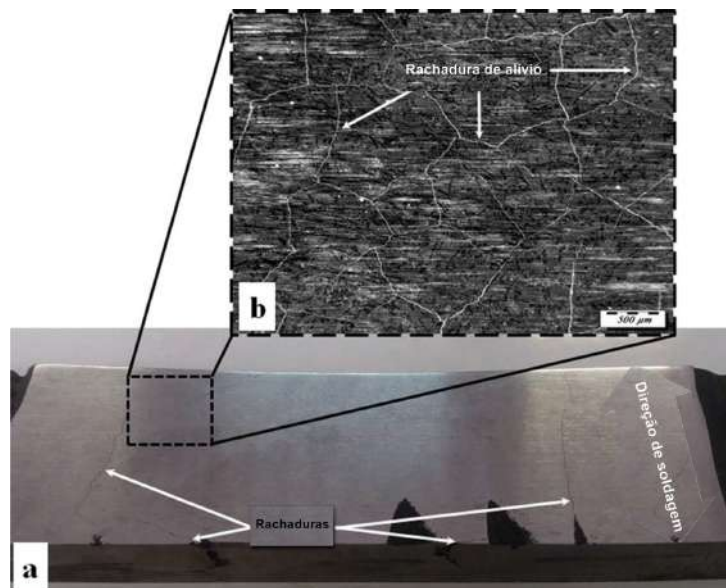
Figura 2.34: Diagrama de fase da formação do VC com relação ao teor do V em %p, a) com 0,8% de V e b) 1,0% de V



Fonte: modificada de Zhao et al. (2019)

Contudo, nesse tipo de deposição há um problema sistêmico para o revestimento que é a formação de trincas ao longo do cordão de solda, representado pela Fig. 2.35, conforme Bahoosh, Shahverdi e Farnia (2019). Utilizando o processo FCAW para revestimento depositado na base do aço st37 com composição química do eletrodo listado na Tab. 2.15, com aplicação do cordão de solda em duas camadas. Os testes apresentaram formação das trincas e carbonetos primário $M_7(CB)_3$ nas amostras. Na Fig. 2.36, a estrutura formada pelo processo de soldagem foi com os caboboretos de nióbio (3 %vol.), carboboretos de Fe/Cr (25%vol.), $M_7(CB)_3/M_{23}(CB)_6$ no núcleo eutético (34 %vol.) e ferrita (38%vol.). Mesmo com essas trincas de solidificação, os testes abrasivos do revestimento em comparação com outras ligas de materiais, a dureza e resistência abrasiva foram superiores como representado pela Fig. 2.37. A dureza foi maior para revestimento feito por soldagem, em média de 911 HV, e maior para resistência abrasiva (AWR), em média de $463 \text{ l}/(\text{mm}^3/\text{m})$.

Figura 2.35: Trincas na superfície da solda



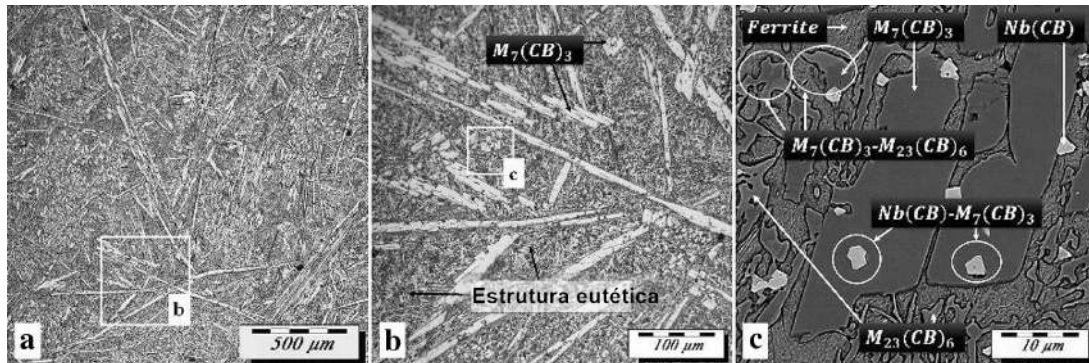
Fonte: modificada de Bahoosh, Shahverdi e Farnia (2019)

Tabela 2.15: Composição química material de solda

Cr	B	Nb	Si	C	Fe
18	6	5	2	2	Bal.

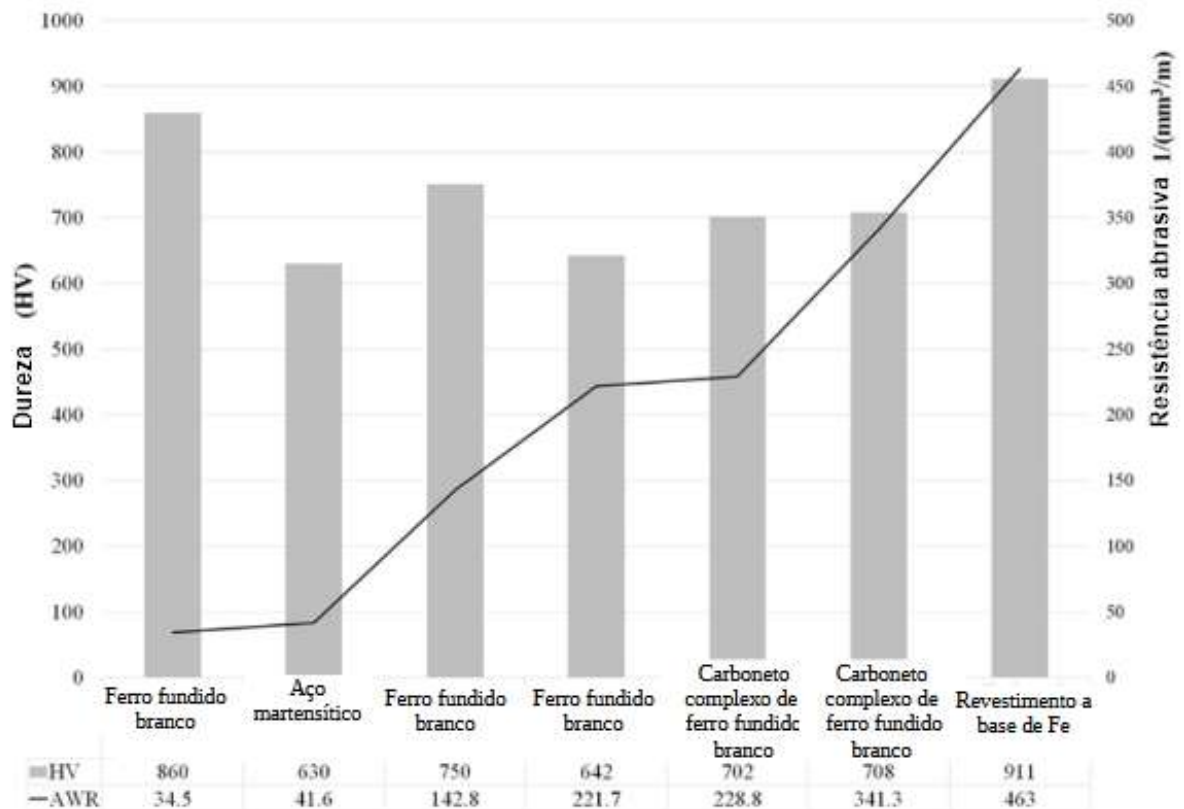
Fonte: Bahoosh, Shahverdi e Farnia (2019)

Figura 2.36: Microestrutura do revestimento duro



Fonte: Bahoosh, Shahverdi e Farnia (2019)

Figura 2.37: Resistência abrasiva e dureza do revestimento duro na liga a base de Fe



Fonte: modificada de Bahoosh, Shahverdi e Farnia (2019)

Também foi observado a incidência de trincas com adição do Nb no trabalho de Luz et al. (2020) utilizando o processo FCAW ($I = 256$ A, $U = 28$ V, $v_a = 10$ cm/min, $v_s = 30$ cm/min, DBCP = 40 mm, $D = 19,6\%$ e $E = 1.433,6$ J/mm), representadas na Fig. 2.38. Utilizando arame tubular de $FeCrC$ e $FeCrC + Nb$ com composição química listado na Tab. 2.16. O revestimento com adição do Nb apresentou poucas trincas, menos carbonetos primários (M_7C_3) e mais carbonetos de nióbio (NbC), formando um refinamento na microestrutura. O revestimento com $FeCrC$ teve a formação de carbonetos primários na matriz eutética de austenita. Esses carbonetos morfologicamente eram hexagonais e em forma de agulha com adição do Nb, mostrado na Fig. 2.39. Para adição de $FeCrC$, em média a microdureza foi maior em relação a liga com adição de Nb. A microdureza para $FeCrC$ foi de 1.150 HV, com adição do Nb teve um valor médio de 900HV.

Figura 2.38: Resultado com líquido penetrante nas trincas com revestimento de 1 e 2 camadas com $FeCrC$ ou $FeCrC + Nb$



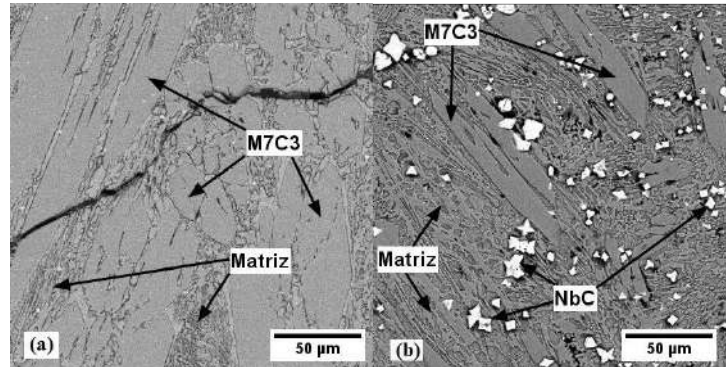
Fonte: Luz et al. (2020)

Tabela 2.16: Composição química do eletrodo para revestimento duro

	C	Si	Cr	Mn	Nb
$FeCrC$	5,00	1,50	27,00	1,5	-
$FeCrC + Nb$	5,00	1,20	22,00	0,5	7,00

Fonte: Luz et al. (2020)

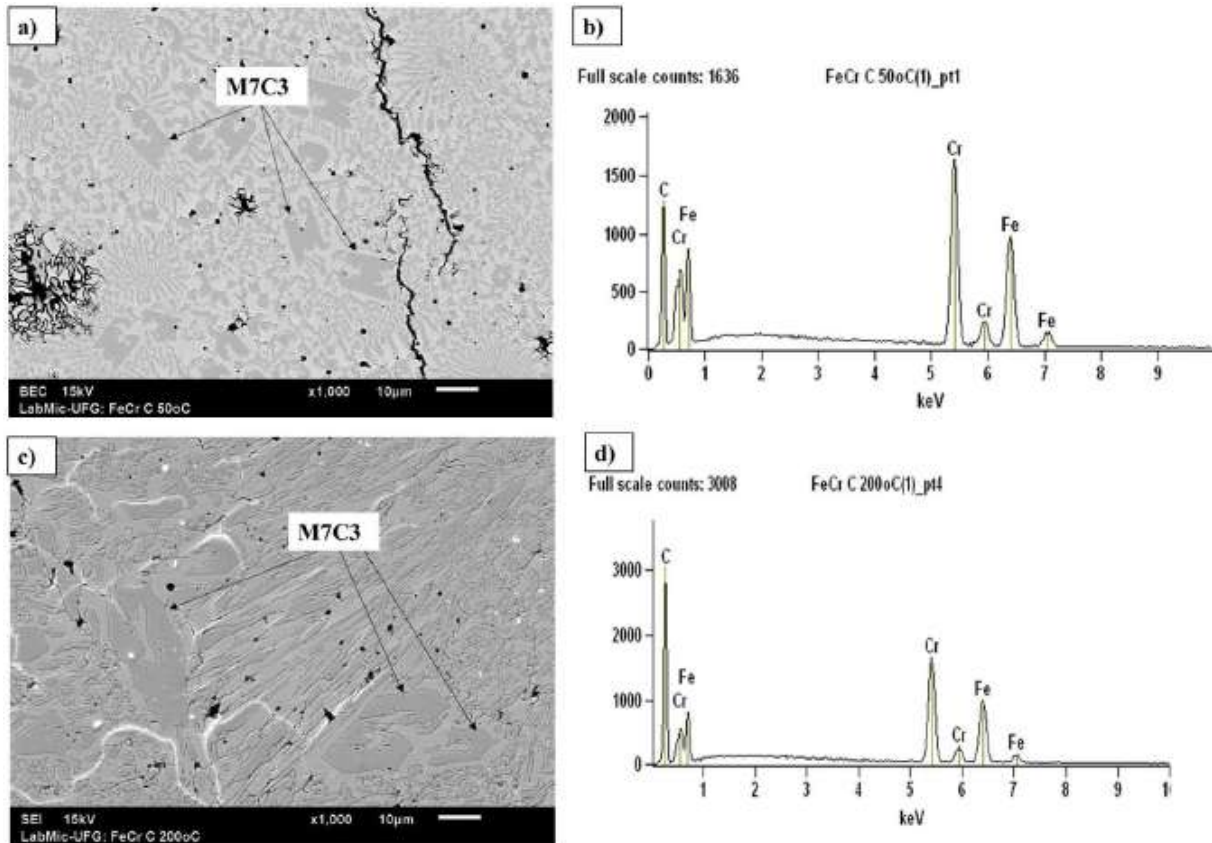
Figura 2.39: Micrografia via MEV de ambas ligas, a) FeCrC e b) FeCrC+Nb



Fonte: Luz et al. (2020)

No trabalho de Marques (2023), usando elemento de adição como base o FeCrC e adicionando os elementos químicos Nb e Ti com alimentação dos arames de forma simples e duplas (FeCrC, FeCrC + FeCrCNb e FeCrC + FeCrCTi), temperatura interpasse de 50°C e 200°C pelo processo FCAW, parâmetro para arame energizado ($U = 42 \text{ V}$, $v_a = 8 \text{ m/min}$, $v_s = 30 \text{ cm/min}$, DBCP = 22 mm) e parâmetro para arame não energizado ($U = 42 \text{ V}$, $v_a = 4 \text{ m/min}$, $v_s = 30 \text{ cm/min}$, DBCP = 22 mm). Na microestrutura teve a formação de carbonetos simples como observado na Fig. 2.40, segundo o autor foi observado austenita em matriz eutética (austenita mais carbonetos) e trincas de solidificação. A dureza não foi significativa com relação a temperatura de interpasse, sendo a média de dureza de 56,3 e 53,9 HRC para 50 e 200°C, respectivamente.

Figura 2.40: Microestrutura do revestimento FeCrC 50°C com MEV, b) EDS das regiões M_7C_3 para 50°C, c) microestrutura do revestimento FeCrC 200°C com MEV, d) EDS das regiões M_7C_3 200°C



Fonte: Marques (2023)

2.3.4 Influência dos parâmetros

Os parâmetros de soldagem, como a corrente elétrica, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação, gás de proteção e condições, são fatores que afetam a qualidade do cordão de solda. Controlando esses parâmetros pode evitar ou amenizar falhas como falta de fusão, trincas e porosidades. Portanto, cada parâmetro pode ter efeito específico e ter variações diferentes dependendo do processo que está utilizando.

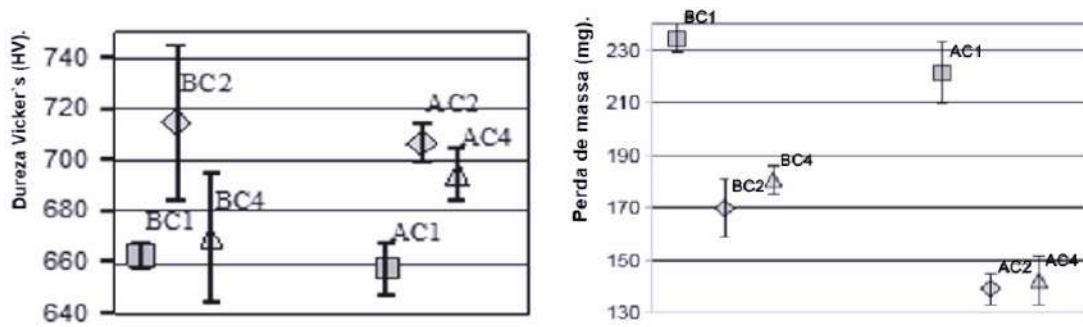
Energia de soldagem

A energia de soldagem pode influenciar significativamente nas características do cordão de solda e na microestrutura, por está diretamente relacionado com a tensão e corrente de soldagem, porém inversamente relacionada com a velocidade de soldagem.

E, para analisar essa influência no revestimento, o trabalho de Colaço e Maranhão (2013) realizado pelo processo FCAW ($D_a = 1,6$ mm base FeCrC+Ti), com testes abrasivos na roda de borracha e energia de soldagem baixa de $815 (\pm 15)$ e alta de $1.467 (\pm 56)$ J/mm.

Verificando os resultados, com alta energia de soldagem teve a influência na diminuição percentual do carboneto de titânio, como também, menor perda de massa em relação a aplicação com baixa energia de soldagem. A dureza não foi significativo em relação a baixa e alta energia, representado pela Fig. 2.41.

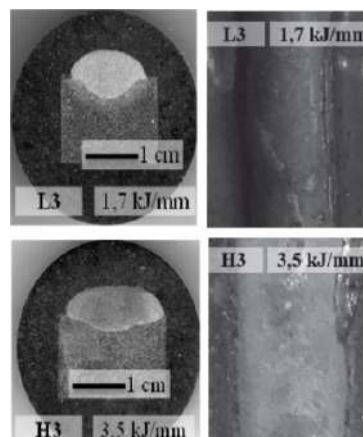
Figura 2.41: Perda de massa (mg) dos revestimentos em relação a energia de soldagem, A - Alta energia de soldagem e B - Baixa energia de solda



Fonte: modificada de Colaço e Maranhão (2013)

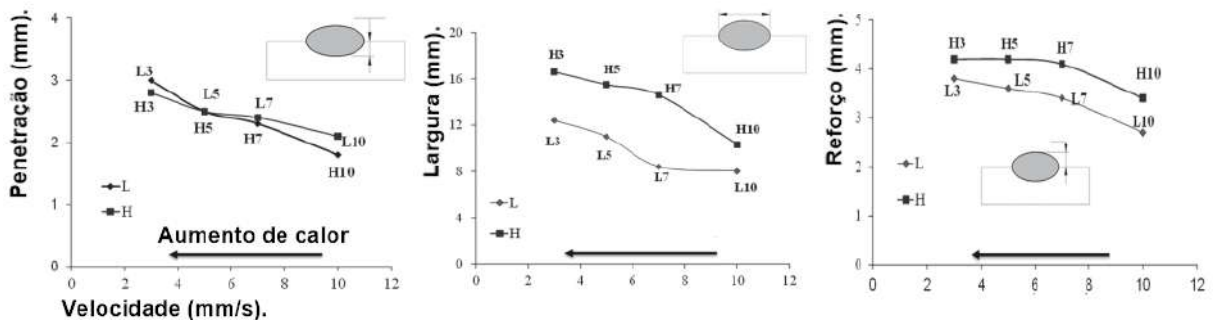
A relação de potência elétrica associado entre baixo (L) de 5 kW e alto (H) de 10,5 kW foi analisado por Gualco, Svoboda e Surian (2014), processo FCAW-S, ($D_a = 1,6$ mm, $I = 300$ A, $U = 35$ V e $V_a = 5$ mm/s). O revestimento foi feito em chapas de aço SAE 1010. A Fig. 2.42 representa o cordão de solda entre dois testes com aplicação de diferente quantidade de energia, com baixa (L) e alta (H). De forma geral, o cordão de solda apresentou maior largura, maior reforço e maior penetração para alta energia, como apresentado pela Fig. 2.43. A média de dureza para L foi de 869 HV2 e 831 HV2 para H. Segundo o autor, a diluição pode ter interferido nos resultados dos testes de dureza.

Figura 2.42: Testes feitos para velocidade de 3 mm/s com dois tipos diferentes de potência, L para 5,0 kW e H para 10,5 kW



Fonte: Gualco, Svoboda e Surian (2014)

Figura 2.43: Comparativo entre penetração, largura e reforço em relação a potência, L para 5,0 kW e H para 10,5 kW



Fonte: modificada de Gualco, Svoboda e Surian (2014)

A diluição não foi significativa para os testes de dureza no trabalho de Colaço et al. (2012), usando o processo FCAW ($D_a = 1,60$ mm, $V_s = 5$ mm/s e DBCP = 20 mm,) para analisar como a influência da energia de soldagem interfere no desgaste abrasivo dos materiais. O experimento foi utilizando fonte eletrônica Inversal 450 automática que permitia um controle da velocidade de soldagem com o sistema de gerenciamento SAP. Os níveis de energia para depositar os cordões de solda foram 800 J/mm e 1.500 J/mm, considerados como baixa (B) e alta energia (A), respectivamente. Outros parâmetros foram considerados como listado pela Tab. 2.17. Para (A), o reforço e a largura ficaram maiores em relação a (B), porém (B) teve diluição de 48,28%, e (A) de 35,03%. Os testes de dureza não tiveram significâncias na variabilidade entre (A) e (B), tendo uma média para (A) de 63,6 HRC e (B) de 63,4 HRC, Fig. 2.44. As perdas de massa apresentaram um valor médio de 0,2163 g para (A) e 0,2056 g para (B), sendo maior perda para amostra (A), representado pela Fig. 2.45, sem muita significância.

