

AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DE CARBETOS EM REVESTIMENTOS DUROS - DIN 8555, APLICADOS POR SOLDAGEM SAW, EM ROLOS DE LTQ/BOBINADORAS, SUBMETIDOS A TRABALHOS DE ABRASÃO A QUENTE*

Vicente Pinto Neto¹
Wesley da Silva Fernandes²
Giovani Fernandes da Costas³
Felipe Diniz de Jesus⁴

Resumo

A resistência à abrasão a quente é melhorada através da incorporação de diferentes tipos de carbonetos/frações volumétricas/morfologia e da matriz base em revestimentos duros por soldagem. Visando atender aos revestimentos de Rolos para LTQ, a PRIMETALS TECHNOLOGIES BRASIL LTDA (PTBRA) efetuou o desenvolvimento desta tecnologia. Este estudo apresenta os resultados da soldagem de uma Barra Teste revestida, com duas camadas de solda com ligas FeCCr e com posterior tratamento térmico. As amostras foram submetidas a ensaios de dureza/microdureza, caracterizações químicas, análises por Microscopia Óptica e Eletrônica de Varredura - via EDS (Energy Dispersive Spectroscopy). Os resultados microestruturais, as influências das frações volumétricas dos carbonetos e as variações das durezas, tanto a nível superficial como em profundidade destes revestimentos, antes e após os tratamentos térmicos empregados, confirmaram tecnicamente sua aplicação em campo.

Palavras-chave: Laminador de Tiras a Quente; Revestimento duro; Bobinadora; Rolos.

EVALUATION OF CARBIDE HARDFACING MICROSTRUCTURE (DIN 8555) APPLIED BY SAW WELDING, IN ROLLS OF LTQ AND COILS, SUBMITTED TO WORK OF HOT ABRASIONS

Abstract

Hot Abrasive Wear resistance is improved by incorporating different types of carbides / volumetric fractions / morphology and matrix base in hard coatings by welding. For Rolls in HSM, PRIMETALS TECHNOLOGIES BRAZIL developed this technology. This study is presenting results of a welded hard-faced Test Bar (Fe C Cr - alloys) and later heat treated. The samples were submitted to laboratory in order to carry out following tests: hardness/ chemical characterization and analysis by Optical and Scanning MEV, for metallographic evaluation and determination of volumetric fractions of the carbides, via EDS (Energy Dispersive Spectroscopy). The microstructural results, influences of the volumetric fractions of the carbides and the variations of the hardness, both superficial and technically in depth of the hard-facing, before and after the Heat Treatment confirmed their applications in the field.

Keywords: Rolling mill; Hardfacing; Downcoiler; rolls.

¹ Eng° Metalúrgico e de Soldagem, Msc, Especialista em Soldagem, Primetals Technologies Brasil Ltda (PTBRA), Santa Cruz – RJ, Brasil.

² Eng° Mecânico, Eng° de Manutenção Industrial, (PTBRA), Santa Cruz – RJ, Brasil.

³ Técnico de Desenvolvimento Senior, (PTBRA), Santa Cruz – RJ, Brasil

⁴ Planejador de Manutenção Industrial, (PTBRA), Santa Cruz – RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

No processo de transformação de uma usina siderúrgica em produtos, possui a etapa de conformação mecânica em sequência da solidificação do aço líquido, transformando-o em ‘placas grossas’ de aço (chapas de espessuras em centímetros). A etapa seguinte consiste em transformar estas chapas grossas de aço em bobinas de tiras de aço laminadas a quente, com pequenas espessuras (chapas de espessuras em milímetros), através do processo denominado: laminador de tiras a quente (LTQ). Em sequência ao LTQ, estas tiras de aço são transferidas ao sistema de resfriamento denominado “Laminar Flow” (Resfriamento controlado) e enroladas nas Bobinadoras (em geral do tipo Dow Coiler). As Figuras 1 e 2 mostram o diagrama esquemático e uma vista geral deste sistema.

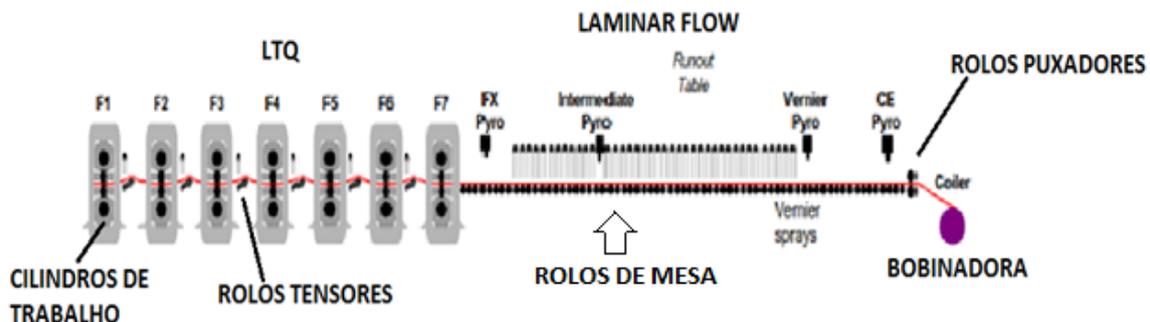


Figura 1. Desenho esquemático do sistema Linha de Tiras a Quente (LTQ), Laminar Flow e Bobinadora, destacando os principais Rolos.



