

## Aplicação de revestimento duro utilizando o processo FCAW duplo arame para diferentes tipos de consumíveis utilizados na indústria sucroalcooleira

Application of hardfacing of diferents types consumables used in sucroal-cooleira industry with the FCAW double wire process

Daniel Dominices Baía Gomes de Souza<sup>1</sup>,  
Valtair Antonio Ferraresi<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Universidade Federal de Uberlândia, UFU/FEMEC, Av. João Naves de Ávila 2121, Campus Santa Mônica, CEP 38.400-902, Uberlândia, MG.

e-mail do autor 1: danieldominices@hotmail.com

e-mail do autor 2: valtair@ufu.br

---

### RESUMO

A aplicação de revestimentos com o objetivo de reduzir o desgaste em equipamentos e, conseqüentemente os custos de manutenção, busca obter o incremento da vida em serviço e redução das paradas programadas. Uma correta seleção do material depositado permite, dentre outras coisas, transformar elementos descartáveis por desgaste em bens de capital recuperável, aumentar a resistência e prover as superfícies susceptíveis ao desgaste de características e propriedades desejadas e, em geral, aumentar a eficiência do processo. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos duros depositados em camada única através do processo de soldagem FCAW (Flux - Cored Arc Welding) Duplo Arame, com arame tubular auto protegido. Foram utilizados três tipos de consumíveis aplicados nos revestimentos de martelos e facas picadoras da indústria sucroalcooleira (FeCrC, FeCrC+Ti e FeCrC+Nb) de diâmetro 1,6 mm em doze condições de revestimento diferentes. O revestimento por soldagem foi aplicado sobre uma chapa de aço carbono SAE 1020 com e sem amanteigamento de liga E308LSi, utilizando-se o modo de transferência metálica por curto-circuito. Construíram-se corpos de prova para a avaliação do desgaste em laboratório com abrasômetro Roda de Borracha de acordo com a norma ASTM G65-00. A avaliação de desgaste foi feita via perda de massa. Foram realizadas também análise de dureza, microdureza e microestrutura dos revestimentos. Os melhores resultados de resistência ao desgaste foram obtidos com a utilização dos dois arames eletrodo de mesma composição (FeCrC+Ti - FeCrC+Ti). A presença do Ti no revestimento apresentou menor quantidade de trincas e melhor resistência ao desgaste. As condições com amanteigamento não demonstraram bons resultados com relação à resistência ao desgaste dos revestimentos.

**Palavras-chave:** FCAW duplo arame, revestimento duro, arame tubular, resistência ao desgaste.

---

### ABSTRACT

The application of hardfacing brings the reduction of the wear and therefore increases service life of components and reducing the maintenance shutdowns. This work aims to study the wear resistance of hardface applied by welding, by using the process FCAW (Flux- Cored Arc Welding) Self-Shield Double Wire. Three types of consumables used in coating hammers and knives of the sugar industry were used. (FeCrC, FeCrC+Ti and FeCrC + Nb) with diameter 1.6 mm in twelve coating conditions. The coating was applied by welding on a steel SAE 1020 with and without E308LSi buttering, with metal transfer mode in short circuit. It was compared the deposits made with each condition. It was constructed specimens for the evaluation of wear in the laboratory with Rubber Wheel according to ASTM G65-00. The wear evaluation was made via mass loss. It was also carried analysis hardness and microhardness of the coating microstructure. The best wear resistance results were obtained with the use of two wires electrode with the same composition (FeCrC + Ti). The presence of Ti in the coating has fewer cracks and improves wear resistance in this study. The conditions with buttering have not shown good results with respect to wear

resistance of coatings.

**Keywords:** FCAW Double Wire, Hardfacing, Wear Resistance, Welding Process.

## 1. INTRODUÇÃO

Introduzida no período colonial a cana-de-açúcar se transformou em uma das principais monoculturas da economia brasileira. O Brasil não é apenas o maior produtor de cana-de-açúcar, mas também o primeiro do mundo na produção de açúcar e etanol e tem conquistado o mercado externo devido à utilização de biocombustíveis como alternativa energética por meio de material renovável. Responsável por mais da metade do açúcar comercializado no mundo, o país deve alcançar taxa média de aumento da produção de 3,25%, até 2018/19, e colher 47,34 milhões de toneladas do produto, o que corresponde a um acréscimo de 14,6 milhões de toneladas em relação ao período 2007/2008 [1].

Verifica-se com isto que o setor sucroalcooleiro brasileiro tem apresentado um expressivo crescimento nos últimos anos, entretanto, a manutenção das indústrias sucroalcooleira apresenta um elevado custo devido à perda de metal dos equipamentos por mecanismos de desgaste, onde a deterioração das ferramentas é grande e a vida em serviço dos componentes é curta [2].

Nos componentes dos equipamentos do setor sucroalcooleiro, em especial nas facas e martelos desfiadores utilizados no preparo da cana para a moenda, predomina a ocorrência de desgaste abrasivo. O desgaste é provocado pelo deslizamento de vários materiais na superfície da peça, como bagaço da cana, areia, terra e outros materiais estranhos, bem como, pela corrosão devido à acidez do caldo da cana [3].

Alguns métodos foram desenvolvidos e incorporados aos processos de fabricação visando prolongar a durabilidade de componentes. Entre eles a técnica de revestimento duro (Hardfacing), que trata da deposição por soldagem de um material com elevada resistência ao desgaste sobre a superfície da peça [4].

Novos desenvolvimentos visando alta produtividade e melhores qualidades do processo de soldagem FCAW (Flux Cored Arc Welding) conduziram para a criação de variantes dessa técnica. O processo FCAW Duplo Arame foi desenvolvido para áreas de aplicação onde altas taxas de deposição são necessárias (comparável ao processo arco submerso), mas que a flexibilidade do processo FCAW é desejada. A versão mais comum do processo com Duplo Arame é realizada com a utilização de duas fontes de energia e dois arames alimentados separadamente através de uma única tocha.

LIMA [2] estudou a aplicação de revestimentos duros depositados por soldagem com o processo FCAW em facas picadoras de cana-de-açúcar, utilizando quatro tipos de consumíveis, sendo três arames tubulares e um eletrodo revestido com elementos básicos idênticos de FeCrC, diferenciados pela adição de Ti e Nb. Foi verificado um melhor desempenho no ensaio de desgaste por roda de borracha da liga com adição de Níobio (Nb). Entretanto, em aplicações em campo com as facas picadoras de cana-de-açúcar, onde além do desgaste abrasivo existia também a presença de cargas cíclicas geradas pelo impacto das facas na estrutura, a presença de trincas no revestimento influenciou de forma significativa na durabilidade do revestimento. O revestimento com maior quantidade de trincas apresentou no final da utilização do equipamento (30 dias de utilização) um maior desgaste médio comparado com os revestimentos com menor nível de trincas antes de sua utilização.