Tabela 2.17: Parâmetro aplicado nos cordões de solda

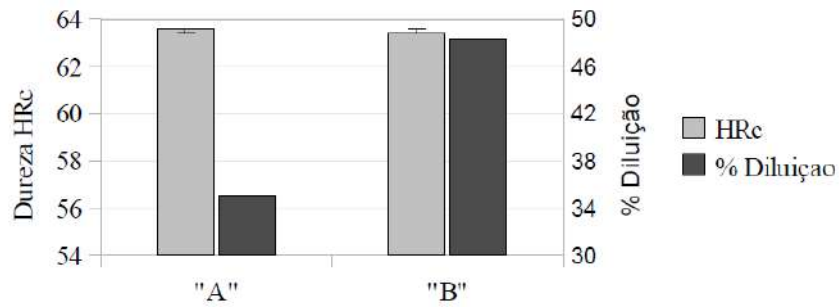
Energia de soldagem	Tensão (V)	Corrente (A)	v_a (mm/s)
Baixa	25	165	50
Alta	28	265	117

Fonte: modificada de Colaço et al. (2012)

Velocidade de soldagem

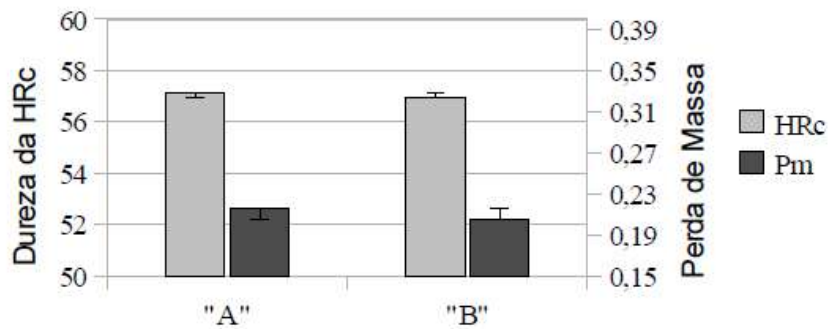
Com o aumento da velocidade da soldagem teve uma diminuição na penetração, largura e reforço do cordão de solda, como está representado na Fig. 2.46 do trabalho de Gualco, Svoboda e Surian (2014). A fase eutética aumentou com aumento da velocidade de soldagem.

Figura 2.44: Média de dureza versus diluição dos cordões de soldas



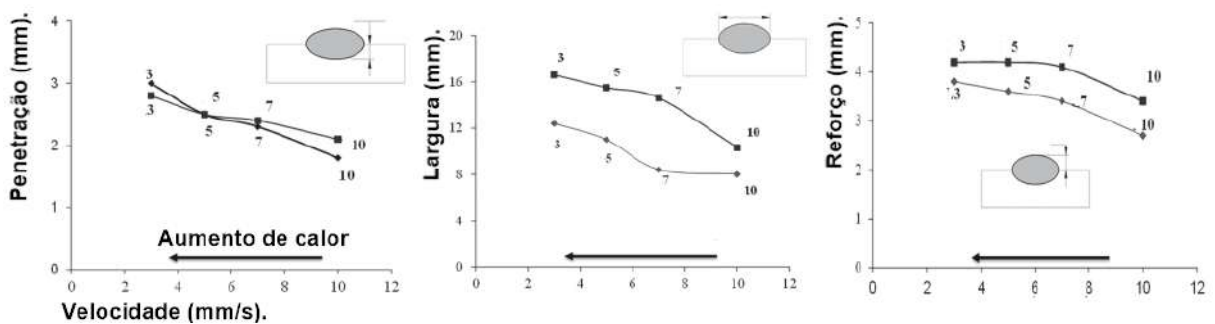
Fonte: modificada de Colaço et al. (2012)

Figura 2.45: Média de dureza versus perda de massa dos cordões de soldas



Fonte: modificada de Colaço et al. (2012)

Figura 2.46: Comparativo entre penetração, largura e reforço em relação a velocidade da soldagem de 3, 5, 7 e 10 mm/s



Fonte: modificada de Gualco, Svoboda e Surian (2014)

Com a utilização do processo FCAW e arame FeCrC+Nb ($D_a = 1,6$ mm) para analisar o planejamento experimental sobre a influência das variáveis de soldagem sobre a geometria dos cordões de solda para os testes realizados com 16 amostras. O objetivo é obter melhores respostas para os testes com relação a diluição, largura e reforço do cordão de solda. As variáveis utilizadas foram a tensão (U), velocidade de alimentação (v_a) e velocidade de soldagem (v_s). As respostas foram analisadas em relação ao R/L (Reforço/Largura) e A_r/A_f (Área reforço/Área fundida). A significância para os testes feitos pela ANOVA foi de 5%. Para A_r/A_f a variabilidade foi significativa em relação às variáveis v_s e v_a , com R/L a variabilidade foi significativa para v_s e v_a . A tensão (U) e interação $U \times v_a$ obteve o melhor desempenho com $U = 32$ V, $v_a = 14$ m/min e $v_s = 50$ cm/min, isto com uma DBCP = 35 mm, (CAVALCANTE et al., 2020).

Outro estudo, com o objetivo de estudar como a velocidade de soldagem (v_s) pode influenciar no rendimento de deposição (Rd - relação de material fundido e o que foi depositado) aplicado em camisa de moendas e, com objetivo de reduzir o descarte dos metais perigosos ao meio ambiente e nocivo ao homem com a redução do Rd. As velocidades de soldagem para o revestimento com processo FCAW foram de 6, 10 e 13,6 m/min, com os resultados calculou o Rd pela pesagem dos materiais que usou no revestimento e os respingos coletados após a soldagem. Utilizando o arame tubular de dureza 57-62 HRC, diâmetro 2,8 mm, aplicado no material base de ferro fundido nodular Tipo GGG-60. A velocidade foi um fator que teve influência no Rd, obtendo uma redução nos testes para Rd de 20,22% aumentando v_s de 6 para 10 m/min e, uma redução de 20,08% quando v_s foi de 10 para 13,6 m/min, isso se explica devido à velocidade maior que dificulta a diluição do arame de solda e formação de poça de fusão. A v_s que obteve melhor resultado foi de 6 m/min, porém teve uma média de horas trabalhadas para soldar uma camisa de 8 horas, mesmo assim, houve uma economia no processo de 24,25% nos custos finais comparada com a velocidade padrão de v_s 10 m/min, além disso, sem perda de qualidade nos cordões de solda, (MURAD; FERARESSI; SALES, 2020).

Pelo processo FCAW, analisando a resistência abrasiva da liga de FeCrC, com arame tubular autoprottegido e cinco diferentes parâmetros, representado na Tab. 2.18. A Tab. 2.19 mostra a composição química dos elementos empregados no processo que foi analisado a microestrutura e resistência. Na microestrutura representado pela Fig. 2.47, encontra na matriz eutética (região mais acinzentada) do revestimento feito com FeCrC, presença de carbonetos primários M_7C_3 na região mais clara, na região mais escura é composta de matriz de ferro. Na figura, é apresentada uma fração volumétrica em C1 de 40% de carbonetos, C2 de 44%, C3 de 45% e C4 em torno de 36%. O resultado teve uma diferença significativa na fração volumétrica entre C1 e C3, podendo está relacionado a corrente de soldagem do arame de C3. Entre C1 e C2 essa diferença pode está relacionado a menor energia de soldagem por apresentar maior velocidade de soldagem para C2 como mostrado na Tab. 2.18. Em C4, menor velocidade de soldagem, teve maior inserção de matéria

prima e gradiente térmico aumentando a diluição, reduzindo a nucleação e crescimento dos carbonetos, (SOUSA et al., 2021).

Tabela 2.18: Parâmetro usado na soldagem

Parâmetro	C1	C2	C3	C4
Média da corrente (A)	285	286	349	325
Energia da solda(J/mm)	1.277	772	1.366	1.242
Média da tensão (V)	28	28	32	32
Velocidade do arame (m/min)	10	10	14	12
Velocidade de soldagem (m/min)	5,0	8,30	5,0	6,7

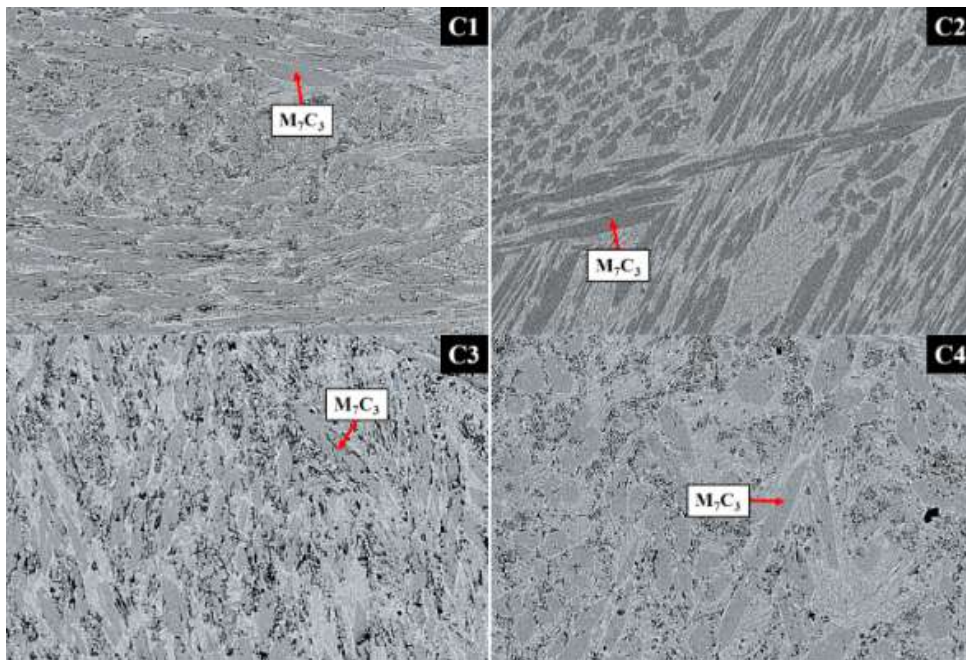
Fonte: modificada de Sousa et al. (2021)

Tabela 2.19: Composição química dos elementos de ligas

	% em peso					
	C	Mn	P	S	Cr	Fe
Base	0,2	0,3-0,6	0,04	0,05	-	Bal.
Matéria prima	5,5-7,0	0,3	-	-	22,0	Bal.

Fonte: modificada de Sousa et al. (2021)

Figura 2.47: Revestimento com FeCrC das amostras C1, C2, C3 e C4



Fonte: Sousa et al. (2021)

2.3.5 Influência da microestrutura no revestimento

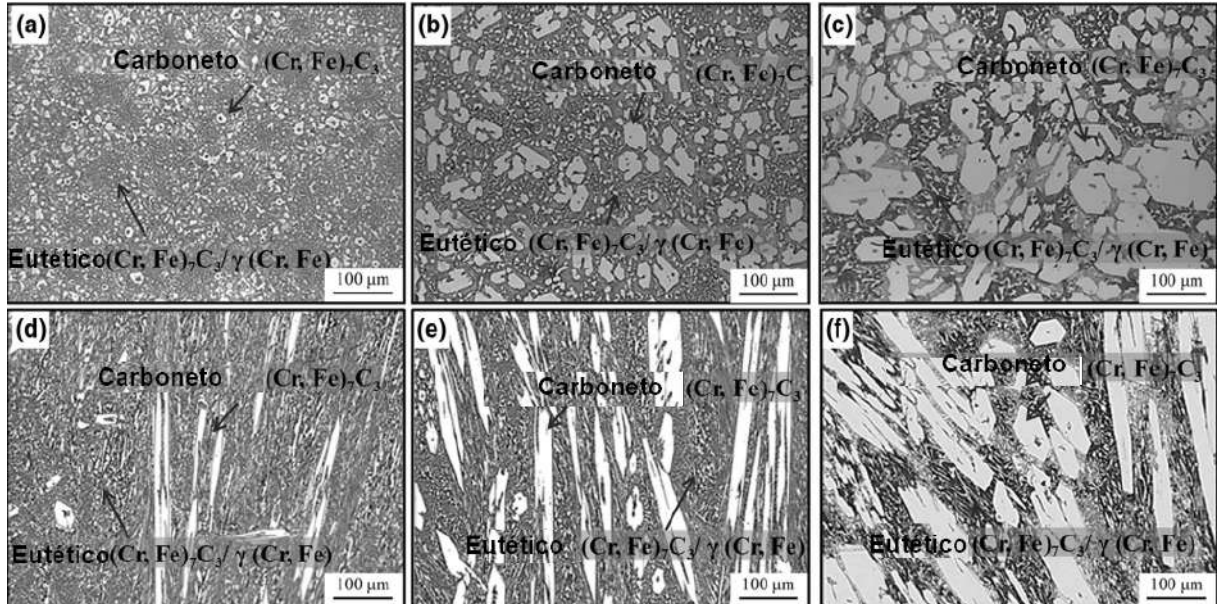
O trabalho de Zhou et al. (2018) analisa a influência da fração de alto volume dos carbonetos primários $(Cr, Fe)_7C_3$ no comportamento do desgaste com a composição química do revestimento representa pela Tab. 2.20. Para os testes foram realizados com uma camada de aproximadamente de 5,8 a 6,2 mm, utilizando o processo FCAW ($D_a = 3,2$ mm, $I = 200-220$ A, $U = 22-26$ V e $v_s = 300$ mm/min) depositado em chapa de aço ASTM 1045. Toda investigação foi considerando o efeito da taxa Cr/C. Os testes foram realizados em roda de borracha com variação de carregamento entre 1-50 N. As características da microestrutura estão representado na Fig. 2.48, consiste em carboneto $((Cr, Fe)_7C_3)$ poligonal em forma de bastão. O tamanho dos carbonetos da amostra em B é maior que o da amostra A, aumentando com precipitação da fase eutética, conforme Fig. 2.48-ab. Seguindo o crescimento dos carbonetos para amostra C, representado pela Fig. 2.48c. Quando a razão Cr/C caiu de 7,8 para 4,9 a fração de massa do carboneto aumentou 8,1 para 41,9%. No processo, a relação entre Cr e C afeta diretamente a taxa de nucleação. A morfologia dos revestimentos com diferentes razões Cr/C na seção transversal vertical é mostrada pela Fig. 2.48-def. Durante o processo a microestrutura do carboneto cresce na direção do resfriamento. A Fig. 2.49 representa um aumento de dureza para diminuição da razão Cr/C. A microdureza máxima foi da amostra C que teve uma menor perda de massa nos testes realizados devido maior quantidade de formação dos carbonetos.

Tabela 2.20: Composição química do revestimento de MMC reforçada com partículas

Amostras	Elementos químicos(%)							Fração Cr/C
	C	Cr	Si	Mn	P	S	Fe	
A	3,48	27,21	1,23	1,25	0,03	0,02	Bal.	7,8
B	4,52	27,19	1,09	1,23	0,02	0,02	Bal.	6,0
C	5,47	26,87	1,15	1,18	0,03	0,02	Bal.	4,9

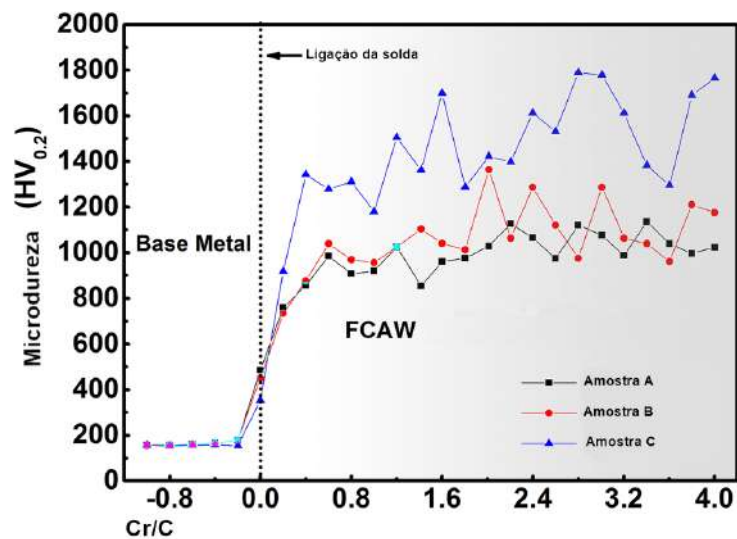
Fonte: modificada de Zhou et al. (2018)

Figura 2.48: Microestrutura formada no revestimento com diferente taxa de Cr/C, em a) seção transversal horizontal superior da amostra A, b) seção transversal horizontal superior da amostra B, c) seção transversal horizontal superior da amostra C, d) seção transversal na vertical da amostra A, e) seção transversal na vertical da amostra B e e) seção transversal na vertical da amostra C



Fonte: produzida pelo autor com modificações do trabalho de Zhou et al. (2018)

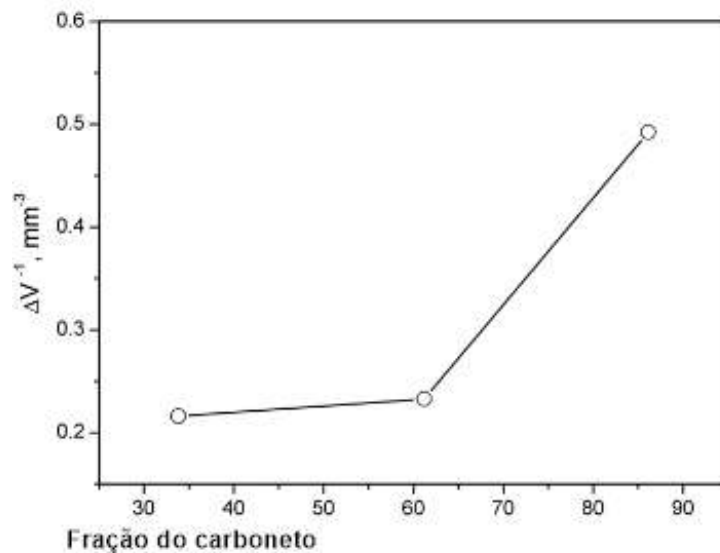
Figura 2.49: Microdureza dos revestimentos das amostras A, B e C com diferentes razões de Cr/C



Fonte: modificada de Zhou et al. (2018)

Usando o processo FCAW para revestimento com arame de FeCrC ($I = 350$ A e $U = 33$ V), observou-se melhora da resistência ao desgaste do revestimento no trabalho Chang et al. (2010a) devido a grande quantidade de carboneto primário que formou uma barreira ao desgaste abrasivo. A Fig. 2.50 mostra essa relação não linear do aumento dos carbonetos e perda de massa, com uma curvatura de forma acentuada quando há um aumento expressivo na quantidade dos carbonetos. As fases apresentadas na estrutura para os ensaios realizados foram a austenita e carbonetos primários. Na microestrutura, os carbonetos apresentam em forma de lâminas e bastão na colônia eutética conforme Fig. 2.51, dependendo do teor de carbono no revestimento. Na estrutura, a taxa de Cr/Fe foi similar entre as formas de lâminas e bastão dos carbonetos, com 1,31 em forma de lâmina e 1,29 em forma bastão. Essa relação Cr/Fe foi em torno de 0,14 para colônia eutética.

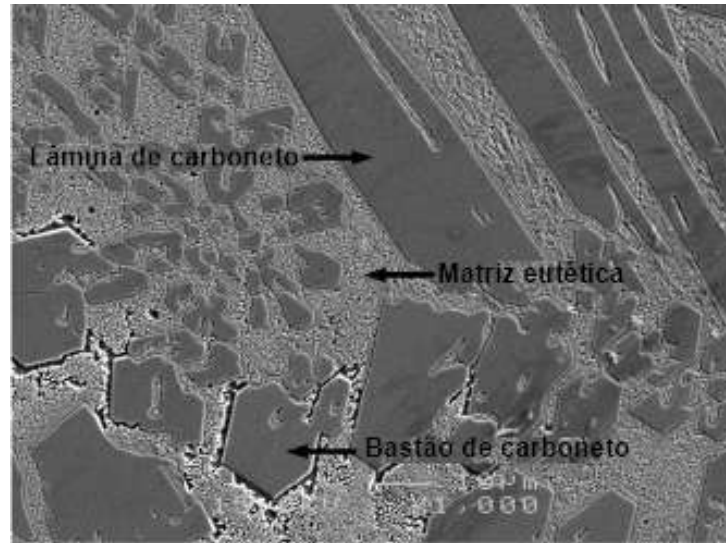
Figura 2.50: Efeito da fração superficial do carboneto na resistência ao desgaste do revestimento duro



Fonte: modificada de Chang et al. (2010a)

No trabalho de Sousa et al. (2021), são estudadas a relação de dureza e a fase da microestrutura com o processo FCAW, consumível a base de FeCrC com material de base SAE 1020 entre 4 amostras. A Fig. 2.52a representa a variação da microdureza em relação ao volume carbonetos e Fig. 2.52b representa a microdureza em relação a diluição das quatro amostras. A relação entre média da microdureza foram diretamente proporcional a fração volumétrica dos carbonetos e, inversamente proporcional a diluição. Para maiores microdurezas e fração de carbonetos por volume ficaram entre as amostras C2 e C3 e tiveram menores taxas de desgaste, como menor diluição.

Figura 2.51: Micrografia SEM realizada na estrutura hipereutética no revestimento de FeCrC



Fonte: modificada de Chang et al. (2010a)

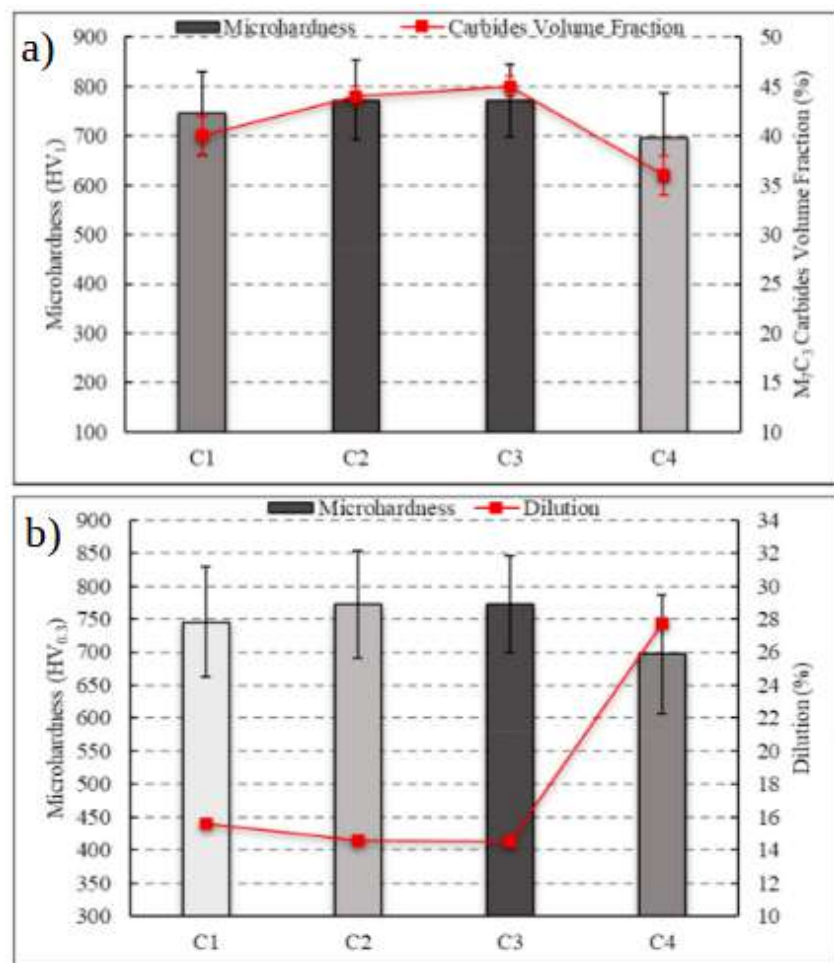
A relação da microestrutura e dureza também foi observada no trabalho de Bahoosh, Shahverdi e Farnia (2018). O revestimento foi feito com processo FCAW, com gás de proteção 75%Ar-25%CO₂ ($D_a = 1,6$ mm, $I = 220$ A e $U = 24$ V). A Tab. 2.21 mostra a composição química do eletrodo empregado nos testes realizados. A análise da microestrutura feito por escaneamento microscópio eletrônico e difração de raio-X, na microestrutura apresentou a existência de carboboreto primário rico em ferro e cromo ($M_7(CB)_3$), carboboreto de nióbio ($Nb(CB)$) e ferrita, representado pela Fig. 2.53 com formação dos carboboretos eutéticos $M_{23}(CB)_6$ na poça de fusão. O revestimento teve uma dureza de 911 HV_{30} , isto se deve pela formação dos carboboretos em sua microestrutura. Os carboboretos primários $M_7(CB)_3$ apresentaram menor tenacidade à fratura que os carboboretos complexos $M_{23}(CB)_6$.

Tabela 2.21: Composição química do metal de solda % em peso

Cr	B	Nb	Si	C	Fe
18	6	5	2	2	Bal.

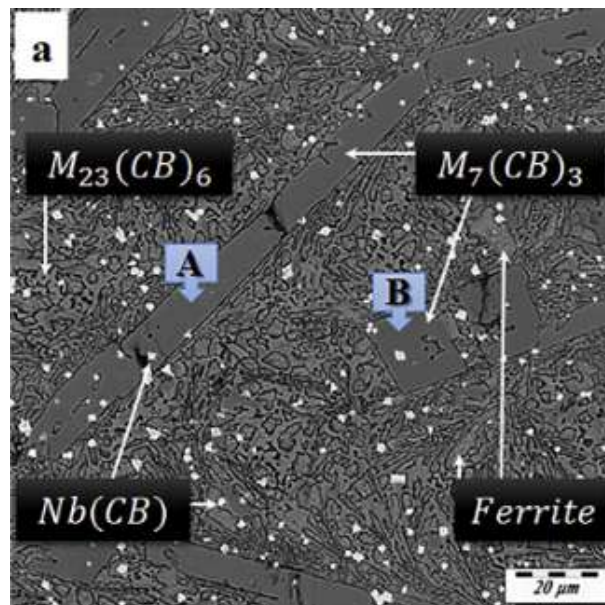
Fonte: Bahoosh, Shahverdi e Farnia (2018)

Figura 2.52: Em a) Volume fracionado dos carbonetos M_7C_3 e b) diluição (%) em relação a microdureza das amostras C1, C2, C3 e C4



Fonte: modificada de Sousa et al. (2021)

Figura 2.53: Microestrutura do depósito do revestimento duro



Fonte: Bahoosh, Shahverdi e Farnia (2018)

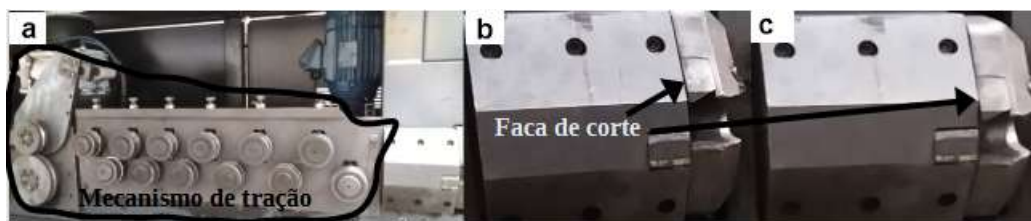
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais e Equipamentos

3.1.1 Máquina de corte

A máquina usada para o corte de vergalhão é Endreitadeira Automática End 02, com controle eletrônico automático do comprimento das barras, endireitamento através dos roletes de tração e velocidade de atuação de 90 m/min. A representação esquemática dos equipamentos envolvidos nos cortes dos vergalhões é mostrada na Fig. 3.1. A Fig. 3.1a mostra o mecanismo de tração das barras e as Fig. 3.1b e c representa atuação da faca que é por um braço acionado pelo moto redutor, quando movimentada seccionando o vergalhão. A Fig. 3.2 mostra as ferramentas de cortes em detalhe transversal. A funcionalidade para o processo de corte é da seguinte forma: há uma parte fixa na máquina que representa a base de apoio, a outra, é móvel para atuação nos cortes por cisalhamento simples. Para os testes, a inserção do vergalhão para realização dos cortes foi de forma manual. A escolha da inserção manual foi devido ao relato do operador que, no processo automático de alimentação do vergalhão, algumas vezes ocorriam o impacto do vergalhão com a faca, provocando desgaste prematuro da mesma por impacto.

Figura 3.1: a) Mecanismo de tração e endireitamento das barras de vergalhões, b) Faca em repouso e c) Faca atuando no corte

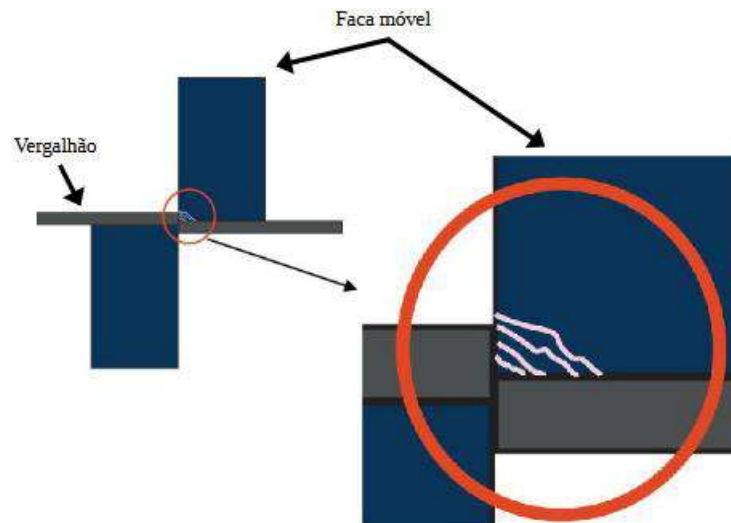


Fonte: produzida pelo autor

3.1.2 Facas

As facas de corte utilizadas são confeccionadas em aço ferramenta VC-131. O VC-131 é uma marca registrada da Villares Metals S/A para trabalho a frio. É um aço de alto desempenho e dureza, podendo ser empregado em matriz de corte, facas, tesouras, ferramenta para prensagem, moldes e ladrilhos, entre outros. Os aços similares são representados por AISI D6, DIN W.Nr.1.2436, EN X210CrW12, BS BP 20 e AFNOR 40 CMD8.

Figura 3.2: Parte das facas que sofre desgaste com o tempo de uso (linhas brancas) e os cortes realizado no vergalhão



Fonte: produzida pelo autor

A Tab. 3.1 mostra a composição química dos materiais D6 e VC131. Como não se encontrou registro das propriedades do aço VC-131 foram utilizados os dados para o Aço D6, que segundo o fabricante (Villares Metals S/A) apresenta similaridade entre o aço VC-131, compartilham as mesmas propriedades e características. As propriedades do material D6 estão apresentadas na Tab. 3.2.

Tabela 3.1: Comparativo da composição química dos aços D6 e VC-131

Material	C	Mn	P	S	Si	Cr	W	V
D6	2,00 - 2,20	0,20 - 0,40	0,03	0,03	0,20 - 0,40	11,50 - 12,50	0,60 - 0,80	-
VC-131	2,05	0,40	-	-	0,30	12,00	0,7	0,15

Fonte: produzida pelo autor de acordo com manual do fabricante, Ed. 15, 01.2021 e Htsteelmill (2022)

Para comparação, também foram utilizadas substrato de facas produzidas em aço de carbono comum (adquiridas no comércio local, sem composição química controlada).

Tabela 3.2: Propriedade do aço ferramenta D6

Propriedade	Métrica
Densidade	7,67 g/cm ³
Resistência	1320 MPa
Módulo de elasticidade	194 GPa
Dureza HRC	46
Expansão térmica	10,8 m/m ^{°c}
Condutividade térmica	20,5 W/mK

Fonte: produzida pelo autor de acordo com manual do fabricante, Htsteelmill (2022)

3.1.3 Material de adição

O arame utilizado para realização dos revestimentos por soldagem é o UTP AF LEDURIT 60, que, segundo o fabricante, pode ser aplicado na posição plana ou posição horizontal (junta de filete). O uso é específico para aplicação de revestimento resistente à abrasão e ao impacto. A Tab. 3.3 mostra as características do consumível como composição química, dureza, tipo de corrente e parâmetros para ser empregados no processo de soldagem.

Tabela 3.3: Dados químicos, características e parâmetros do arame usado na soldagem

Material	Composição	Dureza	Polaridade	θ_a (mm)	Parâmetros	Aplicação
UTP AF LEDURIT 60	C-4,40 Si-0,30 Mn-0,30 Cr-27,00	57-62 HRC	CC+	1,6	22 - 29 V / 150 - 350 A	Revestimento resistente a abrasão e impacto

Fonte: produzida pelo autor de acordo com manual do fabricante, Voestalpine (2022)

3.1.4 Metal base para os testes de parametrização efetuados nas amostras

O metal base para realização dos testes foi um aço carbono comum, totalizando 27 chapas com as medidas de espessura 6 mm, largura de 25 mm e comprimento de 150 mm. Todas as chapas foram numeradas de 1 a 27. A Fig. 3.3 representa o metal de base das chapas utilizadas na parametrização da soldagem.

Figura 3.3: Chapa base para os testes de parametrização da solda



Fonte: produzida pelo autor

3.1.5 Equipamentos utilizados para soldagem

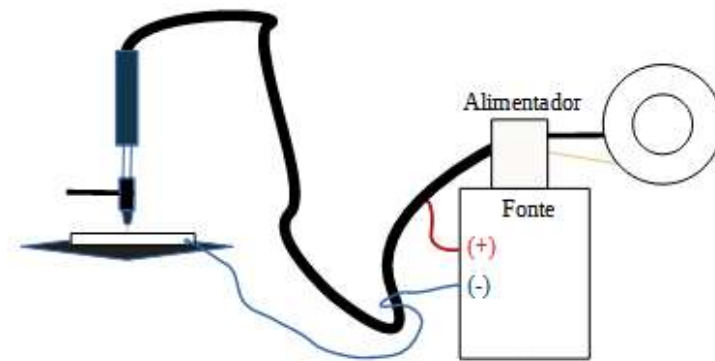
Para a realização do procedimento experimental da parametrização foram utilizados um alimentador de arame, um manipulador robótico Yaskawa Motoman HP20 e uma fonte de soldagem IMC linha DIGIPlus A7, representado pela Fig. 3.4. Os dados de tensão, corrente média e corrente RMS foram coletados por taxa de amostragem em fonte de aquisição de 5 kHz. A velocidade de soldagem foi padronizada em 35 cm/min na posição plana. A Fig. 3.5 representa o modo como os equipamentos foram montados, com fonte de alimentação, fonte de soldagem e bico da tocha de soldagem.

Figura 3.4: Manipulador robótico Yaskawa Motoman HP20 e fonte IMC DIGIPlus A7



Fonte: produzida pelo autor

Figura 3.5: Ilustração do processo de soldagem FCAW



Fonte: produzida pelo autor

3.2 Metodologia

3.2.1 Testes preliminares

Os testes de soldagem foram em 27 amostras de acordo com as especificações do fabricante do arame UTP AF LEDURIT 60 de 1,6 mm de diâmetro, tensão variando de 22 a 29 V, corrente entre 150 a 350 A. As tensões utilizadas foram de valores extremos de 22 e 29 V, o terceiro valor representa a média entre esses dois números com valor de 25 V. As DBCPs (Distância Bico de Contato à Peça), representado pela Fig. 3.6, foram utilizados três valores de 18, 20 e 22 mm para realização dos testes e V_a de 5, 10 e 15 m/min.

Figura 3.6: Distância Bico Contato à Peça - DBCP



Fonte: produzida pelo autor

3.2.2 Ensaio de dureza Vickers na faca de corte

Foram realizados 10 ensaios de dureza em locais aleatórios da faca de corte original, sem preenchimento, pelo método Vickers (ou pirâmide de diamante com carga 10 kgf) com 1 mm de distância entre os ensaios.

3.2.3 Medições dos cordões de solda

Após o processo de soldagem com os parâmetros de DBCP, tensão e velocidade de alimentação, as amostras foram cortadas em três lugares, conforme a Fig. 3.7. O objetivo foi a realização das medidas de área de penetração, área total, penetração do cordão de solda, reforço e largura. As partes confeccionadas para essas medições foram feitas nas seções transversais 1, 2 ou 3 e 4 da figura.

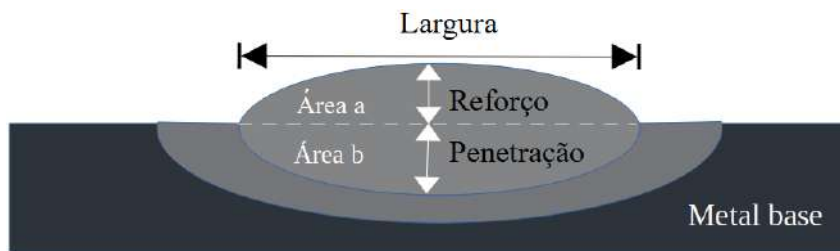
Figura 3.7: Cortes realizado no cordão de solda das amostras, com realização dos testes na seção 1, 2 ou 3 e 4



Fonte: produzida pelo autor

A representação simbólica de todas as medidas está na Fig. 3.8, como penetração, área de reforço, área de penetração, largura e reforço. Para realização das medições das amostras foi utilizado o software ImageJ. Os resultados foram pelas médias de 3 medidas, ou seja, 3 medidas da área total (área a + b) - Fig. 3.9(1), 3 da área b - Fig. 3.9(2), 3 da área de penetração - Fig. 3.9(3), 3 de reforço - Fig. 3.9(4) e 3 da largura - Fig. 3.9(5). A totalização das medidas foi de 15 para cada amostra selecionada. Para calcular a diluição (D) foi utilizado a fórmula da Eq. 3.1.

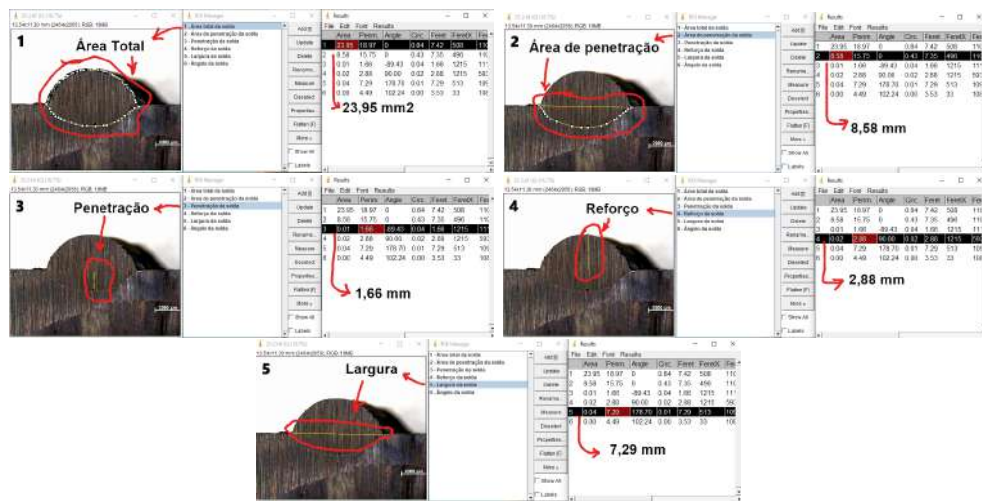
Figura 3.8: Representação esquemática do desenho do cordão solda e suas medidas



Fonte: produzida pelo autor

$$D = \left[\frac{\text{área}(b)}{\text{área}(a + b)} \right] * 100 \quad (3.1)$$

Figura 3.9: Modelos de cálculo das medidas do cordão de solda realizado pelo software ImageJ



Fonte: produzida pelo autor

Para melhor escolha dos parâmetros da soldagem foi usado o Índice de Convexidade (IC), sendo uma característica apresentada pelo cordão de solda. A convexidade na soldagem é quando a superfície do cordão de solda tem uma forma abaulada e com superfície do metal de base forma um ângulo de molhabilidade. O IC pode depender de vários fatores, como a quantidade de material utilizado, velocidade da soldagem, configuração da soldagem e outros parâmetros como a tensão superficial no momento do processo de soldagem. Em algumas aplicações o excesso de IC pode ser um problema que afeta a falta de fusão entre os cordões de solda. Para verificar o IC utilizou ferramenta de inspeção e medição para o cálculo da superfície de soldagem e determinar se o cordão de solda é plano, côncavo ou convexo segundo especificação requerida para o processo que foi usado. O IC foi calculado pela relação do reforço e a largura do cordão de solda conforme a Eq. 3.2.

$$IC = \left(\frac{\text{Reforço}}{\text{Largura}} \right) \quad (3.2)$$

3.2.4 Dureza em relação ao número de camadas da soldagem

Após a escolha dos parâmetros foram feitos os revestimentos com um, duas e três camadas no substrato do aço carbono comum e do VC-131 para escolha da quantidade de camadas do revestimento. Foram realizados 30 ensaios de dureza para cada amostra em locais aleatórios. Os ensaios foram realizados pelo método Vickers (ou pirâmide de diamante com carga 10 kgf) em locais aleatoriamente no topo das camadas, com distância entre ensaios maior que 1 mm. A Fig. 3.10 representa os ensaios de dureza que foram realizados nas amostras.