Pesquisas realizadas por GARCIA [5] com o objetivo de avaliar a resistência ao desgaste abrasivo de revestimento com diferentes ligas de ferro com alto teor de cromo e carbono (FeCrC), cuja composição foi ajustada através da mistura de diferentes arame eletrodos na mesma poça de fusão (processo FCAW com arame frio não energizado), de forma a produzir na solidificação da poça de fusão microestrutura resistente ao desgaste abrasivo. Esta pesquisa demonstrou que é possível obter revestimento de boa resistência ao desgaste com menor quantidade de trincas. Segundo GARCIA [5], uma possível diminuição da resistência ao desgaste nas amostras revestidas pode ser atribuída à elevada presença de trincas transversais à direção de desgaste e porosidades onde as partículas abrasivas podem-se adentrar e, somadas com a compressão imposta pelo disco de borracha provocam um desgaste mais acentuado na extremidade de saída.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é estudar a técnica de aplicação de revestimento duro em chapas de aço carbono com diferentes tipos de consumíveis utilizados na indústria sucroalcooleira com o processo de soldagem FCAW Duplo Arame, visando obter condições de aplicação de revestimento de melhor resistência ao desgaste abrasivo com menor ocorrência de trincas de solidificação.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Testes foram realizados utilizando chapas de aço ao carbono ABNT 1020 com dimensões de 12,7 x 50,8 x 250 mm, onde os consumíveis utilizados na soldagem dos revestimentos foram arames tubulares de 1,6 mm de diâmetro. A Tabela 1 apresenta a composição química dos arames, fornecida pelo fabricante, e o

arame maciço ER308LSi de diâmetro 1,2 mm. O arame maciço ER308LSi foi utilizado para a confecção dos corpos de prova com amanteigamento, cujo objetivo foi diminuir ou eliminar as trincas de solidificação, verificadas nos trabalhos de LIMA [2] e GARCIA [5].

**Tabela 1:** Composição química (% em peso) dos arames fornecida pelo fabricante.

Consumível	Porcentagem em Peso (%)											
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	P	S	Cu	Nb	Ti	V
FeCrC	5,0	1,5	1,5	2,7	-	-	-	-	-	-	-	-
FeCrC+Nb	5,0	0,5	1,0	22	-	-	-	-	-	7,0	-	-
FeCrC+Ti	1,8	1,2	0,7	6,5	0,8	-	-	-	-	-	5,0	0,2
ER308LSi	0,03	1,0- 2,5	0,30- 0,65	19,5- 22,0	0,75	9,0-11,0	0,03	0,03	0,75	-	-	-

Para a realização dos revestimentos soldados utilizou-se duas fontes de soldagem eletrônicas multi-processo, ajustada no modo de tensão constante. A mesa de soldagem utilizada possui um sistema automático de deslocamento, sendo a velocidade mínima de soldagem no eixo "X" é de 5 mm/s e a máxima de 60 mm/s, a resolução da mesa é de 0,0001 mm/s para a velocidade e 0,0001 na distância.

A soldagem de revestimento foi efetuada em camada única na posição plana com a tocha na vertical formando um ângulo de 90° com a superfície da chapa em disposição longitudinal "Tandem Wire" - ao longo do cordão de solda - na direção da velocidade de soldagem onde os dois arames atuaram juntos, sendo um a frente do outro, com uma distância entre bicos de contato de 15 mm. O comprimento dos cordões de solda foi de 200 mm e cada revestimento foi feito preenchendo a chapa com três cordões de solda.

A Tabela 2 apresenta as condições de aplicação de revestimento, mantendo constante a velocidade de soldagem em 12 mm/s, velocidade de alimentação em 12 m/min e DBCP (Distância do Bico de Contato a Peça) em 25 mm para todas as condições. Os valores de corrente informados na Tabela 2 são valores médios da aquisição de dados e os valores de tensão correspondem à condição imposta na fonte de soldagem de 32 V. A condição indicada por (1) corresponde ao arame mestre (o que vai à frente) e a (2) indica o arame escravo (o que fica atrás). O objetivo foi avaliar a resistência ao desgaste dos depósitos de solda realizados com mesma corrente de soldagem e mesmo volume de metal depositado por comprimento de solda, isto é, a relação  $V_{lim}/V_{sold}$  foi mantida constante.

**Tabela 2:** Parâmetros de aplicação de revestimento por soldagem utilizando o processo FCAW duplo arame.

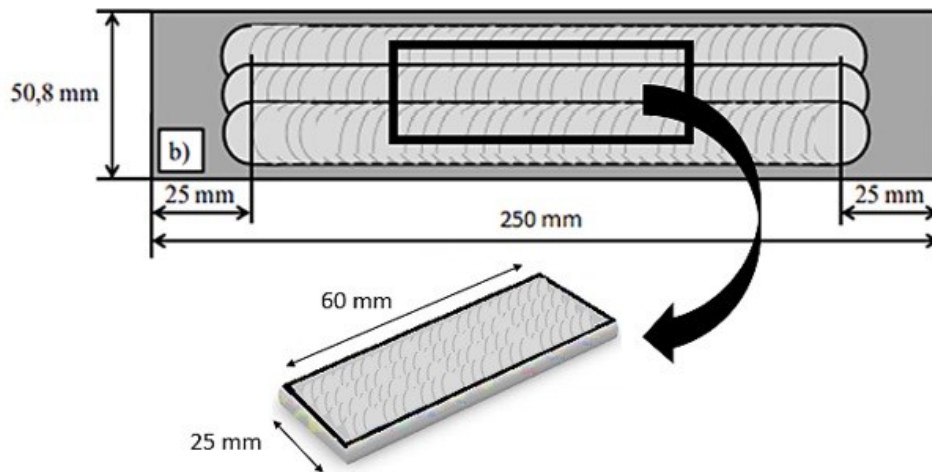
ENSAIO Nº		CONDIÇÃO	Um 01 (V)	Um 02 (V)	Im 01 (A)	Im 02 (A)
01	Sem amanteigamento	FeCrC (1) - FeCrC (2)	31,6	27,7	353,8	350,2
02		FeCrC+Ti (1)-FeCrC+Ti (2)	32,3	31,2	326,6	345
03		FeCrC+Nb (1)-FeCrC+Nb (2)	31,7	31,4	375	373,6
04		FeCrC (1)-FeCrC+Ti (2)	30,6	28,8	393,2	347,5
05		FeCrC (1)-FeCrC+Nb (2)	31,3	31,1	340,5	363,6
06		FeCrC+Ti (1)-FeCrC+Nb (2)	32,3	31,1	319,2	355,9
07	Com amanteigamento	FeCrC (1) - FeCrC (2)	31,5	29,1	352	349
08		FeCrC+Ti (1) - FeCrC+Ti (2)	32,3	31,2	333,5	347,1
09		FeCrC+Nb (1) - FeCrC+Nb (2)	32,1	30,9	379,8	376,5
10		FeCrC (1) - FeCrC+Ti (2)	31,8	31,2	344,7	316,2
11		FeCrC (1) - FeCrC+Nb (2)	30,9	30,8	357,3	364,7
12		FeCrC+Ti (1) - FeCrC+Nb (2)	32,3	31,2	347,1	382,8

Onde: Im = Corrente média; Um = tensão média. Condição (1) indica que é o arame líder e o (2) indica que é o arame seguidor (o que fica atrás). O amanteigamento foi realizado com o arame maciço ER308LSi.

Os corpos de prova para a execução do ensaio de desgaste por Roda de Borracha foram retirados do meio das chapas revestidas, como ilustrado na Figura 1. As dimensões dos corpos de prova são 12,7x25x60mm e correspondem às exigidas pela norma ASTM 65-00 [6]. A superfície dos corpos foi retificada após o corte para obter uma superfície plana onde será posicionada a roda de borracha.