Figura 3.10: Ensaio de dureza das camadas de soldas

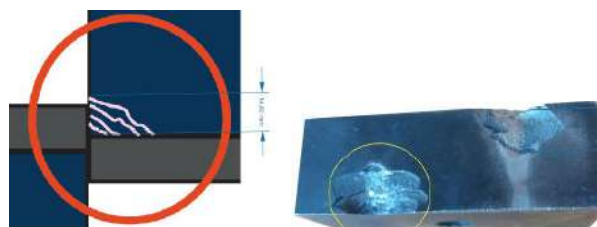


Fonte: produzida pelo autor

3.2.5 Preparação das facas para o revestimento

Os cortes e impactos repetidos várias vezes pelas facas podem causar alta concentração de tensão na parte de contato entre vergalhão e ferramenta, prejudicando o funcionamento e a produtividade. As cargas repetidas fazem com que as facas tenham danos visíveis na estrutura e limitam-nas totalmente, conforme mostrado na Fig. 3.11.

Figura 3.11: Desgastes abrasivos das facas em contato com o vergalhão



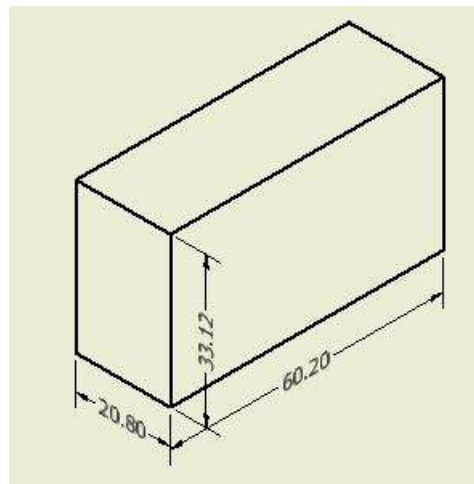
Fonte: produzida pelo autor

O trabalho propõe fazer revestimento por soldagem em dois substrato do aço comum (Faca-1 e Faca-2) e, em dois substrato do aço VC-131 que sofreram desgastes em suas estruturas após o ciclo de trabalho (Faca-3 e Faca-4). A Faca-1 passou pelo processo de usinagem com dimensões de 20,8x30,12x60,20 (largura, altura e comprimento) para ser preenchida com uma camada de solda. A Faca-2 passou pelo processo de usinagem com dimensões de 20,8x27,12x60,20 (largura, altura e comprimento) para ser preenchida com duas camadas de solda. A Faca-3 foi usinada para remoção da parte danificada e ficou com as dimensões de 20,8x30,12x60,20 (largura, altura e comprimento) que foi revestida com uma camada de solda. A Faca-4 foi usinada para remoção da parte danificada e ficou com as dimensões de 20,8x27,12x60,20 (largura, altura e comprimento) que será revestida com duas camadas de solda.

Após a usinagem, foi feito o revestimento por soldagem nas quatro facas, em seguida outra retífica para ajustar as dimensões originais de 20,80 x 33,12 x 60,20 mm, conforme ilustração da Fig. 3.12, e ficaram prontas para a realização dos testes.

Os testes em campo foram realizados com cinco facas (Faca-1, Faca-2, Faca-3, Faca-4 e Faca-o) que passaram por contagem até as facas apresentarem sinais de falhas. Essa contagem foi para comparar as quantidades de cortes que cada material realizou e posterior análise com caracterização estrutural, a princípio, usando microscopia óptica.

Figura 3.12: Medidas originais



Fonte: produzida pelo autor

Projeto de fabricação do suporte

Para realização do revestimento das facas, foram projetados suportes de fixação com objetivo de melhorar o controle na deposição do material de adição, os quais são representados na Fig. 3.13. A fixação das facas ao suporte foi por ponteamento de solda por baixo da face de preenchimento.

Figura 3.13: Projeto do suporte para fixação das facas



Fonte: produzida pelo autor

3.2.6 Critério para fim de vida das facas e contagem dos cortes

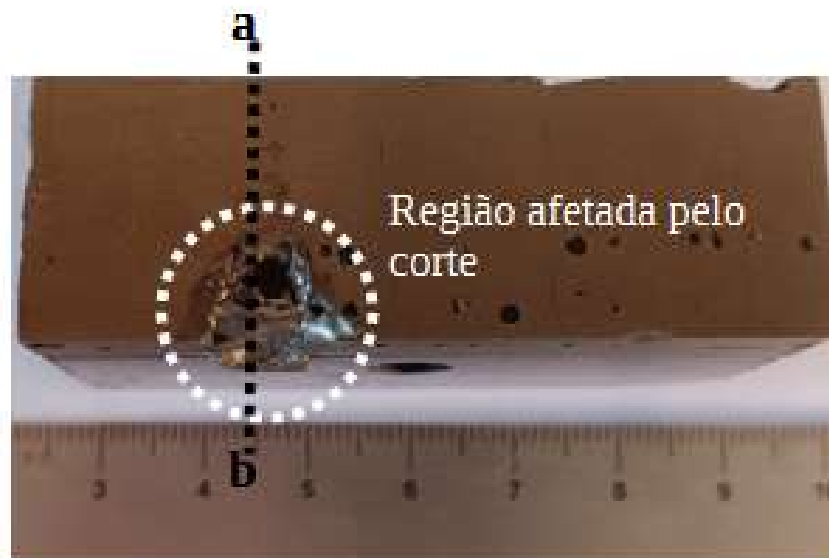
Para determinar o fim de vida das facas foram empregados dois critérios: o primeiro foi a realização de 1.000 cortes e o segundo no colapso do gume de corte. A contagem foi feita pelas quantidades de pedaços cortados da barra de vergalhão.

3.2.7 Preparação das facas para análise metalográfica

A análise microestrutural foi feita em locais críticos da região de corte em que ocorreu o desgaste, bem como em zonas em que não ocorreu qualquer alteração perceptível. As peças serão cortadas no sentido transversal dos cordões de soldas, como indicado pela linha a-b da Fig. 3.14.

As amostras foram embutidas com resina acrílica a frio para facilitar o manuseio e evitar o arredondamento das bordas no lixamento. Em sequência foi feito o lixamento manual (80, 100, 150, 300, 400, 600, 800 e 1.000) e polimento com pasta de alumina de 1 micrometro. O ataque químico foi com Nital 5%.

Figura 3.14: Linha de corte na peça para análise microestrutural (a-b)



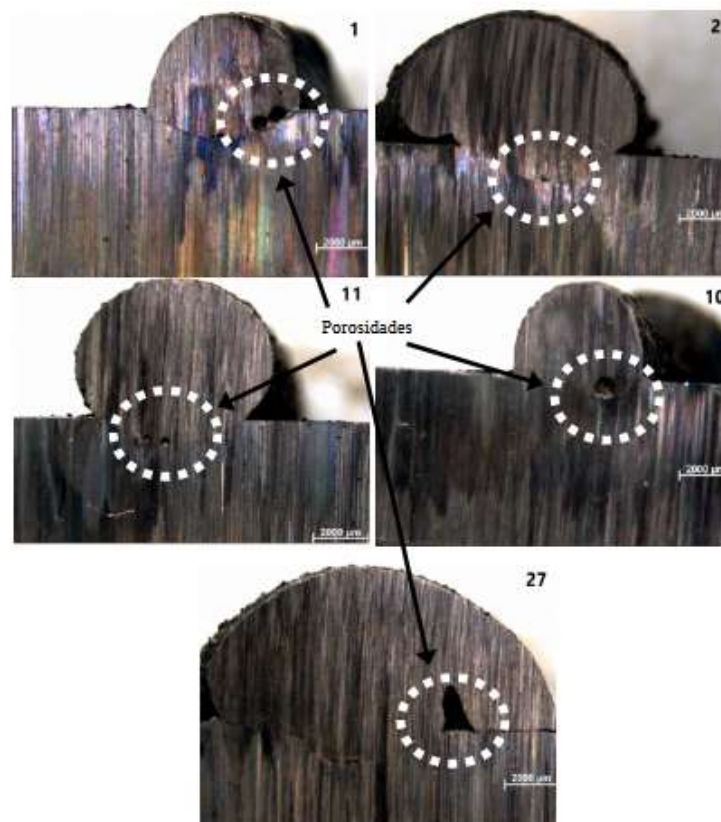
Fonte: produzida pelo autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Testes preliminares

Foram realizados 27 testes para parametrização do cordão de solda (os resultados são mostrados no apêndice A, página 88). Foram descartadas algumas amostras visualmente por não apresentarem continuidade. A amostra 19 não apresentou penetração do cordão de solda e desprendia facilmente do metal base, por esse motivo foi descartada. Nos cortes realizados, mostrados na Fig. 4.1, algumas amostras apresentaram defeitos pontuais, como baixa penetração do cordão de solda e porosidade. As amostras 1, 2, 10, 11 e 27 foram descartadas pela presença de defeitos em suas geometrias que poderia comprometer a qualidade do revestimento, para a análise dos defeitos foi feito de forma visual sem nenhum tipo de preparação nas peças. Assim, as amostras selecionadas visualmente e aceitáveis para realização das medições dos cordões de solda estão representadas na Fig. 4.2.

Figura 4.1: Defeitos apresentados em alguns cordões de soldas, como porosidade e baixa penetração



Fonte: produzida pelo autor

Figura 4.2: Seção transversal dos cordões de solda selecionados para parametrização



Fonte: produzida pelo autor

4.1.1 Resultados das medições dos cordões de solda

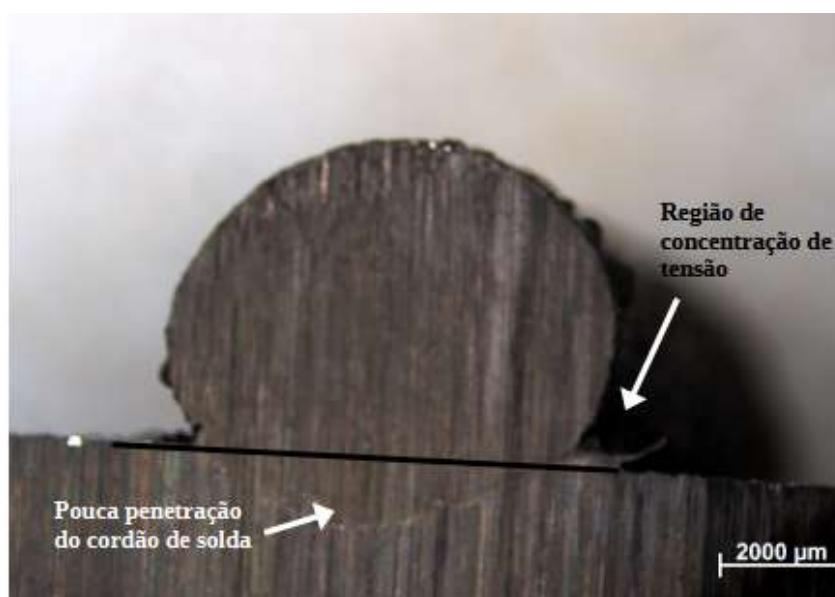
Os resultados das medidas e cálculos realizados com os cordões de solda selecionados (área total, área de penetração, penetração, reforço, largura, diluição e IC) são mostrados na Tab. 4.1. Analisando os resultados da tabela, as amostras com IC de aproximadamente 0,46, como das amostras 4, 8 e 17, já começam a apresentar geometria com aparente concentração de tensão entre os cordões de soldas, diminuição da diluição e visualmente a característica geométrica do cordão de solda não é aceitável para fazer o revestimento. Portanto, estas amostras com IC acima do valor de 0,46 foram descartadas para realização do revestimento. A Fig. 4.3 mostra um cordão de solda da amostra 23 com IC maior que 0,46.

Tabela 4.1: Medidas médias dos cordões de soldas das amostras

Amostras	Área total mm^2	Área penetração mm^2	Penetração mm	Reforço mm	Largura mm	Diluição (%)	IC
4	23,98	7,87	1,72	3,33	7,08	32,81	0,47
5	37,09	5,50	1,20	5,04	6,59	14,83	0,76
7	28,73	11,28	1,73	2,93	8,72	39,26	0,34
8	44,22	11,59	1,96	4,38	9,44	26,21	0,46
9	63,04	10,27	2,31	5,91	8,42	16,29	0,70
13	21,21	5,13	1,25	3,35	6,58	24,17	0,51
14	32,72	4,91	1,22	4,65	6,51	14,99	0,71
16	23,46	9,70	1,71	2,60	8,03	41,33	0,32
17	37,55	9,87	1,81	4,08	8,85	26,29	0,46
18	50,59	8,16	2,01	5,14	8,68	16,13	0,59
22	24,33	5,64	1,30	3,67	6,80	23,16	0,54
23	38,65	5,25	1,48	5,25	6,27	13,58	0,84
25	26,40	9,71	1,71	2,91	8,00	36,77	0,36
26	40,80	8,12	1,67	4,69	8,15	19,91	0,57

Fonte: produzida pelo autor

Figura 4.3: Representação de um cordão de solda com IC maior que 0,46 com pouca penetração do cordão de solda e região de concentração de tensão



Escolha dos parâmetros para a soldagem

A escolha dos parâmetros para ser usada no revestimento tomou por base o IC e a diluição do cordão de solda. Para escolha em relação aos testes feitos, características do cordão de solda e cálculos realizados, os parâmetros que apresentaram melhores resultados foram das amostras 16, 7 e 25, com IC menor que 0,46, portanto para a escolha dos parâmetros será do menor IC que é representado pela amostra 16, apesar de não ser o menor valor de diluição (DBCP 20 mm, tensão 29 V e velocidade de alimentação de 5 m/min). A abordagem da escolha em relação ao IC em detrimento à diluição foi por considerar, neste caso, o IC como um parâmetro mais importante para a operação de revestimento devido à baixa concentração de tensão dos cordões de solda após o processo de soldagem.

4.1.2 Dureza em relação ao número de camadas

Os testes de dureza do substrato antes do revestimento apresentou os resultados de 169 HV para o aço carbono comum e 653 HV para o aço ferramenta VC-131. Na Tab. 4.2 é mostrada a média de dureza do revestimento em 1, 2 e 3 camadas com substrato do aço carbono comum e o aço ferramenta VC-131, a média de dureza do substrato apresentou maior valor para Amostra 1 com uma camada do aço carbono comum e menor valor de dureza para Amostra 3 com três camadas do aço carbono comum, média de dureza foi de 736 HV e 725 HV, respectivamente. Resultados semelhantes de dureza foram encontrados nos testes realizados por Colaço e Maranhão (2013) e por Lima e Ferraresi (2010), porém com material de adição FeCrC+Ti. A dureza mínima foi de 559 HV, representado pela Amostra 4, tendo como substrato VC-131 de uma camada. A máxima dureza foi de 973 HV apresentado pela Amostra 1. O desvio padrão máximo foi de 66 HV, na Amostra 1, e mínimo foram representados nas Amostras 3 e 5 de 45 HV. Teve uma diminuição de dureza para a segunda camada com relação a uma camada do revestimento. Essa diferença de dureza também foi observado no trabalho de Gualco et al. (2015) de 920 para 800 HV e com perda de material nos testes abrasivos menores para segunda camada. No trabalho de Coronado, Caicedo e Gómez (2009), também houve uma diminuição da dureza no revestimento da primeira (695 HV) para terceira camada (678 HV), em torno de 2,5%.

Tabela 4.2: Dados estatísticos de dureza HV10

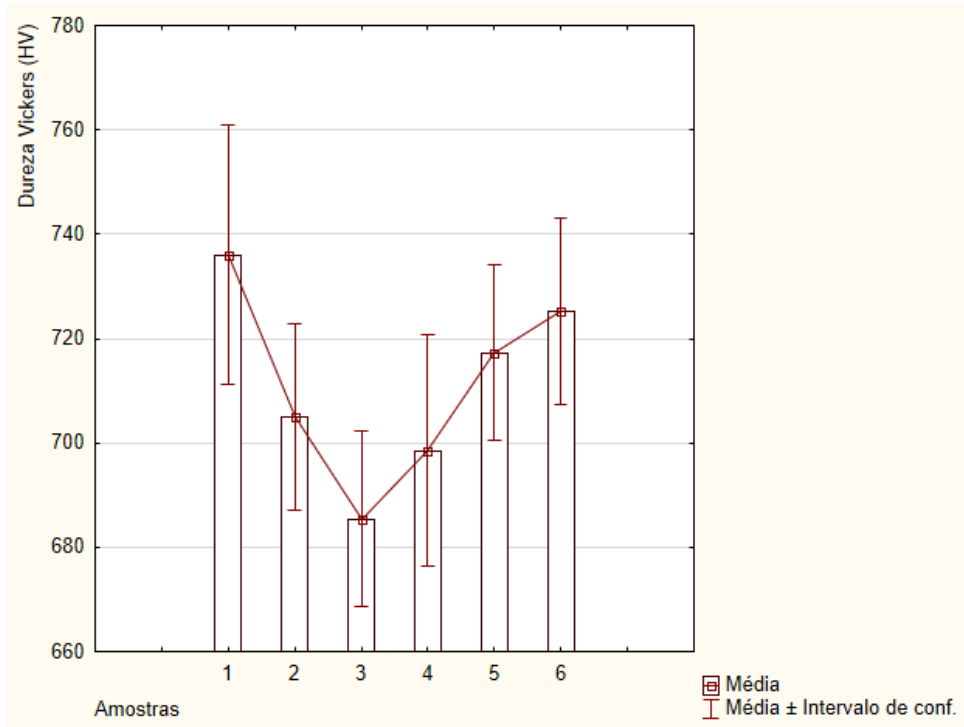
Amostras	Substrato	Número de camadas	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
1	Aço carbono comum	1 camada	736	619	973	66
2	Aço carbono comum	2 camadas	704	640	816	48
3	Aço carbono comum	3 camadas	685	577	771	45
4	VC-131	1 camada	698	559	820	59
5	VC-131	2 camadas	717	614	789	45
6	VC-131	3 camadas	725	608	799	47

Fonte: produzida pelo autor

A Fig. 4.4 é uma representação gráfica das médias e das variabilidades de dureza em relação ao número de camadas. Observa-se maior média e maior variabilidade para a Amostra 1 e menor média e variabilidade para Amostra 3. Foi significativa a variação de dureza entre as camadas do revestimento para soldagem feita com os dois tipos de substrato. Houve uma diminuição de dureza para o aumento de camadas com substrato de aço comum e um aumento de dureza para aumento de camadas no substrato de VC-131. Entre as amostras com substrato de aço carbono comum, com relação à dureza, a Amostra 1 apresentou melhor resultado, bem como menor custo para ser realizado o revestimento, pois foi necessária somente uma camada. Entre as amostras com substrato de VC-131, com relação à economia de recurso, a amostra 5 apresentou vantagem em relação à amostra 6 por não apresentar diferenças significativas de dureza nos resultados com relação ao intervalo de confiança. Devido aos resultados obtidos nos testes preliminares, os materiais

das facas foram revestidos com uma e duas camadas para os substratos de aço carbono comum e VC-131.

Figura 4.4: Média de dureza HV10 em função das camadas Tab. 4.2



Fonte: produzida pelo autor

Da mesma forma, considerando os testes preliminares realizados, ficou determinado como parâmetros de soldagem para os revestimentos os seguintes valores: DBCP de 20 mm, tensão de 29 V e velocidade de alimentação de 5 m/min. Em relação ao número de camadas, como já mencionado, ficou determinado a realização de revestimentos com 1 e 2 camadas para os dois materiais de base.

4.2 Caracterização das facas

Os valores encontrados nos ensaios de dureza da Faca-o (VC-131 sem revestimento) estão representados na Tab. 4.3. A média de dureza encontrada foi de 864,98 HV, desvio padrão de 8,43 HV e mediana de 864,90 HV.

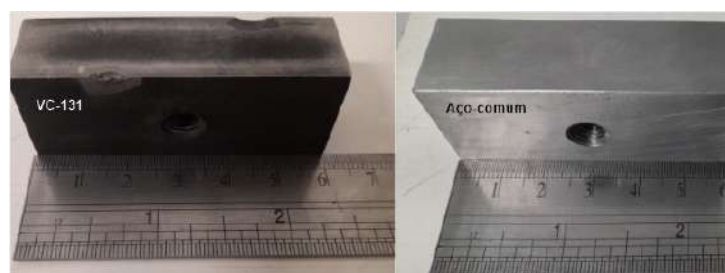
Tabela 4.3: Valores do ensaio de dureza na Faca-o

Ensaio	Durezas HV
1	855,8
2	872,9
3	881,4
4	870,4
5	860,5
6	857,6
7	863,4
8	854,1
9	868,2
10	866,4

Fonte: produzida pelo autor

As facas já rebaixasadas para receber o revestimento estão representadas na Fig. 4.5, com 3 mm de rebaixo para o preenchimento com uma camada de solda e para duas camadas o rebaixo foi de 6 mm. As facas estão com o rebaixo feito por retífica plana.

Figura 4.5: Facas prontas para revestimento por soldagem, com os materiais VC-131 e aço carbono comum, o revestimento foi aplicado no local que teve a retífica plana do substrato do VC-131



Fonte: produzida pelo autor

4.3 Revestimento das facas

As facas foram revestidas com uma e duas camadas para os materiais com substratos de aço carbono comum e o VC-131. Para aplicação das camadas de revestimento foi fabricado um suporte com o objetivo de fixar a faca e sustentar o material depositado nas

bordas da faca, promovendo uma deposição uniforme na superfície da faca, Fig. 4.6a. A Fig. 4.6b representa o preenchimento quase completo sobre a face do metal de base com uma camada. Em seguida, foram feitas as usinagens para as dimensões originais conforme observada pela Fig. 4.6c.

Figura 4.6: Início do revestimento da faca com material base o aço comum e modelo pronto para os testes de cortes

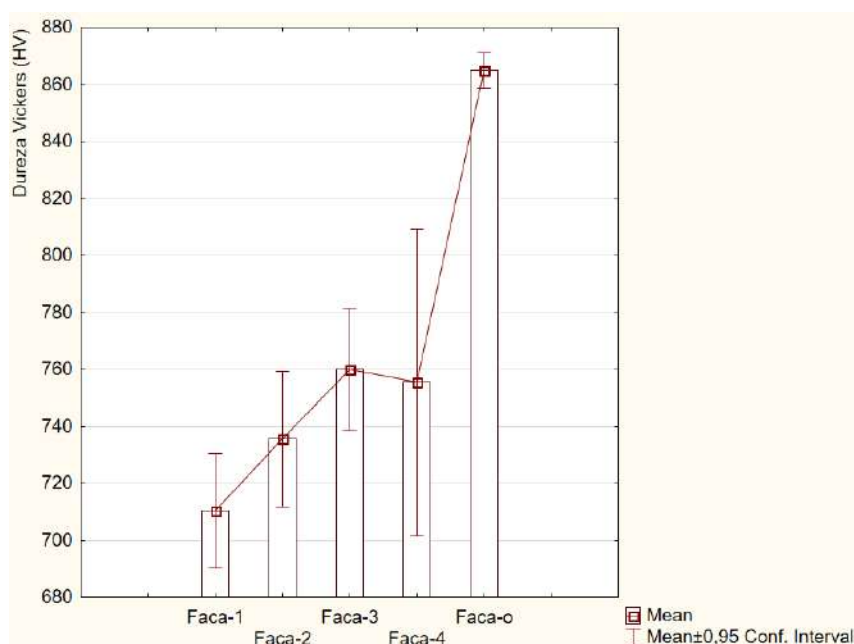


Fonte: produzida pelo autor

4.3.1 Ensaios de dureza dos revestimentos após testes

Os ensaios de dureza das facas revestidas foram feitos após a realização dos cortes na parte superior da camada do revestimento e, em locais aleatórios sempre fora da região de corte. As médias estão representadas pela Fig. 4.7. Observa-se maior média de dureza para o aço carbono comum em duas camadas de soldas, no caso a Faca-2. No caso do aço ferramenta VC-131, a maior média de dureza foi para a faca com uma camada de revestimento, Faca-3. A Faca-4 apresentou maior dispersão de dureza. A Faca-o (faca original) apresentou maior dureza em relação aos revestimentos feitos.

Figura 4.7: Média de dureza apresentada nas facas após uso



Fonte: produzida pelo autor

4.4 Ensaios de corte

A Tab. 4.4 mostra o número de cortes realizados para cada faca até o colapso, ou até alcançar 1.000 cortes. Considerando-se apenas os casos de facas revestidas, a Faca-3 (aço VC-131 com uma camada) atingiu maior vida (1004 cortes). A Faca-1, por sua vez, atingiu 217 cortes, a Faca-4 atingiu 117 cortes e a Faca-2 atingiu 33 cortes. Os menores números de cortes foram com o revestimento feito em duas camadas representado pela Faca-4 com substrato do aço ferramenta VC-131, seguido da Faca-2 com substrato do aço carbono comum.

Tabela 4.4: Quantidades de cortes feitos pelas facas, Faca-1 (base do aço comum com uma camada), Faca-2 (base do aço comum com duas camadas), Faca-3 (base do VC-131 com uma camada), Faca-4 (base do VC-131 com duas camadas) e Faca-o (faca original)

Amostras	Cortes
Faca-1	217
Faca-2	33
Faca-3	1.004
Faca-4	117
Faca-o	1.004

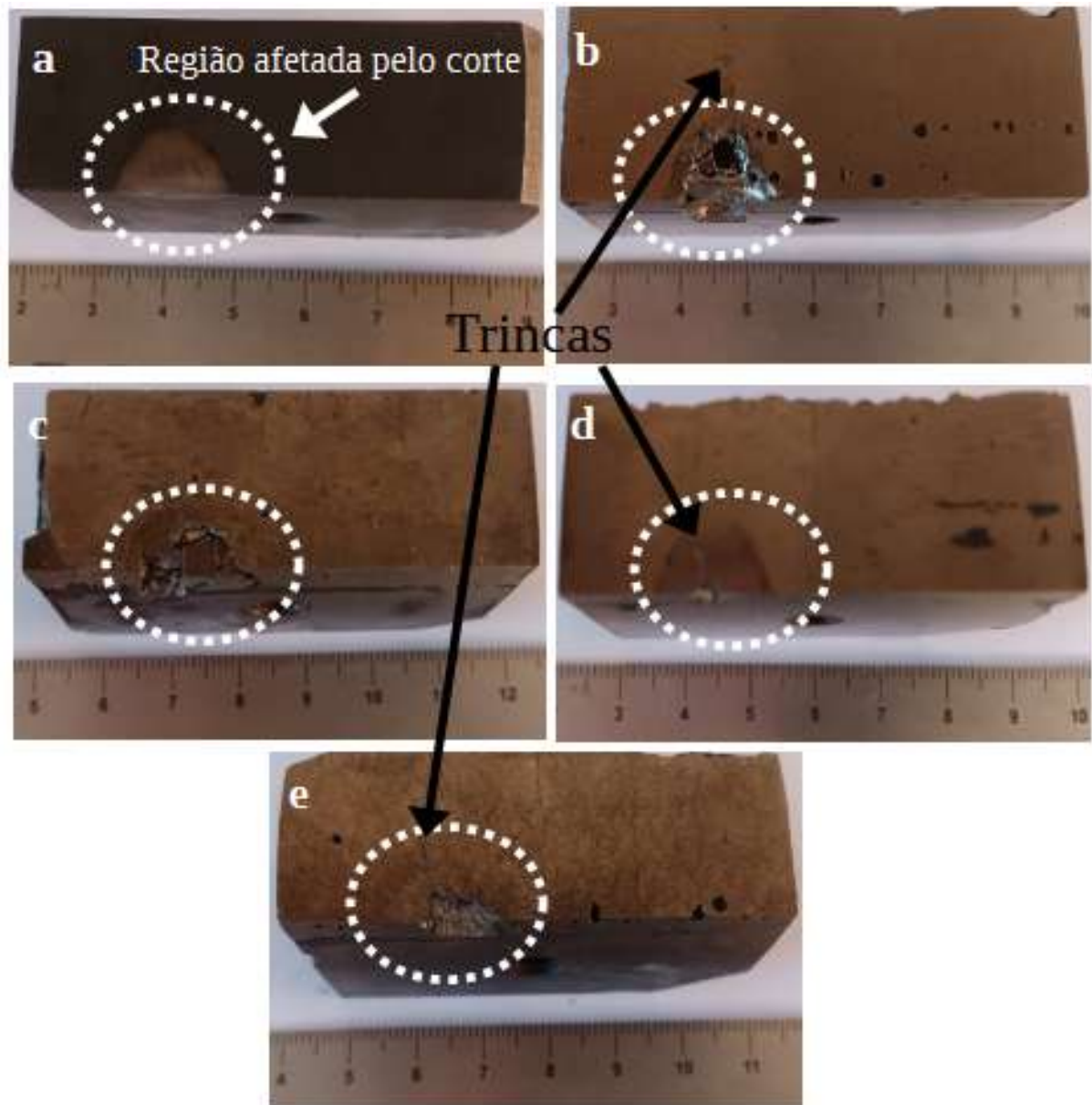
Fonte: produzida pelo autor

4.4.1 Estrutura das facas após os cortes

Após os testes de cortes, as facas revestidas apresentaram colapso na estrutura devido ao desgaste e perda material. Fig. 4.8a representa o desgaste na Faca-o após 1.004 cortes, que apresentou pequeno desgaste, aparentemente abrasivo, na região afetada pelo corte sem perda de material. A Fig. 4.8b, Faca-1, mostra o desgaste após 217 cortes, com perda de material e trincas. A Fig. 4.8c, Faca-2, mostra o desgaste após 33 cortes, com perda de material e trincas. A Fig. 4.8d representa o desgastes da Faca-3 após 1.004 cortes, com perda de material e trincas na região afeta pelo corte. A Fig. 4.8e representa o desgaste da Faca-4 após 117 cortes, observa-se perda de material em forma de lascamento na região afetada pelo corte. A Faca-o com 1.004 cortes teve a menor degradação superficial na região de corte.

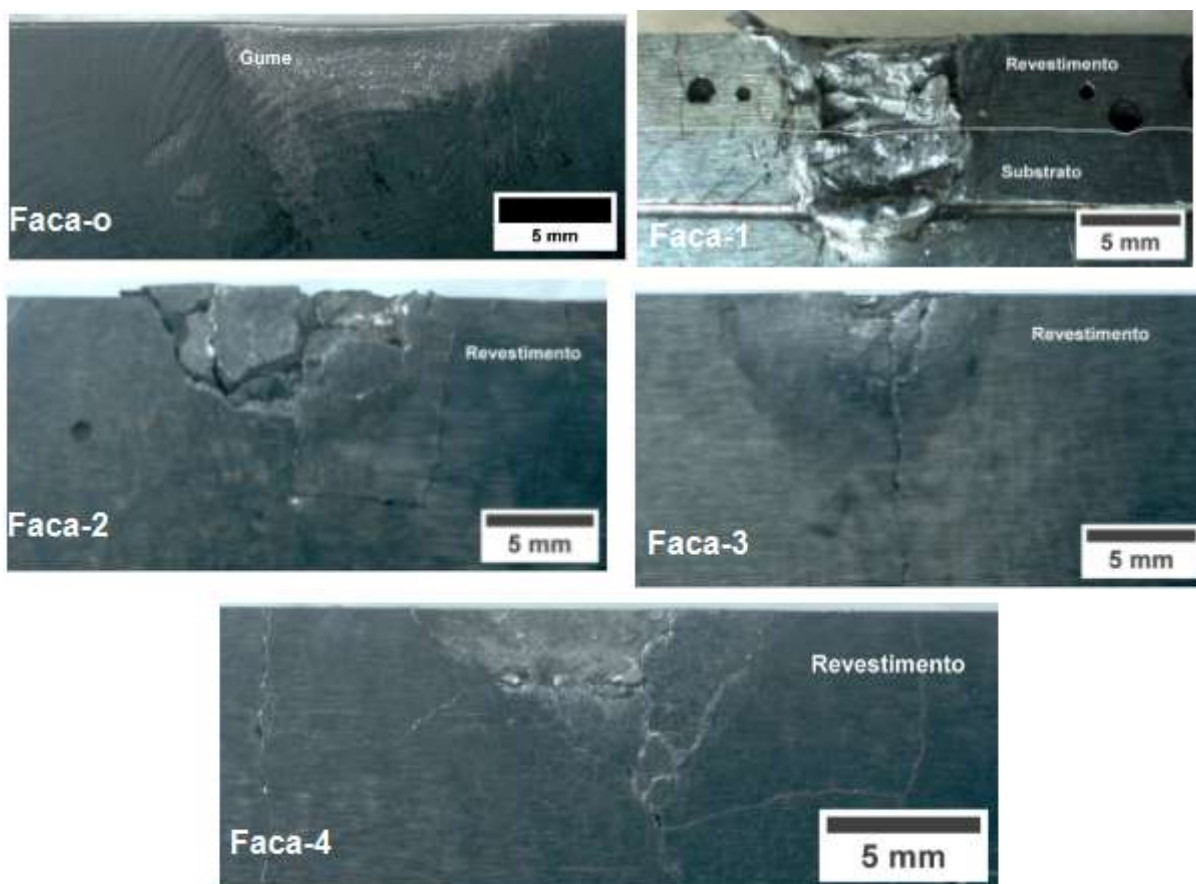
A Fig. 4.9 mostra a deformação nas facas após os testes de cortes e trincas. Em relação a Faca-o apresentou pouco deformação pelas quantidades de corte, com nenhuma perda de material em sua estrutura. Todos os revestimentos apresentaram deformação em suas estruturas e perda de material. A Faca-1 apresentou maior desgaste de todos os revestimentos após os cortes e deformação no substrato. Na Faca-2, apresentou perda de material no revestimento e não teve deformação no substrato. A Faca-3 observa-se perda de material no revestimento e não apresentou deformação no substrato. Na Faca-4 teve um lascamento na lateral do revestimento e não apresentou deformação do substrato.

Figura 4.8: A figura mostra a região das facas afetada pelo corte



Fonte: produzida pelo autor

Figura 4.9: Região de corte das facas após os testes realizados



Fonte: produzida pelo autor

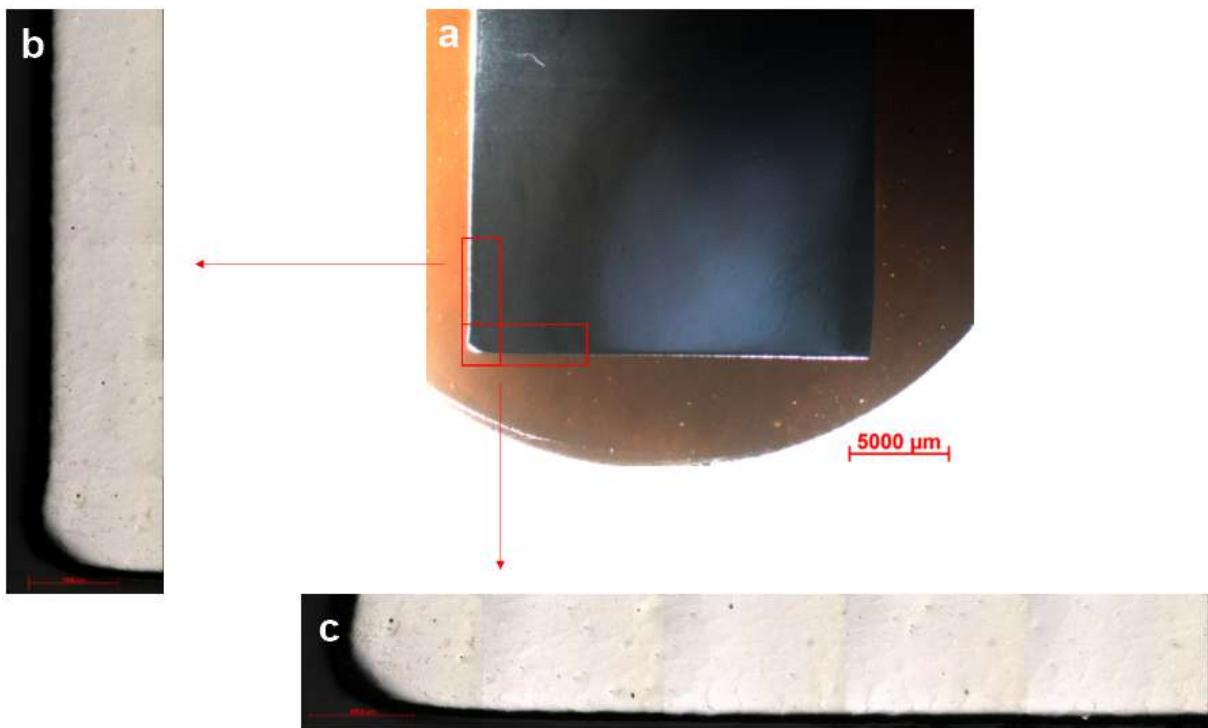
4.5 Microestrutura do revestimento

A microestrutura observada no microscópio óptico apresentou formação dos carbonetos primários (Cr_7C_3) com dispersão na matriz para as quatro amostras revestidas. No trabalho de Luz et al. (2020), o revestimento com FeCrC teve a formação de carbonetos primários na matriz de austenita após o revestimento. No revestimento do trabalho de Marques (2023) com adição FeCrC pelo processo FCAW foi observado na matriz austenita com carbonetos hexagonais (Cr_7C_3) sem orientação específica. Também foi observado no trabalho de Souza e Ferraresi (2017) com dupla alimentação a base de FeCrC a formação de austenita na matriz com carboneto primário. O trabalho de Chang et al. (2010b) apresentou um aumento na formação dos carbonetos primários com o revestimento feito pelo processo FCAW com material de deposição a base de FeCrC na matriz de austenita. No entanto, para o revestimento a base de FeCrC é essencial equilibrar as quantidades e distribuição dos carbonetos na matriz para evitar fragilidade do material devido a baixa ductilidade e elevada dureza que pode comprometer o revestimento.

Faca-o

O abaulamento no gume de corte da faca de aço ferramenta é um fenômeno comum que ocorre durante o uso das lâminas. Esse fenômeno pode ser descrito como uma deformação plástica que forma uma pequena protuberância ou aba na borda da lâmina. A análise da Fig. 4.10a, representando a Faca-o (faca original, sem revestimento), não apresentou perda de massa na região de corte, porém sofreu deformação na estrutura como abaulamento no canto de corte representado pela Fig. 4.10-bc. O abaulamento no canto de corte de uma faca de aço ferramenta é um problema comum que afeta a eficiência e a durabilidade da lâmina, devida à perda de afiação.

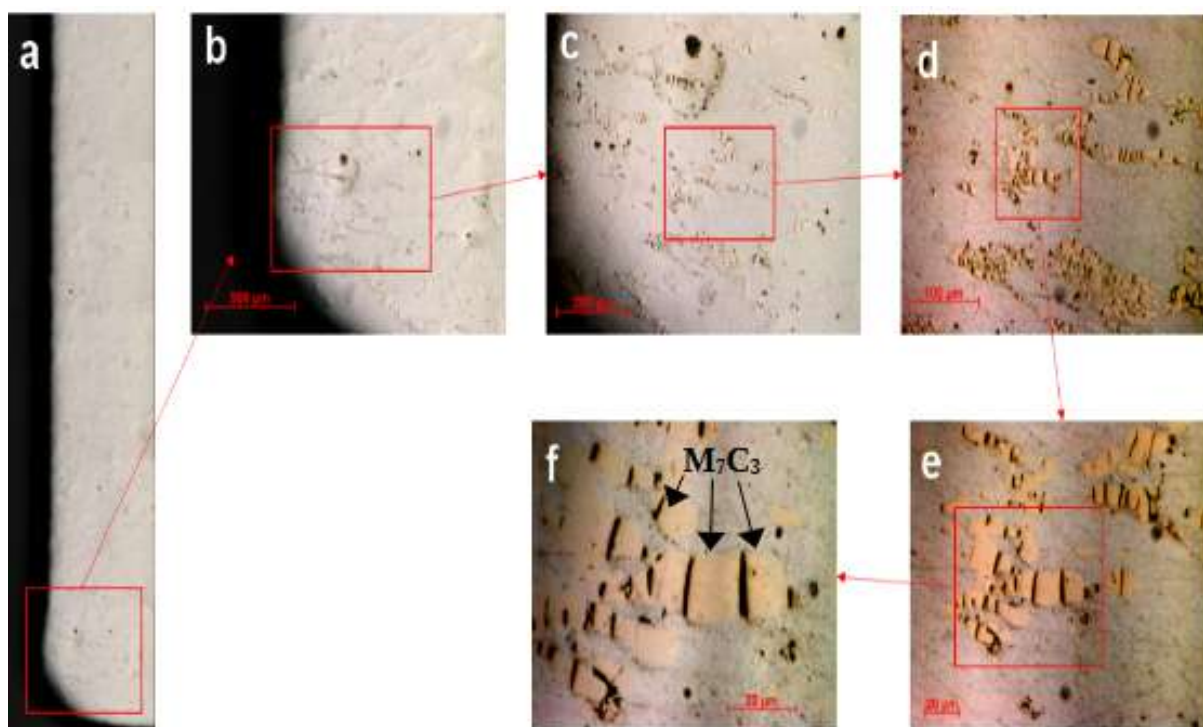
Figura 4.10: Faca-o sem revestimento por soldagem após uso



Fonte: produzida pelo autor

A Fig. 4.11 mostra a microestrutura na região de corte da Faca-o. Na Fig. 4.11f, observa-se formação rica em carbonetos hexagonais na matriz, homogeneidade na morfologia dos carbonetos e precipitação na formação desses carbonetos. No trabalho de Bianchi et al. (2000) também observa-se na matriz estrutura martensítica revenida no aço ferramenta VC-131 e carbonetos precipitados.