Os ensaios de desgaste foram realizados através da utilização de um abrasômetro Roda de Borracha a seco construído de acordo com a norma ASTM 65-00 [6]. O equipamento é recomendado para simulação de desgaste abrasivo de baixa tensão (ensaio tipo B segundo ASTM 65-00). Durante o ensaio se mantiveram as seguintes condições fixas: Dimensões do disco de 12,7 x 228 mm; anel de borracha com dureza de 60 Shore A (espessura de 12,7 mm); a areia Normal Brasileira No. 100 (0,15 mm); rotação do disco de 200 RPM; tempo de ensaio de 15 min; 5 min de pré-desgaste e 10 min de desgaste; carga de 130 N; distância percorrida em cada ensaio foi de 1436 m. O desgaste foi avaliado em função da perda de peso dos corpos de prova pela comparação entre o peso antes e após o ensaio, através da pesagem em balança eletrônica com resolução de  $10^{-4}$ g. Antes da pesagem, as amostras foram cuidadosamente limpas e imersas em acetona, em equipamento de limpeza por ultrassom e em seguida, secas com ar quente.

**Figura 1:** Extração dos corpos de prova para o ensaio de desgaste.



O valor da resistência ao desgaste ( $R_{\text{desgaste}}$ ), inverso da taxa de desgaste, foi obtido mediante a Equação 1 com os dados do desgaste ( $Desg_m$ ) – ou perda de massa - e a distância ( $D_{\text{ensaio}}$ ) percorrido durante o ensaio igual a 1436 m.

$$R_{\text{desgaste}} = \left( \frac{Desg_m}{D_{\text{ensaio}}} \right)^{-1} \left[ \frac{mg}{m} \right]^{-1}$$

(1)

Para a avaliação microestrutural foram extraídas amostras do meio do revestimento as quais foram embutidas, desbastadas com lixa #220, #320, #400, #500, #600, #800, #1200 e polidas com alumina de 01  $\mu$ m. Posteriormente foram atacadas com reagente água régia por 10s e levadas ao microscópio ótico para revelar os carbonetos e microconstituintes.

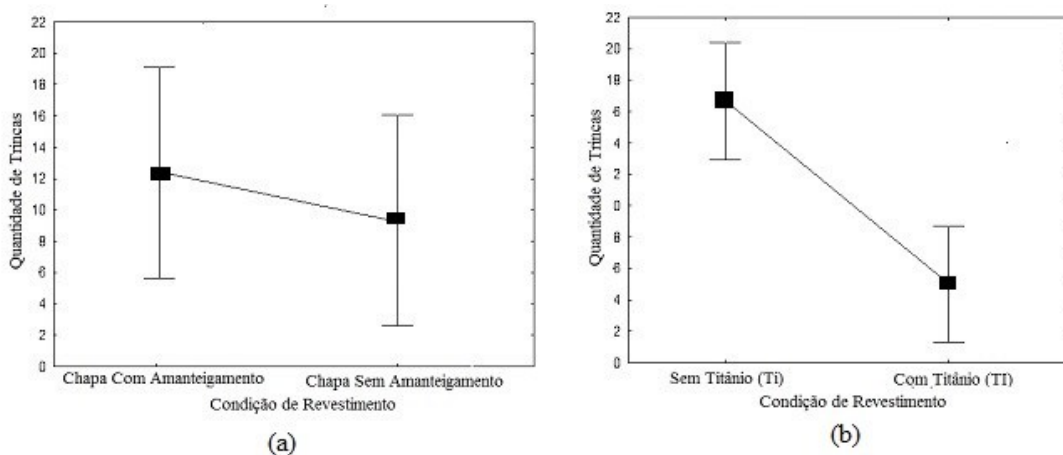
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a ajuda de uma lupa (ensaio visual) realizou-se a contagem da quantidade de trincas que afloram a superfície do revestimento, apresentado na Tabela 3. As melhores condições de aplicação de revestimento com base nesta análise foram obtidas com as condições 2, 6 e 8, todas com a presença de Ti no revestimento. Observou-se que para as condições com adição de nióbio, sem a presença de Titânio, têm um aumento na quantidade de trincas transversais ao cordão de solda. Esse fato se deve a presença do nióbio que, segundo POSCH et al. [7], em teores superiores a 2,5%wt em ligas de alto teor de cromo (acima 20%wt.) promove a trinca de solidificação.

**Tabela 1:** Quantidade (Qt) de trincas verificadas no revestimento de cada combinação de arames tubulares. Melhorar a apresentação da tabela.

TESTE		CONDIÇÃO	Qt DE TRINCAS
01	Sem Amanteigamento	FeCrC (1) - FeCrC (2)	20
02		FeCrC+Ti (1) - FeCrC+Ti (2)	2
03		FeCrC+Nb (1) - FeCrC+Nb (2)	15
04		FeCrC (1) - FeCrC+Ti (2)	6
05		FeCrC (1) - FeCrC+Nb (2)	11
06		FeCrC+Ti (1) - FeCrC+Nb (2)	2
07	Com Amanteigamento	FeCrC (1) - FeCrC (2)	19
08		FeCrC+Ti (1) - FeCrC+Ti (2)	0
09		FeCrC+Nb (1) - FeCrC+Nb (2)	15
10		FeCrC (1) - FeCrC+Ti (2)	12
11		FeCrC (1) - FeCrC+Nb (2)	20
12		FeCrC+Ti (1) - FeCrC+Nb (2)	8

A Figura 2(a) apresenta a relação da quantidade de trincas com e sem o amanteigamento e a Figura 2(b) com e sem presença de Ti nos revestimentos. Observa-se que a presença do amanteigamento com o arame ER308LSi não influenciou na quantidade de trincas formadas durante a aplicação de revestimento. Entretanto, nos revestimentos confeccionados com a presença de Ti observou-se pouca ou nenhuma ocorrência de trincas. No teste de hipótese, a significância estatística para a quantidade média de trincas das condições com a presença de Ti versus sem a presença de Ti, considerando  $p \leq 0,05$  (95% de confiabilidade), obteve-se uma significância estatística de  $p=0,00059$ , permitindo considerar a quantidade de trincas como estatisticamente diferente e sendo possível estabelecer uma tendência de diminuição da quantidade de trincas com a adição de Ti na liga. Segundo LIMA [2] e GARCIA [5] a adição de Ti melhora a fluidez da poça de fusão, promovendo maior molhamento da mesma e alívio das tensões geradas, quando comparando com os revestimentos sem a presença de Ti.

**Figura 2:** Comparação feita entre a quantidade de trincas dos revestimentos: (a) com e sem amanteigamento; (b) com e sem a presença do Ti.

A Figura 3 apresenta a superfície após o ensaio de desgaste abrasivo e perfil do revestimento para algumas das condições apresentada neste trabalho, onde é possível verificar a presença de trincas e/ou porosidades superficiais (presentes em todas as ligas) e as trilhas de desgaste.

Os resultados da perda massa e da resistência ao desgaste obtido das três amostras revestidas com cada liga e misturas são apresentados na Tabela 4 e na Figura 4. Observa-se que o revestimento realizado com a condição (02), sem amanteigamento, com a liga (FeCrC+Ti (1) - FeCrC+Ti (2)) obteve o melhor resultado no desgaste em valor médio (perda de massa de 21,2 mg) e o pior resultado foi apresentado no revestimento da condição (10), com amanteigamento, com a liga FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) (perda der massa de 61,1 mg). Os

resultados de desgaste encontrados nesta pesquisa estão semelhantes aos encontrados por LIMA [2] com o processo FCAW e por GARCIA [5] com o processo FCAW com adição de arame frio, isto é, arame não energizado na poça de fusão.

**Tabela 4:** Perda de massa e resistência ao desgaste das ligas utilizadas no revestimento.

ENSAIO Nº	CONDIÇÃO	CP	Desgaste (mg)	Desg <sub>m</sub> (mg)	DP Desg <sub>m</sub>	Tdesg <sub>m</sub> (mg/m)	DP Tdesg <sub>m</sub>	Rdesg <sub>m</sub> (mg/m) <sup>-1</sup>	DP Rdesg <sub>m</sub>
01	FeCrC(1) - FeCrC(2)	01	36,60	40,6	2,67	0,0283	0,00	35,37	2,40
		02	41,40						
		03	43,80						
02	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)	04	18,40	21,2	1,87	0,0148	0,00	67,74	1,68
		05	23,90						
		06	21,30						
03	FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2)	07	25,70	29,2	3,33	0,0203	0,00	49,18	3,00
		08	34,20						
		09	27,70						
04	FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2)	10	22,20	30,7	8,80	0,0214	0,01	46,78	7,92
		11	26,00						
		12	43,90						
05	FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2)	13	35,70	29,9	3,89	0,0208	0,00	48,08	3,50
		14	27,00						
		15	26,90						
06	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2)	16	21,10	25,0	3,96	0,0174	0,00	57,52	3,56
		17	30,90						
		18	22,90						
07	FeCrC(1) - FeCrC(2) Com AM	19	38,00	33,4	7,73	0,0233	0,01	42,99	6,96
		20	21,80						
		21	40,40						
08	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) Com AM	22	69,20	50,9	12,18	0,0355	0,01	28,19	10,96
		23	35,50						
		24	48,10						
09	FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2) Com AM	25	31,70	36,7	5,20	0,0256	0,01	39,13	4,68
		26	33,90						
		27	44,50						
10	FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) Com AM	28	66,30	61,1	4,49	0,0426	0,00	23,49	4,04
		29	54,40						
		30	62,70						
11	FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2) Com AM	31	12,70	33,9	14,16	0,0236	0,01	42,32	12,74
		32	43,60						
		33	45,50						
12	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2) Com AM	34	27,20	38,9	12,98	0,0271	0,01	36,88	11,68
		35	31,20						
		36	58,40						

Onde: Desg<sub>m</sub> = Desgaste médio por condição de revestimento; Tdesg<sub>m</sub> = Taxa de desgaste médio por condição de revestimento (desgaste em função da distância percorrida durante o ensaio, 1436 m); Rdesg<sub>m</sub> = resistência ao desgaste média por condição de revestimento (inverso da taxa de desgaste); DP = Desvio padrão.

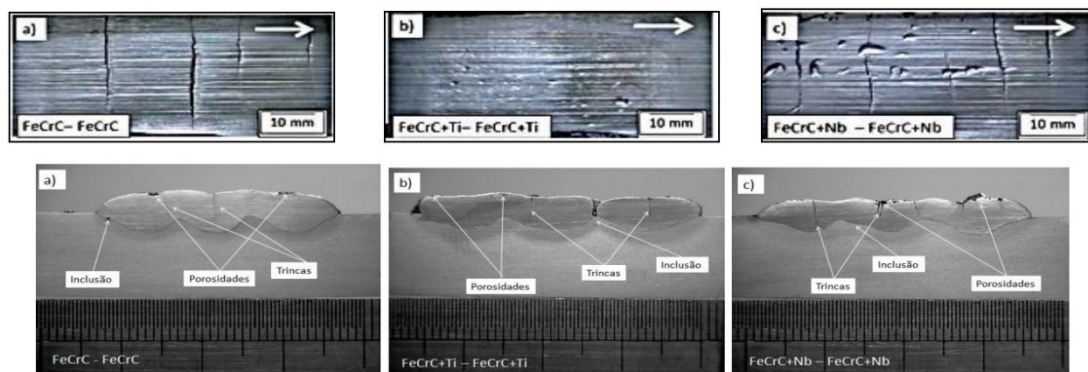


Figura 3: imagens das amostras de revestimento feitas após o ensaio de desgaste e da sua seção transversal.

A Figura 4 apresenta, em valores médios, a resistência ao desgaste com e sem amanteigamento. Verifica-se que a condição de revestimento sem amanteigamento apresentaram maior resistência ao desgaste abrasivo quando comparadas as condições com amanteigamento. Isto demonstra que o amanteigamento não corresponde a uma alternativa viável na melhora da resistência ao desgaste nas condições de ensaios realizadas neste trabalho.

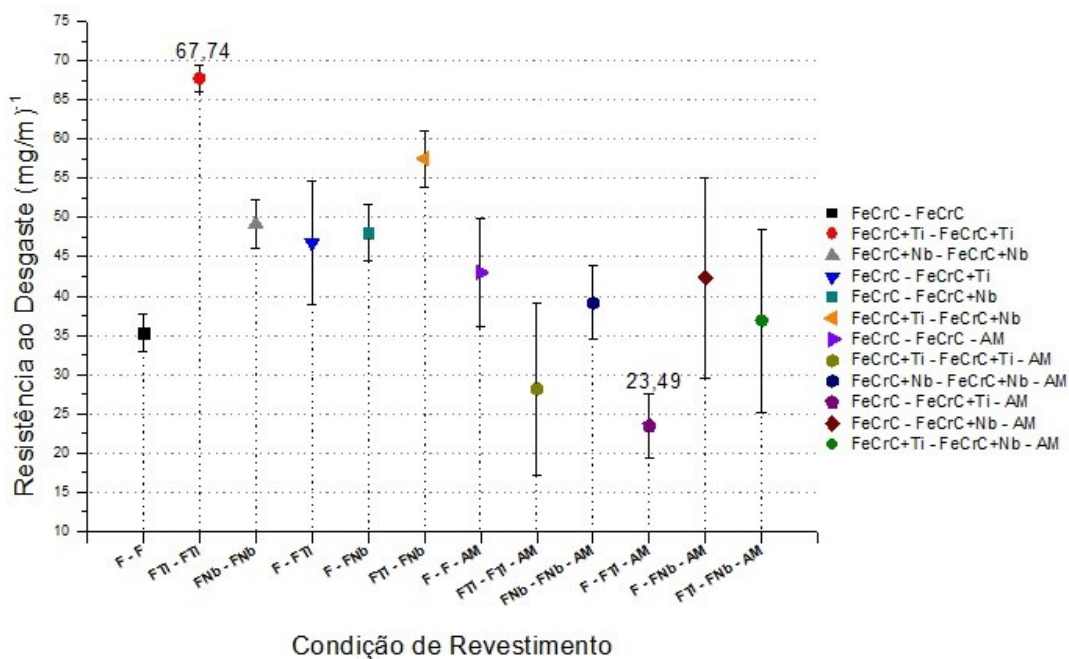
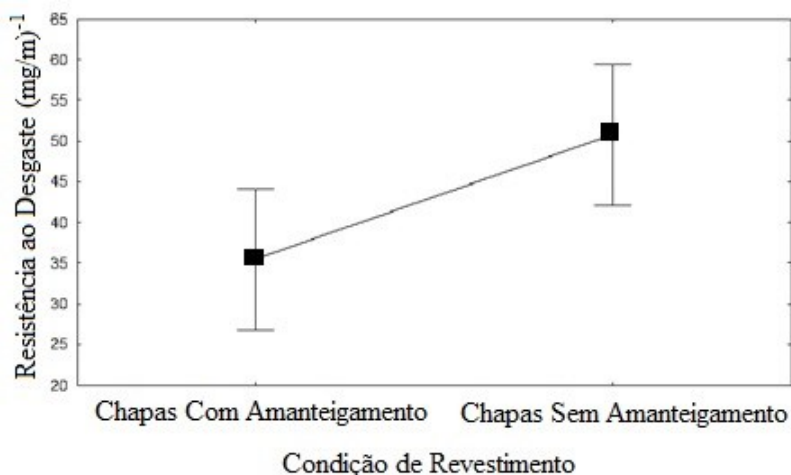