Figura 4.11: Metalografia da região de corte da Faca-o com reagente Nital 5%



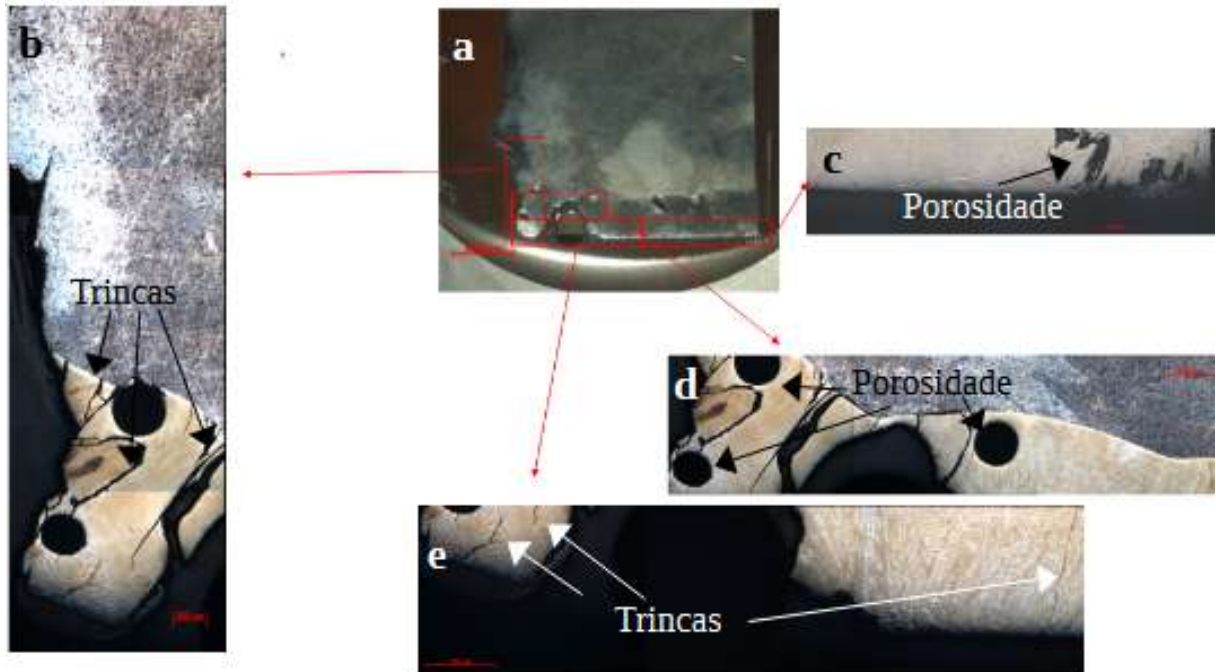
Fonte: produzida pelo autor

Faca-1

A Faca-1 (faca com uma camada sobre o substrato do aço carbono comum) mostra trincas no revestimento do material depositado na região de corte, representado pela Fig. 4.12b, e em local onde não apresentou desgastes representado pela Fig. 4.12e. A Fig. 4.12-cd mostra-se porosidade presente no revestimento. Para esse tipo de revestimento duro com formação de Cr_7C_3 também foram observadas trincas e porosidade com baixa qualidade do revestimento no trabalho Beczkowski e Gucwa (2016). O trabalho de Marques (2023) também apresentou essas trincas de solidificação no processo de revestimento com FeCrC. O revestimento em uma camada utilizando como substrato o material de aço carbono comum apresentou desgaste acentuado e perda de massa na região de corte. Conforme Bahoosh, Shahverdi e Farnia (2019), nesse tipo de deposição, com alto teor de Cr, o revestimento tem concentração de tensão com formação de trincas ao longo do cordão de solda. Essas trincas podem ter favorecido o desgaste do revestimento.

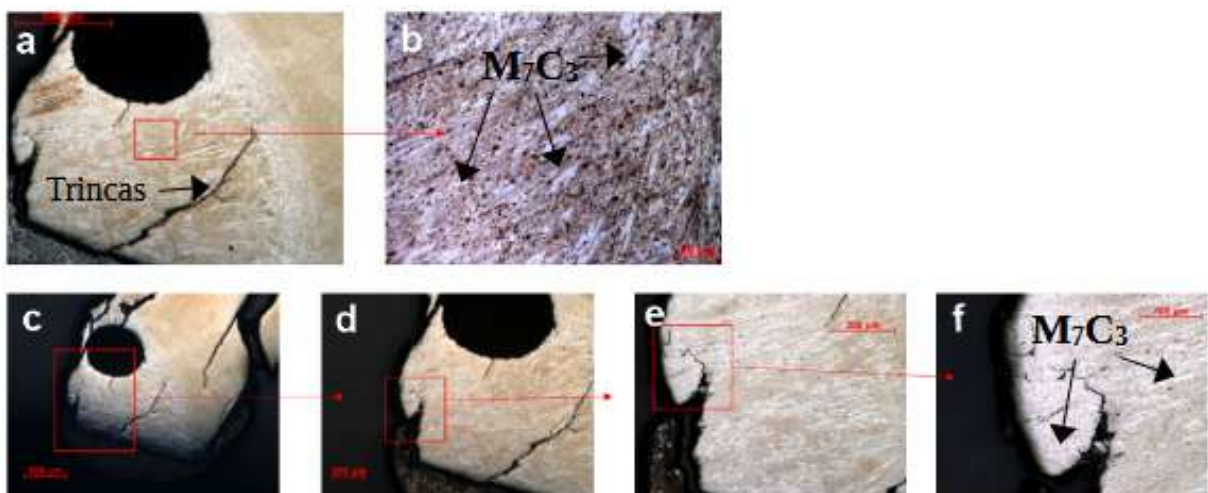
Na Fig. 4.13 observa-se formação de carbonetos simples aciculares (forma de agulha), com maior alongamento dos carbonetos na região do corte, que pode ter sido ocasionado pela deformação plástica sofrida pelo material em uso, representado pela Fig. 4.13c. A Fig. 4.13f mostra maior homogeneidade dos carbonetos alongados mais no centro da região de corte com orientação bem definida. No trabalho de Marques (2023) não foi observado essa orientação dos carbonetos no revestimento feito com material de adição FeCrC.

Figura 4.12: Metalografia da região de corte da Faca-1, com uma camada de revestimento no substrato do aço carbono comum com reagente Nital 5%



Fonte: produzida pelo autor

Figura 4.13: Metalografia do revestimento da Faca-1 na região de corte com reagente Nital 5%

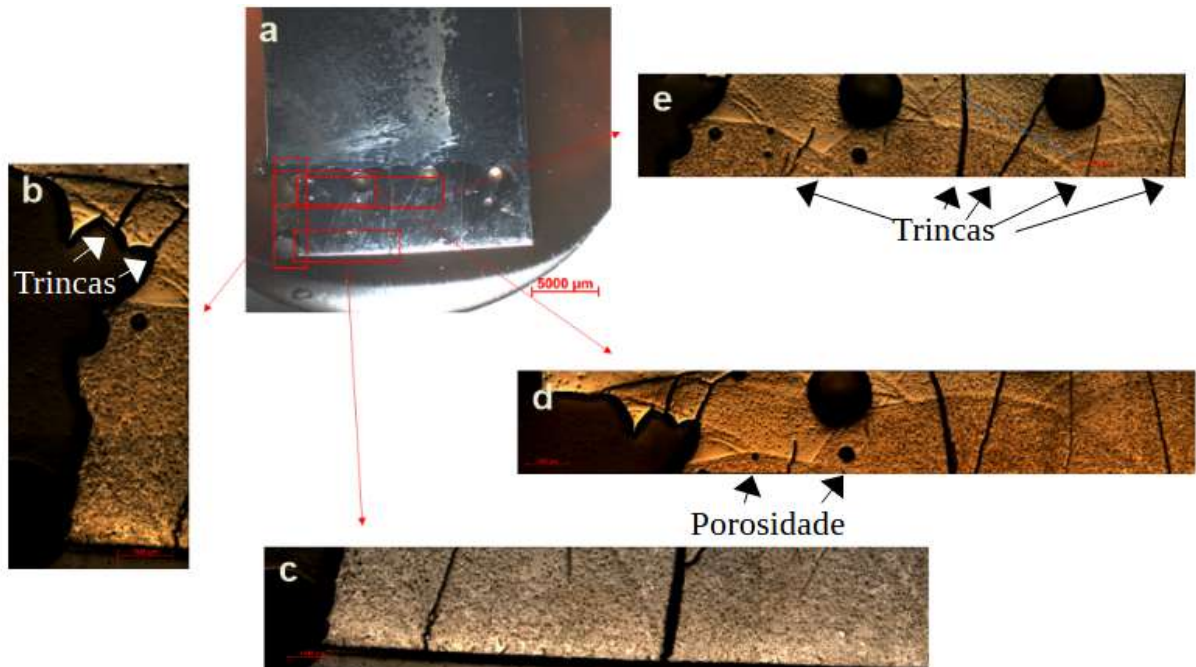


Fonte: produzida pelo autor

Faca-2

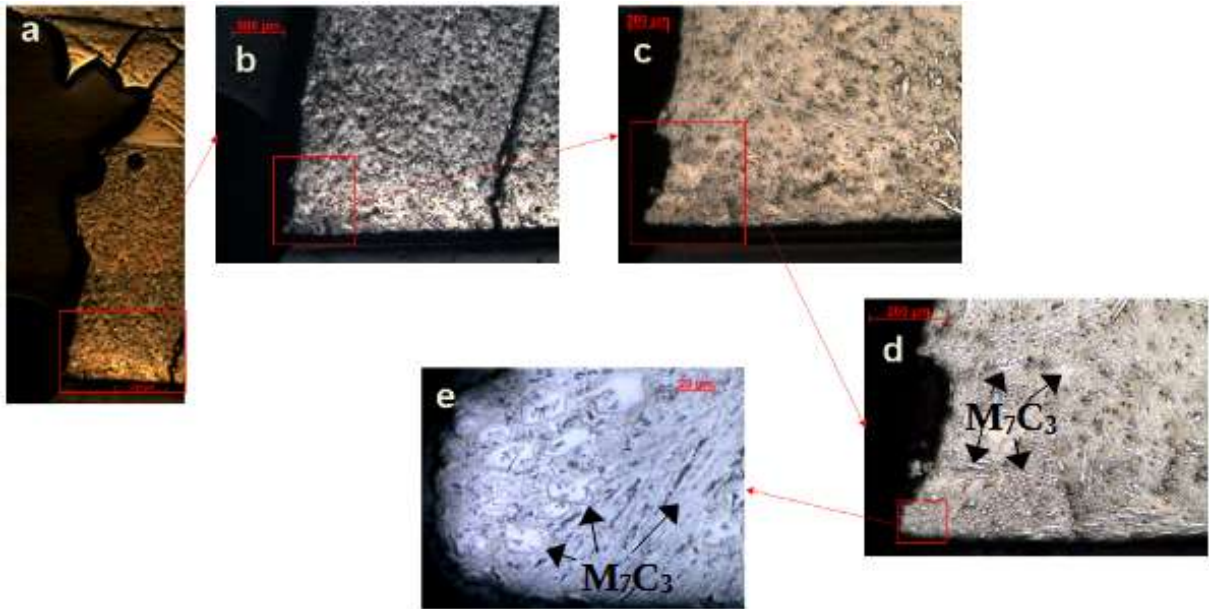
A Fig. 4.14 representa a Faca-2 (com revestimento feito em duas camadas no substrato da liga de aço carbono comum) a qual teve menor perda de material na região de corte comparado com a Faca-1 e, porém maior número de trincas e porosidade em sua estrutura com relação a Faca-1 e realizou 33 cortes. A contagem das trincas foi feita de forma visual. O maior número de trincas e porosidade pode estar relacionado com a quantidade de carbonetos. No trabalho feito por Luz et al. (2020) com o objetivo de reduzir as trincas foi adicionado NbC no revestimento para reduzir os carbonetos primários (M_7C_3), com essa redução dos carbonetos primários teve uma diminuição no número de trincas, segundo o autor teve maior quantidade de carbonetos primários em forma de agulha (carboneto mais alongado ou acicular) e hexagonal, porém adição foi feita em uma camada de revestimento. Na Fig. 4.15e, observa-se concentração de carbonetos simples hexagonais e acicular na região de corte. Na região do revestimento que não teve contato direto com a barra de vergalhão no momento do corte, observa-se a formação de carbonetos simples acicular e hexagonal com trincas de solidificação representado pela Fig. 4.16e. No trabalho de Chang et al. (2009) dependendo do teor de carbono no revestimento a geometria dos carbonetos pode ter forma de lâmina ou forma de bastão.

Figura 4.14: Defeito no revestimento da Faca-2, porosidade e trincas de solidificação



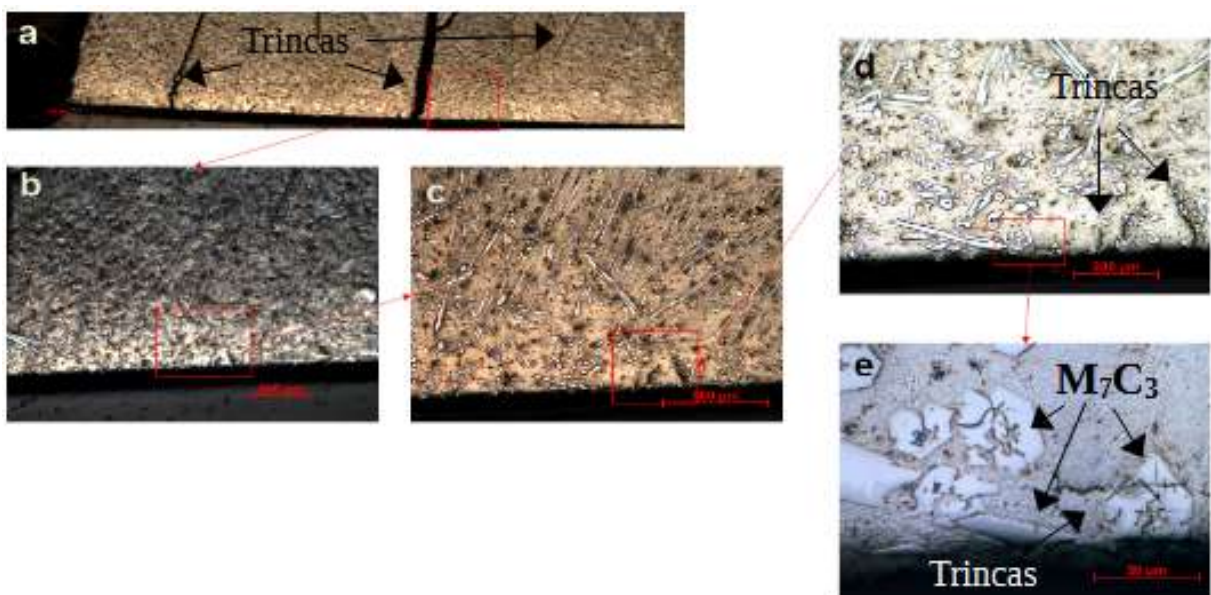
Fonte: produzida pelo autor

Figura 4.15: Microestrutura da Faca-2 na região de corte com reagente Nital 5%



Fonte: produzida pelo autor

Figura 4.16: Microestrutura da Faca-2 na região que não apresentou desgaste com reagente Nital 5%

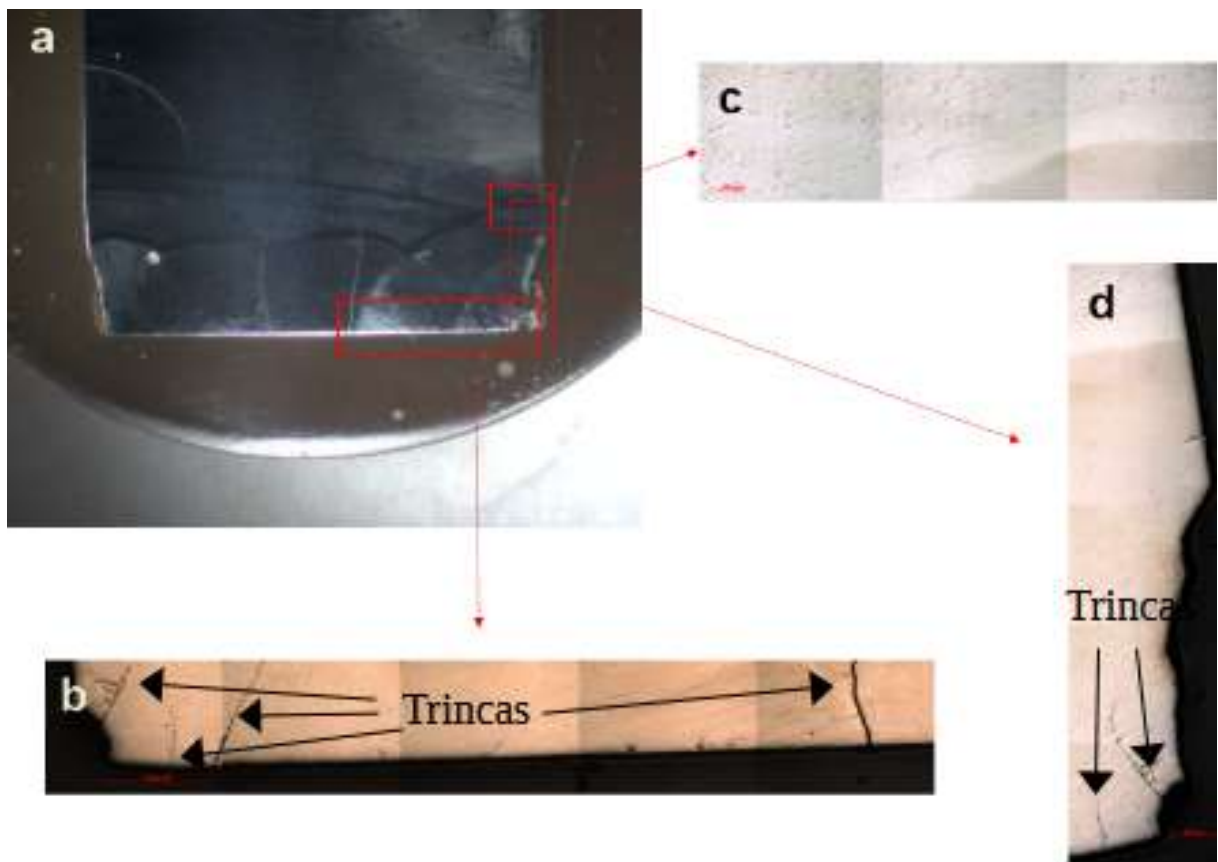


Fonte: produzida pelo autor

Faca-3

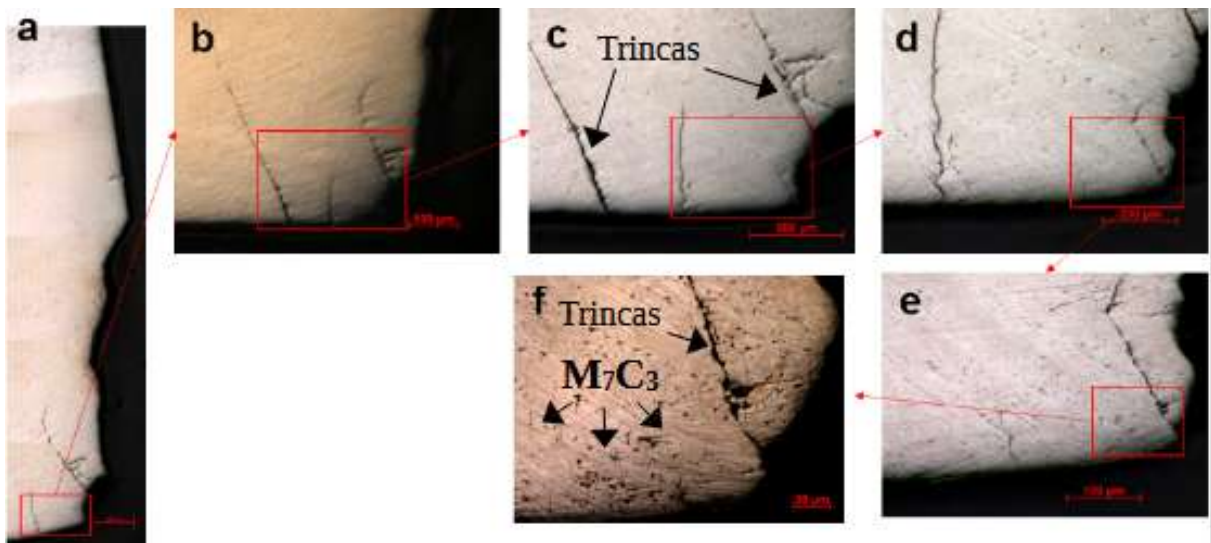
A Fig. 4.17 e Fig. 4.18 representam o revestimento da Faca-3 no substrato do VC-131 com uma camada, observa-se trincas no revestimento fora da região de corte como representado pela Fig. 4.17b, e desgaste na região de corte com perda de massa, representado pela Fig. 4.17d. Na região de corte observa-se formação de carboneto simples acicular e hexagonal no local do desgaste do revestimento e uma orientação bem definida na formação dos carbonetos, representado pela Fig. 4.18f.