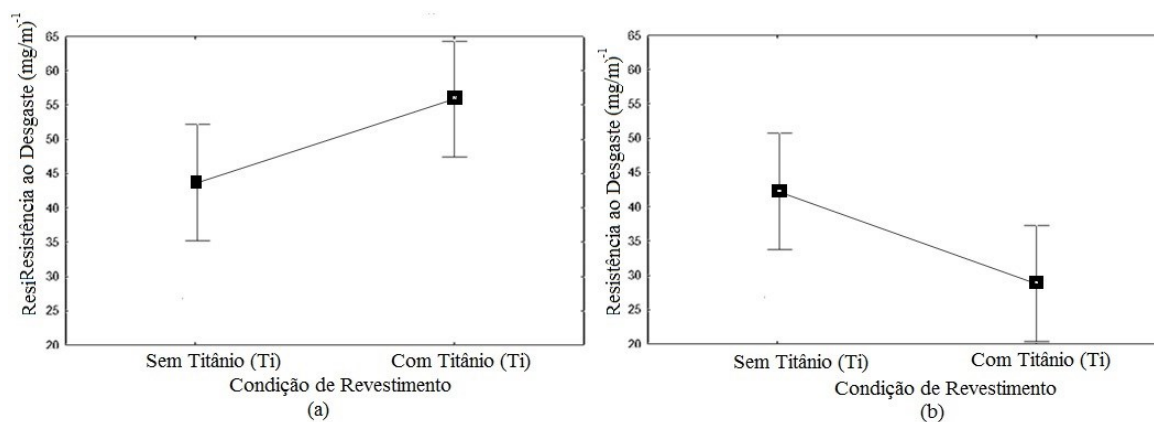
Figura 4: Resultados da resistência ao desgaste abrasivo de cada revestimento, sendo AM a condição com amanteigamento.

A Figura 5 mostra a comparação feita entre a resistência ao desgaste média dos revestimentos com e sem amanteigamento. No teste de hipótese a significância estatística para a resistência ao desgaste média das condições com amanteigamento versus sem amanteigamento, considerando  $p \leq 0,05$  (95% de confiabilidade), obteve-se uma significância estatística de  $p=0,01974$ , permitindo considerar a resistência ao desgaste como estatisticamente diferente e sendo possível estabelecer uma tendência de diminuição da resistência ao desgaste com o amanteigamento da chapa. Isso ocorreu provavelmente devido ao menor percentual de carbono que migrou do metal de base para o revestimento, favorecendo uma menor formação de carbonetos e consequentemente um pior desempenho no ensaio de desgaste para essas condições.



**Figura 5:** Comparação feita entre a resistência ao desgaste média dos revestimentos com e sem amanteigamento.

A Figura 6 apresenta, em valores médios, a comparação entre a resistência ao desgaste e a presença de Ti nos revestimentos, com e sem amanteigamento. Verifica-se que as condições de revestimento sem amanteigamento apresentaram maior resistência ao desgaste abrasivo quando na presença do Ti comparadas às condições sem Ti. No caso dos revestimentos com amanteigamento, verifica-se que as condições de revestimento sem Ti apresentaram maior resistência ao desgaste abrasivo quando comparadas às condições com a presença do Ti. Esse efeito provavelmente está associado à variação do tamanho, morfologia de carbonetos e ductilidade da matriz devido à presença do Ti, que contribui para a obtenção de diferentes resistências ao desgaste.



**Figura 6:** comparação feita entre a resistência ao desgaste média dos revestimentos e a presença do ti: (a) sem amanteigamento; (b) com amanteigamento.

Para análise de dureza foram feitas sete medidas Rockwell C na superfície retificada de cada revestimento, na região central de cada corpo de prova, próximo à trilha de desgaste. A Figura 7 apresenta os valores de dureza dos revestimentos. Pode-se observar que o revestimento feito com a condição 3 (FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2)) foi a que apresentou maior média de dureza (60 HRC). O valor da dureza encontrado para a melhor condição de revestimento foi próximo ao encontrado por SCANDELLA e SCANDELLA [8] – 61 HRC, LIMA [2] – 61,9 HRC e GARCIA [5] – 64,69 HRC.



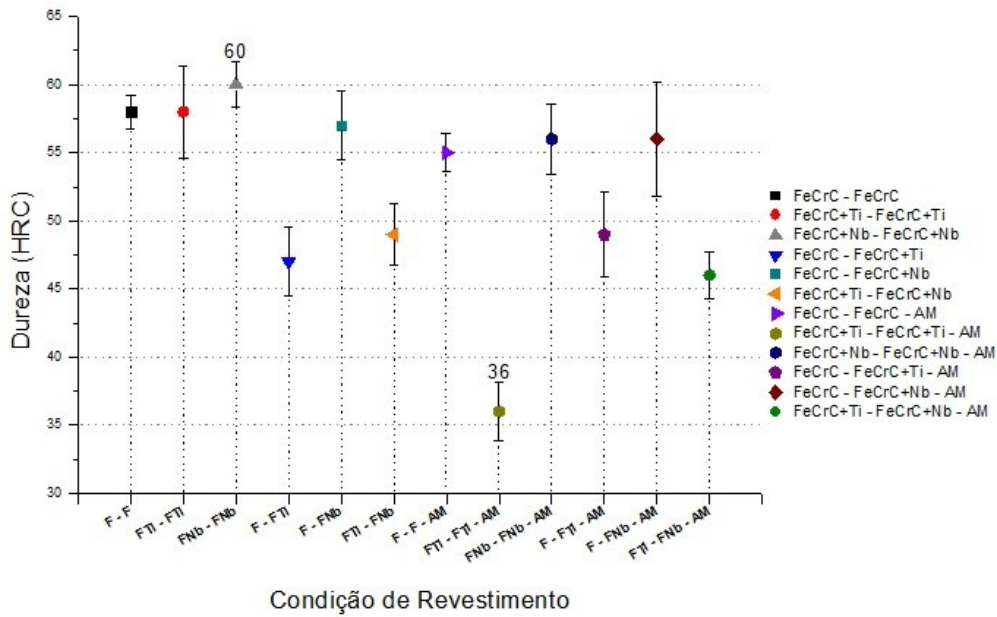


Figura 7: Dureza dos Revestimentos.

Comparando os revestimentos feitos com e sem amanteigamento, Figura 8, pode-se observar uma tendência de diminuição na dureza dos revestimentos feitos nas condições com amanteigamento. Em teste de hipótese a significância estatística para a dureza média das condições com amanteigamento versus sem amanteigamento, considerando  $p \leq 0,05$  (95% de confiabilidade), mostrou uma significância estatística de  $p=0,21466$ , permitindo considerar a dureza como estatisticamente igual e não sendo possível estabelecer uma relação entre elas.

Para KOTECKI e OGBORN [9], após estudar soldas de revestimento duro (com oito microestruturas diferentes) através da medição de dureza e avaliação da resistência ao desgaste abrasivo à baixa tensão, concluíram que a dureza não é um parâmetro seguro para se avaliar a resistência ao desgaste abrasivo à baixa tensão de ligas FeCrC. Estes resultados afirmam a observação feita por CORRÊA et al. [10], onde após realizar o ensaio de desgaste abrasivo de baixa e alta tensão em diversas ligas do sistema FeCrC encontrou que em algumas ligas de maior dureza se obtém maior resistência ao desgaste, mas em outras, o comportamento pode inclusive ser o oposto.