Figura 4.17: Corte transversal da Faca-3



Fonte: produzida pelo autor

Figura 4.18: Microestrutura do revestimento da Faca-3 com reagente Nital 5%

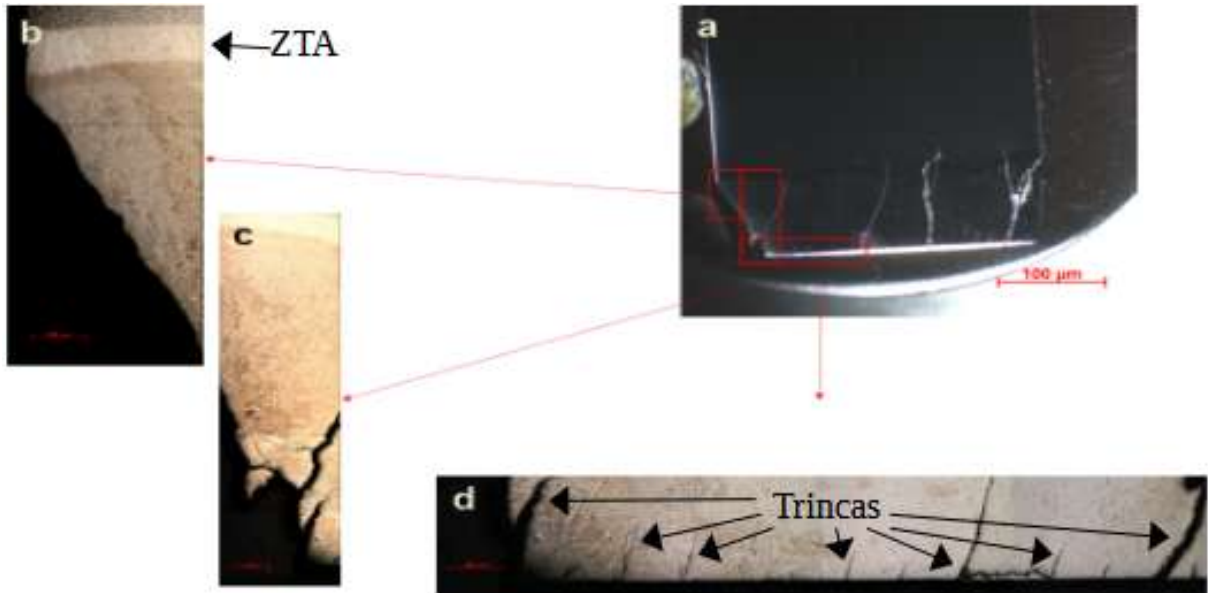


Fonte: produzida pelo autor

Faca-4

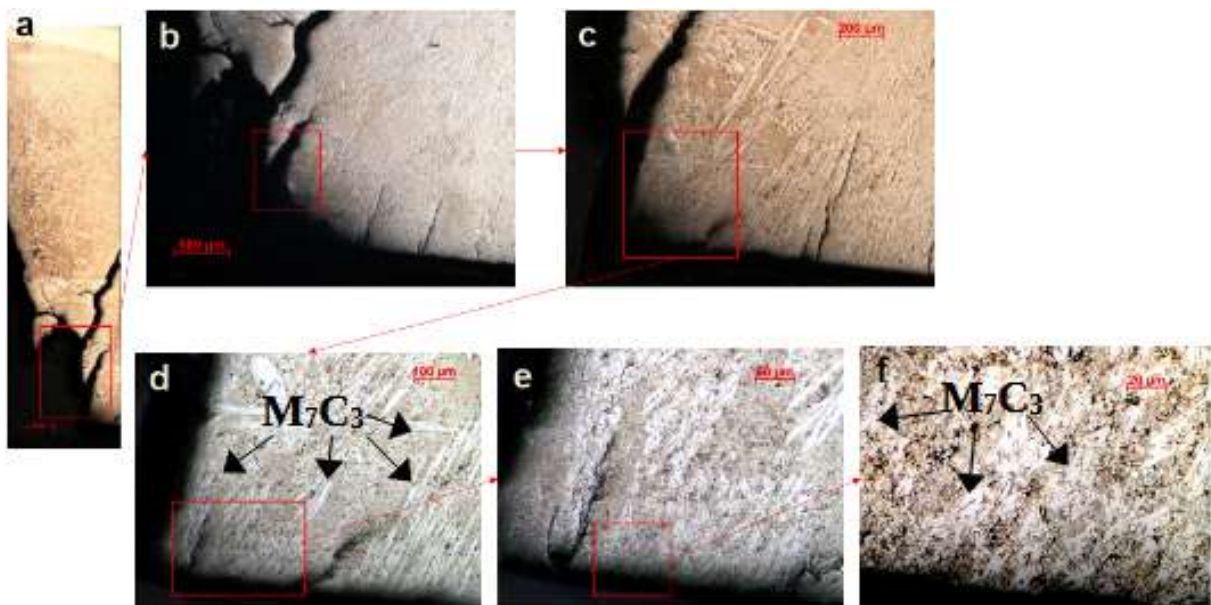
As figuras, Fig. 4.19 e Fig. 4.20a, mostram o corte transversal da Faca-4 (revestimento feito no substrato do aço ferramenta VC-131 com duas camadas), observa-se formação de trincas no revestimento e desgastes na região de corte representado pela Fig. 4.19c. As trincas foram em maior número comparado com o revestimento da Faca-3, representado pela Fig. 4.20d. No local do revestimento que não apresentou desgaste, observa-se concentrações massivas de carbonetos primário acicular e hexagonal na matriz e trincas de solidificação, representado pela Fig. 4.20-def. Na região de corte houve a formação de carbonetos simples uniforme acicular e hexagonal com orientação bem definida no local do desgaste e formação de trincas de solidificação, Fig. 4.20-bcde.

Figura 4.19: Micrografia apresenta as trincas da Faca-4 com reagente Nital 5%



Fonte: produzida pelo autor

Figura 4.20: Micrografica da região afetada pelos cortes da Faca-4 com reagente Nital 5%



Fonte: produzida pelo autor

Discussão geral

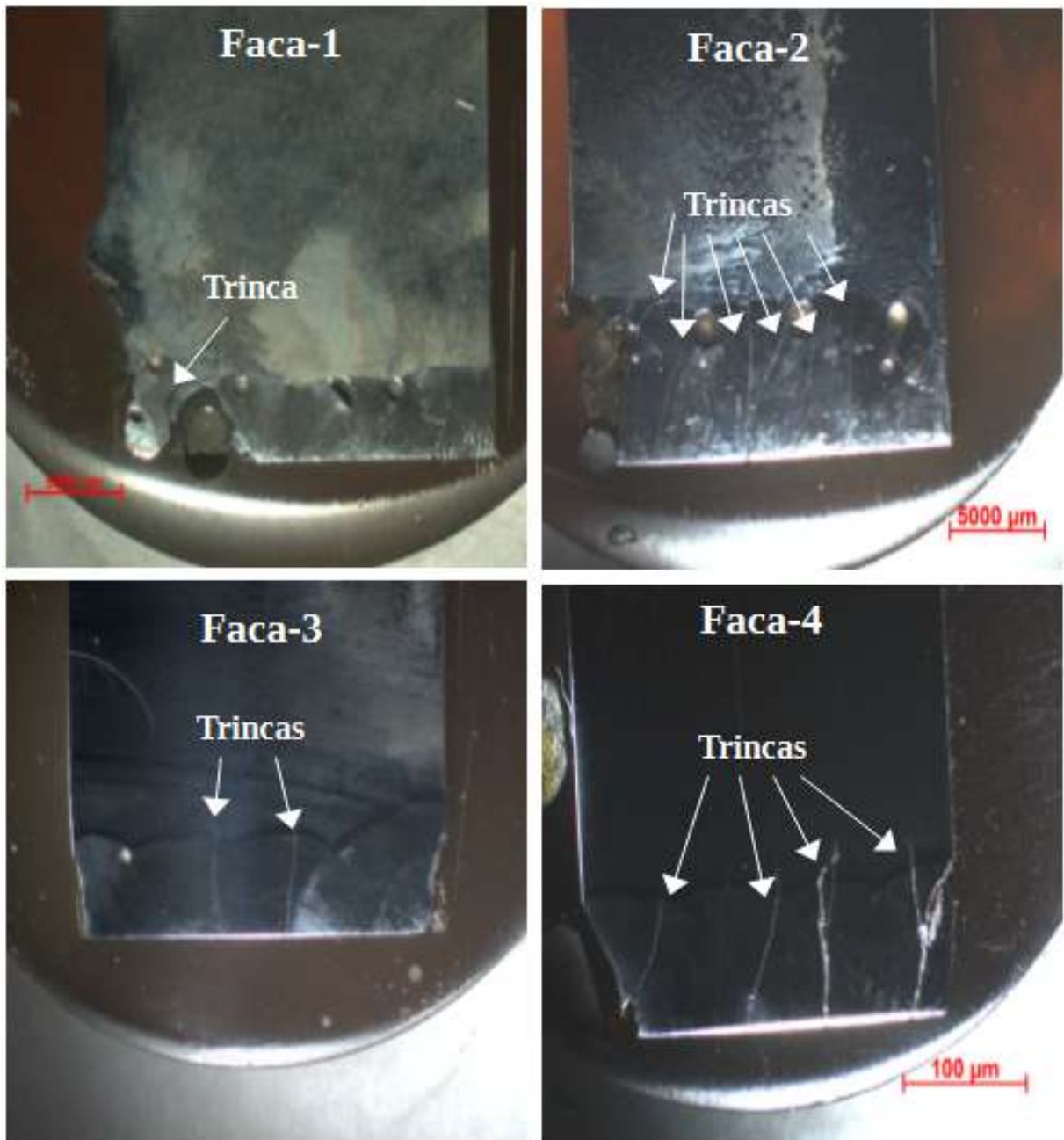
A Tab. 4.5 mostra um resumo dos resultados encontrados, para relação de alta e baixa em porosidade e/ou trincas foi considerado como alta quantidade a amostra com maior número e baixa para menor. O processo de soldagem com uma camada proporcionou menor número de trincas em relação ao material com duas camadas comparadas com os dois tipos iguais de substrato, isto se deve a alta dureza do material de adição que aumenta a formação de carbonetos e, promove comportamento de material frágil com maior possibilidade de trincas de solidificação, representado pela Fig. 4.21. O trabalho de Luz et al. (2020) apresentou um aumento dos carbonetos primários com o aumento do número de camadas. Este efeito aparentemente das microestruturas, não foi observado no presente trabalho. Também pode se observar pela Tab. 4.5 que as facas revestidas com 1 camada suportaram mais cortes do que as revestidas com 2 camadas. Isto pode ser devido à diminuição do efeito do substrato quando se aplicou 2 camadas. Neste caso, o substrato é mais tenaz do que o revestimento e absorve melhor a solicitação de corte para uma camada. No caso das facas com duas camadas a influência do substrato é diminuída e prevalece o material depositado com maior formação de carboneto. O excesso de carboneto pode ter prejudicado o revestimento com duas camadas, porque o carboneto primário favorece o aumento das trincas de solidificação.

Tabela 4.5: Resumo dos resultados encontrados (NA - Não apresentou)

Amostras	Substrato	Dureza Média (HV)	Número de Cortes	Presença de porosidade	Presença de trincas
Faca-o	VC-131	864	1.004	NA	NA
Faca-1	Aço carbono / 1 camada	710	217	Média	Baixo
Faca-2	Aço carbono / 2 camadas	735	33	Alto	Alto
Faca-3	VC-131 / 1 camada	760	1.004	Baixo	Baixo
Faca-4	VC-131 /2 camadas	755	117	Baixo	Alto

Fonte: produzida pelo autor

Figura 4.21: Comparação de trincas entre as facas

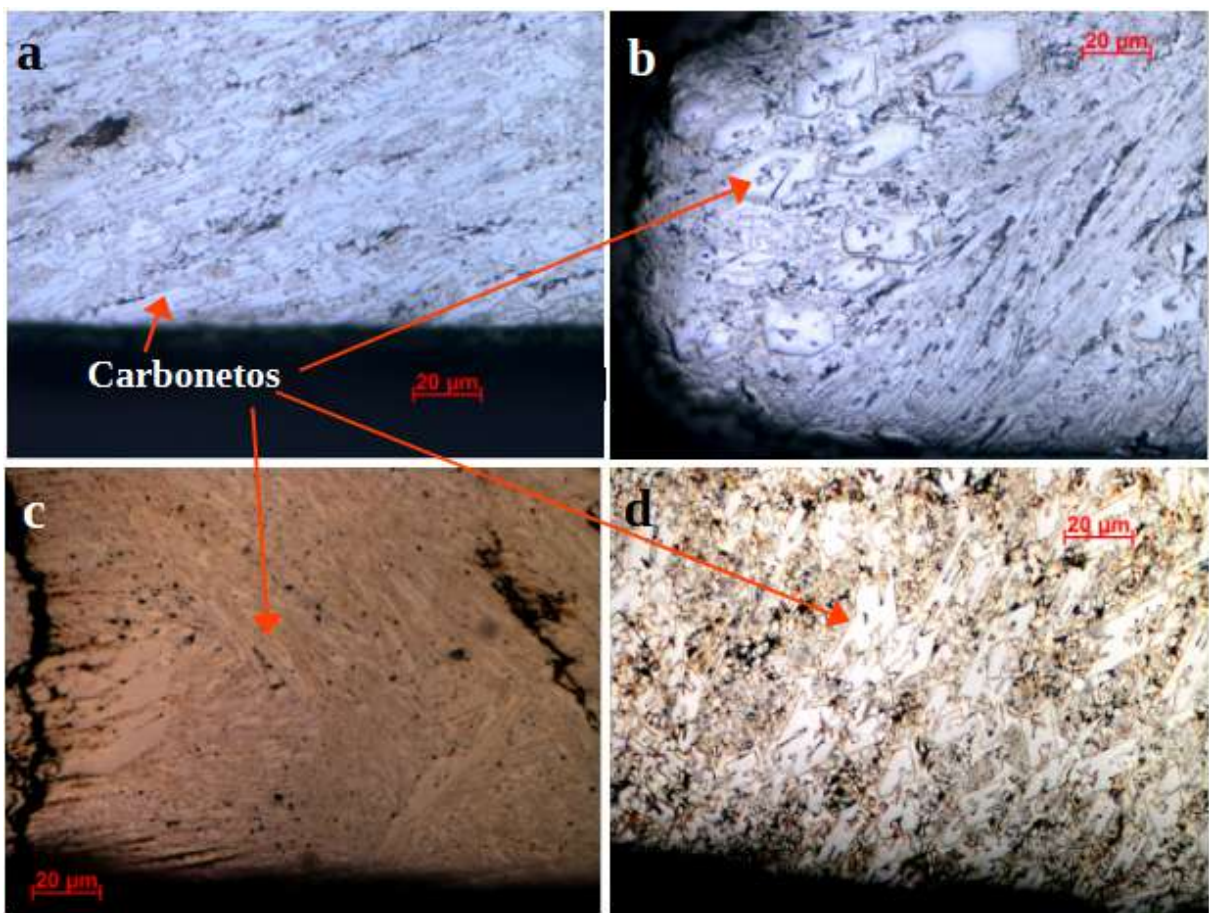


Fonte: produzida pelo autor

Observa-se na Fig. 4.22, para o revestimento com uma camada (Fig. 4.22-ac) no substrato de aço carbono comum e aço ferramenta, a formação de carbonetos aciculares. Esta estrutura é frequentemente observada em condições de resfriamento rápido. A presença dessas agulhas pode influenciar significativamente a dureza e a resistência ao desgaste do revestimento. Jilleh et al. (2021) observaram um aumento na quantidade de carbonetos primários com revestimento feito em duas camadas. No trabalho de Coronado, Caicedo e Gómez (2009) o teor de Cr aumentou com adição de 3 camadas devido a pouca influência do material de base que não fundiu com material de deposição, tendo como resultado menor dureza e maior perda de massa, citados pelos os autores. O trabalho de Gualco et al. (2015) também cita um aumento na formação dos carbonetos primários com o revestimento feito em duas camadas, que apresentou maior dureza em relação ao revestimento feito em uma camada. No trabalho de Chang et al. (2009) também apresentou uma transformação na geometria dos carbonetos em forma de lâmina para forma de bastão com aumento do teor de carbono aplicado no revestimento. Observa-se no substrato do aço carbono comum e aço ferramenta, a formação de carbonetos em forma hexagonal para o revestimento feito em duas camadas, representado pela Fig. 4.22-bd. Os carbonetos de cromo em forma hexagonal possuem uma morfologia mais equilibrada e regular em comparação com as estruturas em forma de agulha (acicular ou bastão). Essa formação pode ter relação com o gradiente térmico menor com duas camadas em relação à uma camada, permitindo um crescimento cristalino mais uniforme.

Na formação dessa microestrutura pode ter relação com o desempenho das facas de corte para o revestimento feito em uma camada para os dois substrato, aço carbono comum e o aço ferramenta.

Figura 4.22: Microestrutura das facas de cortes, a) Faca-1, b) Faca-2, c) Faca-3 e d) Faca-4



Fonte: produzida pelo autor

5 CONCLUSÃO

A partir dos materiais, métodos e análises dos resultados obtidos nos testes realizados neste trabalho, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Os testes de parametrização mostraram que os parâmetros adequados para realização dos revestimentos nas facas foram a DBCP 20 mm, tensão 29 V e velocidade de alimentação de 5 m/min, com velocidade de soldagem de 35 cm/min.
- Em todos os revestimentos foram constatadas trincas de solidificação e porosidades, em menores quantidades nos casos dos revestimentos feitos em uma camada para os dois tipos de substrato.
- Todas as facas revestidas apresentaram os valores de dureza semelhantes, considerando a variabilidade, a faca original (sem o revestimento) apresentou o maior valor de dureza.
- A faca original apresentou melhor resultado nos testes de corte, não tendo ocorrido colapso estrutural. Considerando-se as facas revestidas, as que apresentaram melhor desempenho no teste de corte foram com revestimentos feitos em uma camada, em ambos os substratos (Aço VC-131 e aço comum).
- O revestimento que apresentou melhor desempenho foi da faca revestida com uma camada sobre substrato do aço VC-131.
- Todas as facas com revestimento apresentaram perdas de material nas suas estruturas ao longo dos testes realizados, exceto a faca sem revestimento.
- A faca com revestimento no substrato do aço carbono comum em uma camada apresentou deformação no substrato.
- Todas as amostras de revestimento apresentaram, em suas microestruturas, carbonetos primários (Cr_7C_3) em forma de bastão e hexagonal.
- O revestimento com uma camada apresentou maior formação de carbonetos alongados na estrutura do revestimento, em ambos os substratos (Aço VC-131 e aço comum).
- O revestimento das facas de cortar vergalhão, com o material de adição usado nesse trabalho, não apresentou resultados satisfatórios nos testes realizados em campo.

6 TRABALHOS FUTUROS

- Realizar adição de eletrodo com menor teor de cromo em sua composição no revestimento a base de FeCrC para reduzir as trincas de solidificação e testar as propriedades mecânicas como dureza, resistência ao impacto e resistência à tração para verificar a eficácia do processo.
- Realizar revestimentos com arames de FeCrC com adição dos elementos Ti e V, bem como realizar os testes de resistência e analisar as microestruturas.
- Realizar preaquecimento e controle de temperatura entre passes com objetivo de diminuir a formação de trincas e porosidades.

REFERÊNCIAS

- ASM. *Welding Fundamentals and Processes*. [S.l.]: ASM International Handbook Committee, 2011. v. 06A.
- BAHOOSH, M.; SHAHVERDI, H. R.; FARNIA, A. Macro-indentation fracture mechanisms in a super-hard hardfacing fe-based electrode. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier Ltd, v. 92, p. 480–494, 10 2018. ISSN 13506307.
- BAHOOSH, M.; SHAHVERDI, H. R.; FARNIA, A. Abrasive wear behavior and its relation with the macro-indentation fracture toughness of an fe-based super-hard hardfacing deposit. *Tribology Letters*, Springer New York LLC, v. 67, 9 2019. ISSN 15732711.
- BECZKOWSKI, R.; GUCWA, M. Defects appearing in the surfacing layers of abrasion resistant. *Archives of Foundry Engineering*, De Gruyter Open Ltd, v. 16, p. 23–28, 12 2016. ISSN 22992944.
- BIANCHI, E. C. et al. Análise do comportamento da microestrutura de materiais endurecidos retificados com rebolos de cbn. *Materials Research*, SciELO Brasil, v. 3, p. 147–154, 2000.
- BOURITHIS, L.; PAPADIMITRIOU, G. The effect of microstructure and wear conditions on the wear resistance of steel metal matrix composites fabricated with pta alloying technique. *Wear*, Elsevier, v. 266, n. 11-12, p. 1155–1164, 2009.
- CAVALCANTE, H. D. S. et al. Operational parameters optimization of fcaw welding process for hardfacing applications. *Soldagem e Inspecao*, Universidade Federal de Uberlandia, v. 25, p. 1–10, 2020. ISSN 19806973.
- CHAIDEMENOPOULOS, N. G. et al. Aspects on carbides transformations of fe-based hardfacing deposits. *Surface and Coatings Technology*, Elsevier B.V., v. 357, p. 651–661, 1 2019. ISSN 02578972.
- CHANG, C. M. et al. Microstructure and wear characteristics of hypereutectic fe-cr-c cladding with various carbon contents. *Surface and Coatings Technology*, v. 205, p. 245–250, 10 2010. ISSN 02578972.
- CHANG, C. M. et al. Effect of carbon content on microstructure and corrosion behavior of hypereutectic fe-cr-c claddings. *Materials Chemistry and Physics*, v. 123, p. 241–246, 9 2010. ISSN 02540584.
- CHANG, C. M. et al. Effect of carbon content on microstructural characteristics of the hypereutectic fe-cr-c claddings. *Materials Chemistry and Physics*, v. 117, p. 257–261, 9 2009. ISSN 02540584.
- COLAÇO, F. H. G. et al. Influência da energia de soldagem no desgaste abrasivo de revestimentos duros aplicados pelo processo fcaw. In: SN. *VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Maranhão*. [S.l.], 2012.