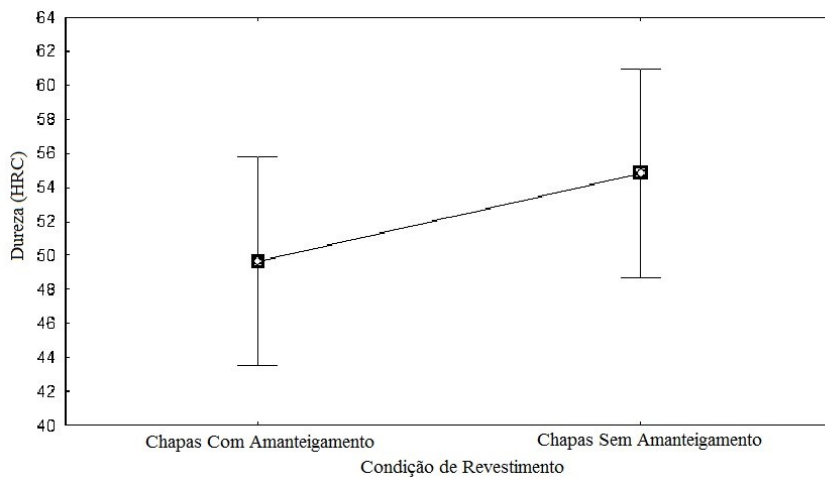
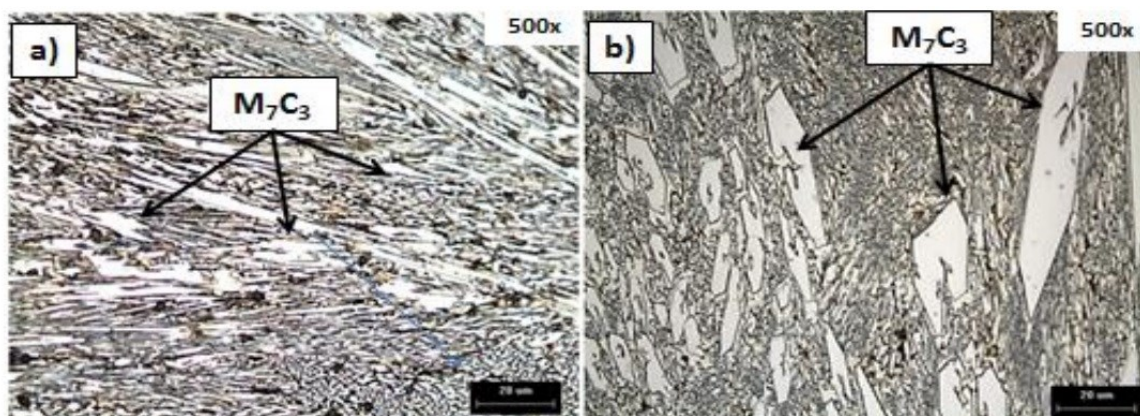


Figura 8: Comparação feita entre a dureza média dos revestimentos com e sem amanteigamento.

Para a avaliação microestrutural foram extraídas amostras das chapas soldadas com e sem amanteigamento para as 12 condições de revestimento. As amostras de cada condição foram lixadas e polidas, posteri-

ormente, uma de cada foi atacada com reagente Água Régia (100ml HCl + 3ml HNO<sub>3</sub>) por 10s e levada ao microscópio ótico.

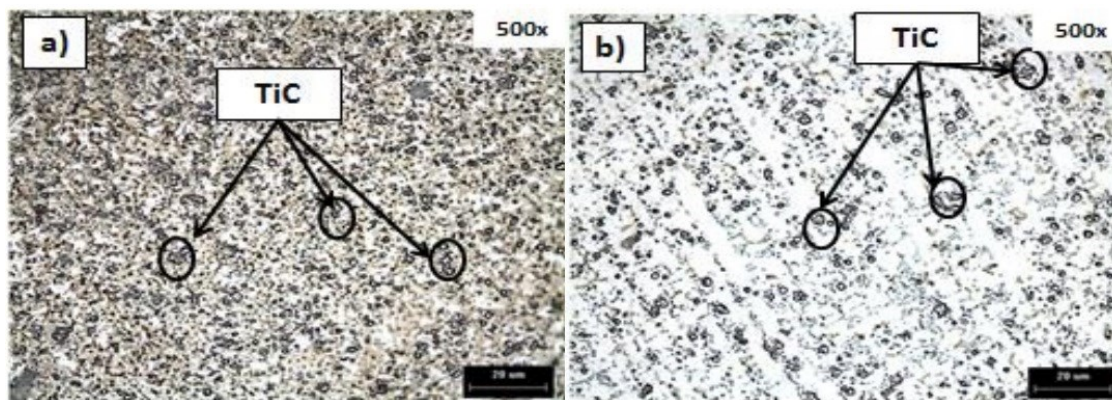
A Figura 9 ilustra as microestruturas obtidas com as condições 1 e 7 (FeCrC(1) - FeCrC(2) sem amanteigamento e FeCrC(1) - FeCrC(2) com Amanteigamento), respectivamente. Observa-se que o revestimento (Figura 9(a)) apresentou uma microestrutura formada por austenita em uma matriz eutética (austenita mais carbonetos) formando uma camada composta por carbonetos hexagonais primários (M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>), sem uma orientação preferencial, imersos na matriz. Este fato também é observado por LIMA [2]. Para a condição com amanteigamento (Figura 9(b)), a distribuição destes carbonetos se encontra de forma não uniforme e em menor quantidade, provavelmente devido ao amanteigamento.



**Figura 9:** Microestruturas dos revestimentos feitos com as condições: a) FeCrC(1) - FeCrC(2) e b) FeCrC(1) - FeCrC(2) com Amanteigamento. Aumentos de 500x.

Nas microestruturas resultantes das condições de revestimento 2 e 8 (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) sem amanteigamento e FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) com Amanteigamento), respectivamente (Figura 10), pode-se observar uma distribuição uniforme de carbonetos de titânio de formatos irregulares e de tamanhos variados. Na microestrutura da Figura 10(a) verifica-se a ausência de carbonetos do tipo M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> devido ao baixo teor de cromo presente na liga (aproximadamente 6,5%Cr em peso), pois a formação dos carbonetos de titânio a alta temperatura acontece antes da precipitação dos carbonetos primários do tipo M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Este fato foi também observado no trabalho de ZHI et al. [11], LIMA et al.[12] e GARCIA [5]. Além da ausência de carbonetos do tipo M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> observa-se uma mudança na matriz do revestimento, já que não apresenta mais a estrutura eutética, típica das ligas de FeCrC, mas sim uma matriz austenítica-martensítica homogênea. Este fato também é observado por LIMA [2] e GARCIA [5], onde ao avaliar a microestrutura do revestimento de FeCrC+Ti encontra a mesma matriz com regiões brancas que representam austenita retida, e regiões escuras que representam martensita. Com relação à condição com amanteigamento (Figura 10(b)), pode-se observar uma microestrutura similar com menor quantidade de carbonetos de titânio distribuídos de forma não uniforme e de maiores tamanhos.