COLAÇO, F. H. G.; MARANHO, O. *Avaliação da Perda de Massa de Revestimento Duro Depositado por Soldagem com Arame Tubular de Liga FeCrC-Ti (Evaluation of Mass Loss of Weld-Deposited Hardfacing with Cored Wire Ti-FeCrC Alloy)*. 2013. 58-068 p.

CORONADO, J. J.; CAICEDO, H. F.; GÓMEZ, A. L. The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology International*, v. 42, p. 745–749, 5 2009. ISSN 0301679X.

DWIVEDI, D. K. Microstructure and abrasive wear behaviour of iron base hardfacing. *Materials Science and Technology*, v. 20, p. 1326–1330, 10 2004. ISSN 02670836.

GUALCO, A. et al. Wear resistance of fe-based nanostructured hardfacing. *Procedia Materials Science*, Elsevier BV, v. 8, p. 934–943, 2015. ISSN 22118128.

GUALCO, A.; SVOBODA, H. G.; SURIAN, E. S. Efecto de los parámetros de soldadura sobre la microestructura de recargues nanoestructurados base hierro depositados por fcaw-s. *Soldagem Inspeção*, FapUNIFESP (SciELO), v. 19, p. 314–322, 12 2014.

GUALCO, A.; SVOBODA, H. G.; SURIAN, E. S. Study of abrasive wear resistance of fe-based nanostructured hardfacing. *Wear*, Elsevier Ltd, v. 360-361, p. 14–20, 8 2016. ISSN 00431648.

HTSTEELMILL. *Mat. No. AISI D6 Tool Steel*. 2022. Disponível em: <<https://www.htsteelmill.com/?p=801>>. Acesso em: 17 jul. 2022, 09:10:10.

JILLEH, A. et al. Microstructural and wear investigation of high chromium white cast iron hardfacing alloys deposited on carbon steel. *Journal of Alloys and Compounds*, Elsevier Ltd, v. 857, 3 2021. ISSN 09258388.

KASHANI, H.; AMADEH, A.; FARHANI, M. Improvement of wear resistance of hot working tool steel by hardfacing part 1 - effect of microstructure and hardness. *Materials Science and Technology*, v. 23, p. 165–170, 2 2007. ISSN 02670836.

LEITNER, M. et al. Wear and fatigue resistance of mild steel components reinforced by arc welded hard layers. *Surface and Coatings Technology*, Elsevier B.V., v. 330, p. 140–148, 12 2017. ISSN 02578972.

LIM, L. C.; MING, Q.; CHEN, Z. D. *Microstructures of laser-clad nickel-based hardfacing alloys*. 1998. 183-192 p.

LIMA, A. C.; FERRARESI, V. A. *Análise da resistência ao desgaste de revestimento duro aplicado por soldagem em facas picadoras de cana-de-açúcar*. [S.l.]: Abr, 2010. 94-102 p.

LIU, D. et al. Effect of simultaneous addition of ferroniobium and ferrotitanium on properties of hardfacing. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, Taylor and Francis Ltd., v. 34, p. 2231–2240, 12 2018. ISSN 17432847.

LIU, D. S.; WEI, Y. H.; LIU, R. P. Microstructure and wear mechanism change by nb added in slag free self-shielded flux cored wire. *Science and Technology of Welding and Joining*, Maney Publishing, v. 20, p. 693–701, 11 2015. ISSN 17432936.

LIU, H. Y. et al. Microstructure and properties of fe-cr-c hardfacing alloys reinforced with tic-nbc. *Journal of Iron and Steel Research International*, Gangtie Yanjiu Xuebao, v. 23, p. 276–280, 3 2016. ISSN 1006706X.

- LUZ, A. H. de S. et al. Microstructural aspects and mechanical behavior of hardfacing deposited by fcaw. *Revista Materia*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 25, p. 1–12, 2020. ISSN 15177076.
- MARQUES, V. F. d. O. Análise da aplicação de revestimento duro em aço carbono com o processo fcaw com e sem injeção de arame não energizado. 2023.
- MING, Q.; LIM, L. C.; CHENC, Z. D. *Laser cladding of nickel-based hardfacing alloys*. 1998. 174-182 p.
- MURAD, M. de Q.; FERARESSI, V. A.; SALES, W. F. Sustainable welding processes – case study of hard coating application in sugar cane mills. *Soldagem e Inspecao*, University Federal de Uberlandia, v. 25, p. 1–10, 2020. ISSN 19806973.
- PANTELIS, D.; MICHAUD, H.; FREITAS, M. D. Wear behaviour of laser surface hardfaced steels with tungsten carbide powder injection. *Surface and Coatings Technology*, Elsevier, v. 57, n. 2-3, p. 123–131, 1993.
- SOUSA, J. M. S. de et al. Abrasion resistance of fe–cr–c coating deposited by fcaw welding process. *Wear*, Elsevier Ltd, v. 476, 7 2021. ISSN 00431648.
- SOUZA, D. D. B. G. de; FERRARESI, V. A. Aplicação de revestimento duro utilizando o processo fcaw duplo arame para diferentes tipos de consumíveis utilizados na indústria sucroalcooleira. *Revista Materia*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 22, 2017. ISSN 15177076.
- TIAN, J. et al. The indentation and wear performance of hardfacing layers on h13 steel for use in high temperature application. *AIP Advances*, American Institute of Physics Inc., v. 9, 9 2019. ISSN 21583226.
- VIňáš, J.; GREŠ, M.; VAŠKO, T. Cladding of wear-resistant layers in metallurgy and engineering. *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, v. 862, p. 41–48, 2016. ISSN 16629752.
- VOESTALPINE. *Consumíveis para Manutenção e Reparo*. 2022. Disponível em: <www.sbrrevestimentos.com.br>. Acesso em: 17 jul. 2022, 06:52:50.
- YANG, J. et al. Mechanical properties of the hypereutectoid fe-cr-c hardfacing coatings with different nano-y₂o₃ additives and the mechanism analysis. *Materials Science and Engineering A*, Elsevier Ltd, v. 655, p. 346–354, 2 2016. ISSN 09215093.
- ZHAO, C. et al. Micro-properties of (nb,m)c carbide (m= v, mo, w and cr) and precipitation behavior of (nb,v)c in carbide reinforced coating. *Journal of Alloys and Compounds*, Elsevier Ltd, v. 788, p. 852–860, 6 2019. ISSN 09258388.
- ZHOU, Y. F. et al. Dry sliding wear behavior of (cr, fe)₇c₃-(cr, fe) metal matrix composite (mmc) coatings: The influence of high volume fraction (cr, fe)₇c₃ carbide. *Tribology Letters*, Springer New York LLC, v. 66, 9 2018. ISSN 10238883.

Apêndices

APÊNDICE A – TESTES PARA PARAMETRIZAÇÃO

Figura A.1: Teste da soldagem realizado nas chapas de aço para parametrização da solda.



Fonte: produzida pelo autor.

APÊNDICE B – RESULTADO DOS TESTES DA PARAMETRIZAÇÃO

Tabela B.1: Dados para parametrização dos cordões de soldas (DBCP - distância do bico contra peça, U - tensão, V_{alim} - velocidade de alimentação, U_{med} - tensão média, I_{med} - corrente média e I_{RMS} - corrente RMS ou eficaz.

Testes	DBCP	U(V)	$V_{alim}(m/min)$	U_{med}	$I_{med}(A)$	$I_{RMS}(A)$
1	18	22	5	21,4968	189,867	221,223
2	18	22	10	21,3868	285,109	318,656
3	18	22	15	21,7110	340,401	387,060
4	18	25	5	24,6193	187,858	215,055
5	18	25	10	24,1078	283,639	314,627
6	18	25	15	24,7524	311,682	380,861
7	18	29	5	27,9513	197,249	219,511
8	18	29	10	27,6788	294,084	318,793
9	18	29	15	27,4722	356,087	370,914
10	20	22	5	21,5303	165,539	210,616
11	20	22	10	21,4348	265,463	300,840
12	20	22	15	22,1560	306,566	368,774
13	20	25	5	24,8351	173,244	207,592
14	20	25	10	24,4392	269,481	307,242
15	20	25	15	25,0567	302,612	384,964
16	20	29	5	25,1827	187,250	202,383
17	20	29	10	28,6286	268,118	297,332
18	20	29	15	27,6139	340,553	356,793
19	22	22	5	21,4206	159,928	206,442
20	22	22	10	21,4271	267,910	302,599
21	22	22	15	21,4845	325,807	364,669
22	22	25	5	24,3656	177,777	213,654
23	22	25	10	24,2421	263,956	295,607
24	22	25	15	27,9383	276,616	348,153
24	22	29	5	28,2439	184,137	204,532
26	22	29	10	27,8265	262,437	292,254
27	22	29	15	27,5860	334,857	359,288

Fonte: produzida pelo autor.

ÍNDICE

- Abrasão, 51
- Abrasiva, 42
- Abrasivo, 39, 45
- Abrasivos, 37
- Alimentação, 49
- Altura, 57
- Alumínio, 58
- Amanteigamento, 28, 29
- Amostras, 53, 59
- Aplainamento, 64
- Arame, 51, 52
- Arames
- FeCrC, 2
- Atrito, 7, 9
- Austenita, 10, 16, 25, 27–29, 36, 45, 70
- Autenita, 35
- Autoprotégido, 28, 29, 42
- Autor
- (BAHOOSH; SHAHVERDI; FARNIA, 2019), 33, 34
 - (SOUSA et al., 2021), 42, 47
 - (JILLEH et al., 2021), 12, 13
 - (COLAÇO et al., 2012), 39, 40
 - (CHANG et al., 2009), 21
 - (CORONADO; CAICEDO; GÓMEZ, 2009), 9, 14, 20
 - (ASM, 2011), 8
 - (MARQUES, 2023), 37
 - (CHANG et al., 2010b), 21, 22
 - (CHANG et al., 2010a), 45, 46
 - (LIMA; FERRARESI, 2010), 23
 - (COLAÇO; MARANHÃO, 2013), 16, 17, 38
 - (GUALCO; SVOBODA; SURIAN, 2014), 38, 39
 - (LIU; WEI; LIU, 2015), 24, 25
 - (GUALCO et al., 2015), 18, 19
 - (GUALCO; SVOBODA; SURIAN, 2016), 14, 15, 17
 - (BECZKOWSKI; GUCWA, 2016), 8
 - (VIÑÁŠ; GREŠ; VAŠKO, 2016), 11
 - (LIU et al., 2016), 25, 26
 - (SOUZA; FERRARESI, 2017), 30
 - (BAHOOSH; SHAHVERDI; FARNIA, 2018), 46, 48
 - (LUZ et al., 2020), 35, 36
 - (LIU et al., 2018), 27, 28
 - (ZHOU et al., 2018), 43, 44
 - (CHAIDEMENOPOULOS et al., 2019), 29, 31
 - (ZHAO et al., 2019), 32
 - (TIAN et al., 2019), 10
 - (BAHOOSH; SHAHVERDI; FARNIA, 2019), 11, 33, 71
 - (MURAD; FERARESSI; SALES, 2020), 41
 - (CAVALCANTE et al., 2020), 41
 - (SOUSA et al., 2021), 42, 45
 - (JILLEH et al., 2021), 12, 80
 - (KASHANI; AMADEH; FARHANI, 2007), 7
 - (MING; LIM; CHENC, 1998), 7
 - (LIM; MING; CHEN, 1998), 7
 - (COLAÇO et al., 2012), 39
 - (DWIVEDI, 2004), 7
 - (CHANG et al., 2009), 80
 - (CORONADO; CAICEDO; GÓMEZ, 2009), 7, 9, 13, 18, 62, 80
 - (BOURITHIS; PAPADIMITRIOU, 2009), 7
 - (PANTELIS; MICHAUD; FREITAS, 1993), 7

- (MARQUES, 2023), 36, 71
 (CHANG et al., 2010b), 20, 69
 (CHANG et al., 2010a), 45
 (LIMA; FERRARESI, 2010), 21, 62
 (COLAÇO; MARANHÃO, 2013), 16, 37, 62
 (GUALCO; SVOBODA; SURIAN, 2014), 38, 39
 (LIU; WEI; LIU, 2015), 23, 32
 (GUALCO et al., 2015), 17, 62, 80
 (YANG et al., 2016), 11
 (GUALCO; SVOBODA; SURIAN, 2016), 14, 17
 (BECZKOWSKI; GUCWA, 2016), 8
 (VIŇÁŠ; GREŠ; VAŠKO, 2016), 10, 11
 (LIU et al., 2016), 25, 32
 (SOUZA; FERRARESI, 2017), 28, 32, 69
 (BAHOOSH; SHAHVERDI; FARNIA, 2018), 11, 46
 (LUZ et al., 2020), 35, 78
 (LIU et al., 2018), 27, 32
 (ZHOU et al., 2018), 43
 (CHAIDEMENOPOULOS et al., 2019), 29, 32
 (ZHAO et al., 2019), 32
 (TIAN et al., 2019), 9
- Barreira, 10
- Características, 7, 20, 51
- Carboboretos
- Complexo, 46
 - Eutético, 46
 - Nb, 46
 - Primário, 46
- Carboneto, 1, 16
- C, 9
 - Complexo, 18
 - Complexos, 18
- Cr, 9
 - Fe, 9
 - Nb, 18
- Carbonetos, 12, 36, 42, 43, 45, 78
- Cr, 33, 78, 80
 - Eutético, 25
 - Hexagonais, 71
 - Nb, 12, 23, 24, 27–29, 32, 33, 35, 36
 - Nióbio, 25
 - Primário, 25, 27, 28, 42, 45
 - Primários, 10, 12, 16, 20, 23, 29, 32, 33, 35, 43, 75
 - Secundários, 16
 - Simple, 36, 70, 71
 - Ti, 27–29, 38
 - Titânio, 25
 - V, 32
 - W, 29, 32
- Cisalhamento, 49
- Composição, 51
- Comprimento, 57
- Contagem, 57, 58
- Convexidade, 55
- Corrente, 52, 53
- Corrosão, 7, 9
- Corte, 58
- D6, 49–51
- DBCP, 61, 63
- Defeitos, 9
- Cavidades, 9
 - Microtrincas, 2
 - Porosidade, 2, 9, 37, 59, 71, 75
 - Porosidades, 20
 - Trincas, 9, 20, 21, 28, 29, 33, 35–37, 70, 71, 75, 76, 78
- Deformação, 58, 67, 71
- Degradação, 67
- Degradado, 7
- Delaminação, 2

- Dendritas, 10
- Deposição, 6, 8, 14, 42
- Desempenho, 49, 66
- Desenvolvimento, 3
- Desgaste, 1, 2, 7, 10, 14, 23, 24, 39, 45, 58, 67, 75, 76
- Desgastes, 6, 21, 27–29, 43, 55
- Diluição, 38, 39, 42, 45, 54, 60
- Ductilidade, 70
- Dureza, 9–13, 16, 18, 20, 24, 25, 27, 32, 33, 36, 38, 39, 42, 45, 46, 49, 51, 54, 55, 61, 63–66, 70, 78
- Elementos
- B, 14, 18, 23, 25, 27, 29, 32, 33, 46
- C, 14, 16, 18, 20, 21, 23–25, 27–29, 35–37, 42, 43, 45, 46, 70, 71, 75
- Cr, 13, 14, 16, 20, 21, 23, 25, 28, 29, 32, 33, 35–37, 42, 43, 45, 46, 70
- Cu, 20
- Fe, 16, 18, 21, 23, 25, 27–29, 35–37, 42, 43, 45, 46, 70
- Mn, 1, 14
- Mo, 20, 32, 33
- Nb, 1, 14, 20, 21, 23–25, 27–29, 32, 33, 35, 36, 42, 71, 75
- Si, 1, 20
- Ti, 1, 13, 16, 20, 21, 25, 27–29, 32, 33, 36, 37
- V, 1, 20, 32, 33
- W, 1, 20, 32, 33
- Enchimento, 23
- Energia, 9
- Ensaio, 66
- Ensaio, 54, 55
- Equipamentos, 9
- Estrutura, 10
- Fabricante, 51, 53
- Faca-2, 2
- Facas, 49, 58
- Faca-o, 70
- Faca-1, 2, 65–67, 71, 75
- Faca-2, 65–67, 71, 75
- Faca-3, 2, 65–67, 75
- Faca-4, 2, 65–67, 76, 78
- Faca-o, 2, 64, 66, 67, 71
- Picotadoras, 21
- Facas:Faca-1, 55, 57
- Facas:Faca-2, 55, 57
- Facas:Faca-3, 55, 57
- Facas:Faca-4, 55, 57
- Facas:Faca-o, 57
- Fadiga, 1, 9
- Fadigas, 7
- Falha, 9
- Fases, 9, 14
- Fatores, 9
- Ferramentas, 49
- Ferrita, 46
- Geometria, 28, 42, 59, 60, 75
- Grão, 16
- Hardfacing, 4, 6, 7
- IC, 55, 60, 61
- Impacto, 49, 51
- Largura, 38, 39, 42, 54, 55, 57, 60
- Lascamento, 67
- Lixamento, 58
- Máquina, 49
- Método, 54
- Martensita, 16, 25, 27
- Materiais, 51
- Matriz, 10, 16, 20, 28, 29, 36, 42, 70, 71
- Metal, 52
- Metalográfica, 2
- Microdureza, 11, 29, 35, 45
- Microestrutura, 9

- Microestrutura, 2, 10, 13, 14, 16, 20, 23,
25, 27–29, 36, 37, 42, 43, 45, 46,
70, 71, 78
- Microestrutural, 58
- Microesturtura, 12
- Molhabilidade, 55
- Morfologia, 78
- Nucleação, 42, 43
- Padronizada, 52
- Parâmetro, 36, 37
- Parâmetros, 8, 9, 14, 39, 51, 54, 55, 61, 63
- Corrente, 2
 - DBCP, 2
 - Tensão, 2
- Parametrização, 52, 59
- Pedaços, 58
- Penetração, 8, 10, 38, 39, 54, 59, 60
- Polimento, 58
- Posição, 51
- Precipitação, 23, 71
- Preenchida, 57
- Preenchimento, 11, 12, 54, 58, 64
- preenchimento, 7
- Processo, 1, 6, 8–11, 14, 17, 20, 25, 29, 36,
39, 42, 43, 45, 49, 51, 54, 55, 78
- Processos, 7
- Propriedadee, 51
- Propriedades, 7, 12, 20
- Proteção, 8, 17
- Quebra, 7
- Recuperação, 1
- Recuperar, 7
- Reforço, 38, 39, 42, 54, 60
- Rendimento, 42
- Resfriamento, 78
- Resina, 58
- Resistência, 1, 2, 6, 7, 9, 10, 17, 20, 21,
27, 33, 42, 45, 78
- Resultados, 10, 21, 60, 61
- Retíficas, 57
- Revestimento, 1–3, 6–13, 16–18, 20, 23,
25, 27–29, 32, 33, 35, 37, 38, 42,
43, 45, 46, 51, 55, 57–61, 65–67,
70, 71, 75, 76, 78, 80
- Revisão
- Bibliográfica Sistemática, 4
- Rsistência, 14
- Soldagem, 52–55
- AW, 7
 - B, 7
 - FCAW, 1, 2, 4, 7–14, 16–18, 20, 23,
25, 27–29, 31–33, 35–39, 41, 43,
45, 46
 - Fixes a laser, 7
 - GMAW, 11
 - GTAW, 9
 - MIG/MAG, 1, 7
 - OFW, 7
 - PAW, 7
 - SAW, 1, 7, 9, 10
 - SMAW, 1, 7, 9–11, 13, 18, 29
 - SSW, 7
- Substrato, 20, 67, 78
- Suporte, 58
- Taxas, 45
- Tecnologia, 7
- Temperatura, 9, 10, 25, 29, 36
- Tenacidade, 20, 46
- Tensão, 12, 13, 52–55
- Tesouras, 49
- Teste, 13
- Testes, 10, 11, 17, 21, 24, 27, 32, 33, 38,
39, 42, 43, 46, 52, 53, 57–59, 61,
67
- Titânio, 10
- Tocha, 52

Tração, 49
Trincas, 33, 35
Usinagem, 55
Variabilidade, 39, 42, 63
VC-131, 2, 49, 51, 55, 61, 63, 66, 75
Velocidade, 49, 52, 55
Vergalhão, 49, 55, 58, 75
Vergalhões, 1, 6