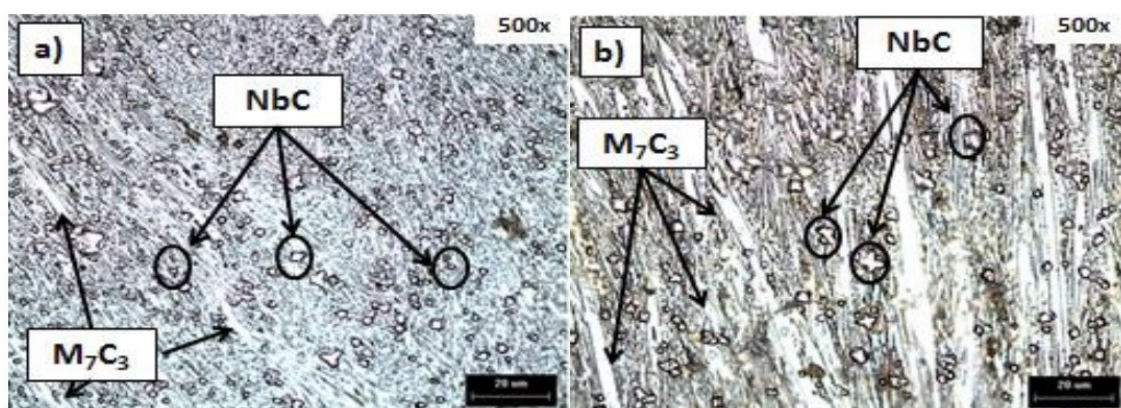
Esta condição de revestimento (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) sem amanteigamento) apresentou o melhor resultado de resistência ao desgaste, onde foi observado carbonetos de menor tamanho e em grande quantidade, distribuídos de forma homogeneia, aumentando com isto a resistência ao desgaste do revestimento, evitando que as partículas duras entrem em contato direto com a matriz de menor dureza.



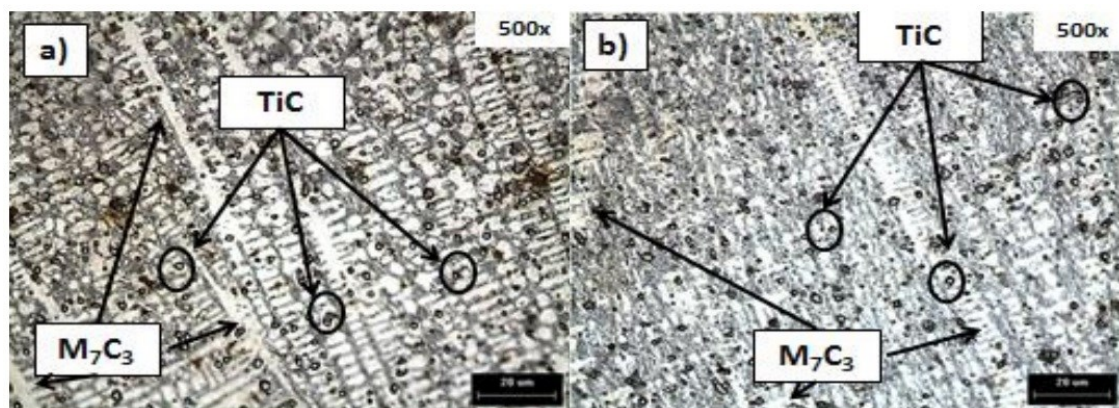
**Figura 10:** Microestruturas dos revestimentos feitos com as condições: a) FeCr+Ti(1) – FeCr+Ti(2) e b) FeCr+Ti(1) – FeCr+Ti(2) com Amanteigamento. Aumentos de 500x.

A Figura 11 apresenta as microestruturas obtidas com as condições 3 e 9 (FeCr+Nb(1) – FeCr+Nb(2) sem amanteigamento e FeCr+Nb(1) – FeCr+Nb(2) com Amanteigamento), respectivamente. Observa-se a presença de carbonetos do tipo  $M_7C_3$  e carbonetos de nióbio (NbC), distribuídos aleatoriamente na matriz hipereutética. ZHI et al. [11], LIMA et al. [12] e GARCIA [5] citam que as ligas do sistema Fe-Cr+Nb apresentam, além de carbonetos de nióbio (NbC) na forma primária e secundária o mesmo tipo de estrutura das ligas contendo apenas FeCrC, ou seja, estrutura austenítica com grande quantidade de carbonetos do tipo  $M_7C_3$ . Os carbonetos de nióbio (NbC) apresentam formatos semelhantes a geometrias quadradas ou hexagonais (Figura 11(a)). Com relação à condição com amanteigamento (Figura 11(b)), foi possível observar uma menor quantidade de carbonetos de nióbio (NbC) e do tipo  $M_7C_3$  distribuídos de forma não uniforme e de maiores tamanhos. A matriz desta condição tem semelhança com a observada por FAN et al. [13] e GARCIA [5], já que ao adicionar o eletrodo de aço inoxidável a liga de FeCr+Nb, ocorre um aumento do teor de cromo na composição do revestimento, além da adição de outros elementos metálicos (Ni, P e Cu).

Nas microestruturas das condições de revestimento 4 e 10 (FeCr(1) - FeCr+Ti(2) sem amanteigamento e FeCr(1) - FeCr+Ti(2) com Amanteigamento), respectivamente (Figura 12), observa-se novamente a presença de carbonetos de titânio finamente distribuídos pela matriz, mas diferente da condição 2 (FeCr+Ti(1) - FeCr+Ti(2)) (apresentado na Figura 10), possui carbonetos primários do tipo  $M_7C_3$  na sua microestrutura. Isto pode ser explicado devido ao aumento do teor de cromo nesta condição proporcionado pelo arame eletrodo da liga FeCrC (numa proporção de 27% wt.), ser suficiente para levar a formação deste tipo de carboneto.



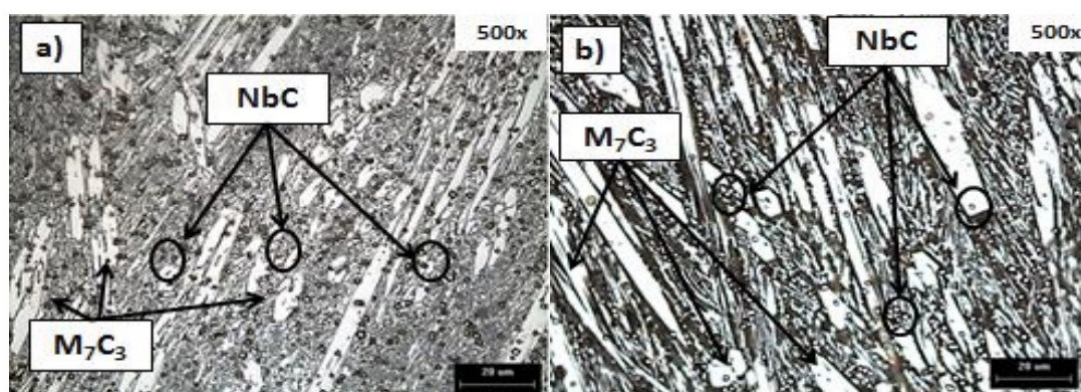
**Figura 11:** Microestruturas dos revestimentos feitos com as condições: a) FeCr+Nb(1) – FeCr+Nb(2) e b) FeCr+Nb(1) – FeCr+Nb(2) com Amanteigamento. Aumentos de 500x.



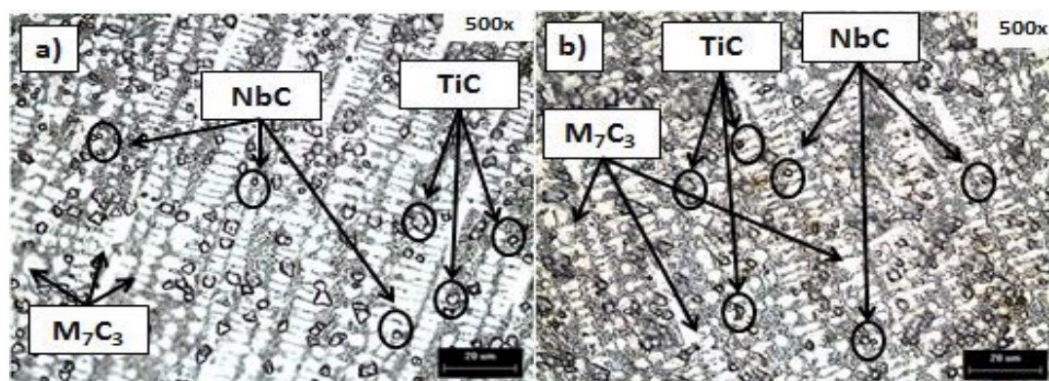
**Figura 12:** Microestruturas dos revestimentos feitos com as condições: a) FeCrC(1) – FeCrC+Ti(2) e b) FeCrC (1) – FeCrC+Ti(2) com Amanteigamento. Aumentos de 500x.

Na Figura 13 as microestruturas dos revestimentos feitos com as condições 5 e 11 (FeCrC(1) – FeCrC+Nb(2) sem amanteigamento e FeCrC(1) – FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento), respectivamente. Apresentam novamente a presença de carbonetos do tipo  $M_7C_3$  e carbonetos de nióbio (NbC), distribuídos em grande quantidade e aleatoriamente na matriz (Figura 13(a)). Na condição com amanteigamento (Figura 13(b)) pode-se observar uma microestrutura similar com menor quantidade de carbonetos do tipo  $M_7C_3$  distribuídos de forma não uniforme e de maiores tamanhos.

A Figura 14 apresenta as microestruturas dos revestimentos feitos com as condições 6 e 12 (FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Nb(2) sem amanteigamento e FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento). Foi possível verificar a presença de carbonetos do tipo  $M_7C_3$ , carbonetos de titânio (TiC) e carbonetos de nióbio (NbC), onde os dois últimos, finamente distribuídos na matriz do revestimento, sendo os carbonetos de titânio encontrados em maior tamanho que os de nióbio. Os carbonetos de nióbio são encontrados com o formato pequeno e alongados. Este formato também foi observado por SCANDELLA e SCANDELLA [8]; LEITE e MARQUES [14] e GARCIA [5] em ligas com teores de Nb de até 2,5 wt%. Estes revestimentos também apresentam uma mudança na matriz quando comparado com os revestimentos da condição 2 (FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Ti(2)), isto é devido à adição de novos elementos metálicos, numa proporção maior que 7% wt, tais como Nb, e o aumento no teor de C, Cr e Si.



**Figura 13:** Microestruturas dos revestimentos feitos com as condições: a) FeCrC(1) – FeCrC+Nb(2) e b) FeCrC (1) – FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento. Aumentos de 500x.



**Figura 14:** Microestruturas dos revestimentos feitos com as condições: a) FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Nb(2) e b) FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento. Com aumentos de 500x.

#### 4. CONCLUSÕES

As análises dos resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais utilizados neste trabalho tornaram possível chegar as seguintes conclusões.

A técnica de revestimento por FCAW Duplo Arame não demonstrou eficiência para diminuir a formação de trincas de solidificação com ou sem amanteigamento com uma liga de aço inoxidável austenítico.

A técnica de revestimento por FCAW Duplo Arame apresentou resultados semelhantes em termos de resistência ao desgaste quando comparado ao desgaste das ligas aplicadas pelos processos convencionais (aramé tubular) ou com adição de arame não energizado. Porém, este processo apresenta uma maior produtividade devido a maior taxa de material depositado.

O revestimento realizado com a presença de titânio na liga apresentou menor quantidade de trincas de solidificação e melhor resistência ao desgaste abrasivo.

As condições de revestimento sem amanteigamento apresentaram maior resistência ao desgaste abrasivo e menor quantidade de trincas quando comparadas às condições com amanteigamento. Isto demonstra que o amanteigamento não melhora a resistência ao desgaste para as condições de aplicação deste trabalho.

A condição de revestimento FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Ti(2) sem amanteigamento apresentou, em média, o maior valor de resistência ao desgaste. A microestrutura é composta por uma distribuição uniforme de carbonetos de titânio (TiC) de formatos irregulares e de tamanhos variados em uma matriz austenítico-martensítica homogênea.

O revestimento realizado com a condição FeCrC(1) – FeCrC+Ti(2) com amanteigamento apresentou o menor valor de resistência ao desgaste. A microestrutura é composta por carbonetos de titânio (TiC) e carbonetos do tipo M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> distribuídos em uma matriz eutética austenítica.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento às instituições que apoiaram para realização deste trabalho, os quais são: FAPEMIG, CNPq, CAPES e UFU.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] DALCHIAVON, F. C., CARVALHO, M. P., MONTANARI, R., *et al.*, “Inter-relação da produtividade de cana soca com a resistência à penetração, umidade e matéria orgânica do solo”, *Revista Ceres*. Viçosa-MG, v. 61, n. 2, pp. 255-264, 2014.
- [2] LIMA, A. C. *Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste de facas picadoras de cana-de-açúcar*. Tese de D.Sc., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, Brasil., 2008.
- [3] BUCHANAN, V. E., SHIPWAY, P. H., MCCARTNEY, D. G. “Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal Arc welding Hardfacings used in the sugarcane industry”, *Wear*, v.263, pp.99-110, 2007.

- [4] MILLER, B. “Frequently Asked Questions about Hardfacing”, *The Fabricator*, 2005.
- [5] GARCIA, D. B. C. *Aplicação de revestimento duro utilizando processo arame tubular com e sem adição de arame não energizado para diferentes tipos de consumíveis*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, Brasil. 2011.
- [6] ASTM G65-00. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand Rubber Wheel Apparatus, pp. 231-243, 2001.
- [7] POSCH, G., VALLANT, R., KLAGGES, W., *et al.*, *Influence of Niobium on Mechanical Properties and Hot Crack Susceptibility of Nickel-base Cored-wire Metal Type 70/20 and 70/15*, In: Tantalum-Niobium International Study Center General Assembly, 47, Áustria, 2006.
- [8] SCANDELLA, F., SCANDELLA, R. “Development of hardfacing material in Fe-Cr-Nb-C system for use under highly abrasive conditions”, *Materials Science and Technology*. United kings, v. 20, p 93 – 104, January 2004.
- [9] KOTECKI, D. J., OGBORN J. S. “Abrasion resistance of iron based hardfacing alloy”, *Welding Journal*, pp. 269s – 278s., aug. 1995.
- [10] CORRÊA, E. O., ALCÂNTARA, N. G., TECCO, D. G., *et al.*, *Desenvolvimento e uma Liga Ferrosa para a Solda de Revestimento Duro Reforçada com Carbonetos complexos*; In: IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Recife-PE, 2006.
- [11] ZHI, H., XING, J., FU, H., *et al.*, “Effect of niobium on the as-cast microstructure of hypereutectic high chromium cast iron”, *Materials Letters*, n. 62, pp.857-860, 2008.
- [12] LIMA, A. C., FERRARESI, V. A., REIS, R. P. Performance Analysis of Weld Hardfacings Used in the Sugar/Alcohol Industry, *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 23, pp. 1823-1833, 2014.
- [13] FAN, C., CHEN, M., CHANG, C., *et al.*, “Microstructure change caused by (Cr,Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> carbides in high chromium Fe–Cr–C hardfacing alloys”, *Surface and Coatings Technology*, v. 201, n. 3-4, pp. 908-912, 2006.
- [14] LEITE, R.V., MARQUES, P.V. “Estudo comparativo da resistência ao desgaste abrasivo do revestimento de três ligas metálicas utilizadas na indústria, aplicadas por soldagem com arame tubulares”, *Soldagem & Inspeção*, v.14, no4, pp.329-335, out/dez 2006.