Figura 2. Vista geral de um sistema Linha de Tiras a Quente (LTQ), mostrando as cadeiras de Laminação e cilindros de trabalho sobressalentes.

No processo de transformação mecânica existem os Rolos atuantes, além dos cilindros de encosto e de trabalho do conjunto do LTQ. Estes Rolos são denominados de Rolos de Mesa, Rolos Puxadores, Rolos Tensores (Figura 3), Rolos Defletores, Rolos Abraçadores, Rolos da Mesa de Resfriamento, etc. A Figura 4 apresenta em detalhe estes Rolos atuantes na Bobinadora do Tipo Down Coiler. Estes Rolos possuem geralmente revestimentos duros por soldagem, afim de adequar propriedades de resistência a abrasão e a altas temperaturas, em alguns casos, incluindo impacto, dureza elevada e resistência elevada a compressão com atrito.



Figura 3. Tira de aço processada no sistema LTQ, evidenciando o Rolo Tensor entre as cadeiras do laminador.

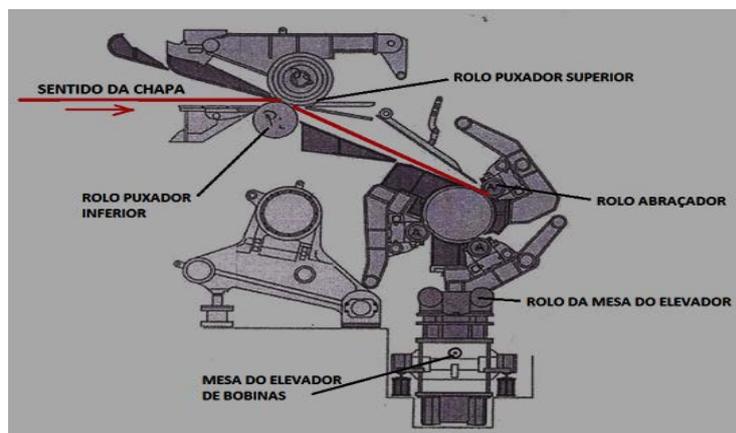


Figura 4. Desenho esquemático dos Rolos da Bobinadora do tipo "Downcoiler", destacando os Rolos Puxadores, Rolos Abraçadores e Rolos de Mesa, ambos com revestimentos duros.

O termo *Hardfacing* está relacionado com a aplicação de um material resistente ao desgaste efetuado por recobrimento mediante soldagem. Esta técnica foi possível pelo desenvolvimento dos processos de soldagem, ao longo dos anos, mudando a reputação da soldagem, como meio único de unir metais⁽¹⁾. Os níveis de dureza de um revestimento Hardfacing podem ser medidos por ensaios de Macro-dureza (dureza bruta), Microdureza (dureza dos constituintes individuais numa estrutura heterogênea), e Dureza a quente (resistência ao efeito das perdas de propriedades devido a serviço a temperatura elevada durante carregamento) e resistência à fluência (resistência a deformação plástica quando carregado a temperaturas elevadas para períodos de tempo relativamente longos).

Em ⁽²⁾, verifica-se que as ligas ferrosas constituem o grupo utilizado normalmente para os revestimentos devido ao baixo custo relativo e à facilidade de utilização. Estas ligas podem ser tanto simples aços baixa liga, como ligas complexas com uma grande variedade de carbonetos. As ligas martensíticas são utilizadas onde se tem desgaste que envolvem atrito de metal contra metal ou quando se tem carregamentos de baixa tensão e de impacto. A resistência à abrasão das ligas ferrosas é melhorada através da incorporação de diferentes tipos de carbonetos, presentes na microestrutura destas ligas com diversas frações volumétricas. Quando se tem condições de abrasão a alta tensão e alta temperatura, tal como ocorre em laminação a quente, esses carbonetos grandes tendem a se quebrar e descamar. Sob certas condições, os carbonetos secundários, tipicamente carbonetos de titânio (TiC), de molibdênio (MoC), de vanádio (VC) e de tungstênio (WC, W₂C), são

utilizados. Os carbonetos secundários são menores e se localizam na matriz entre os carbonetos primários, melhorando a resistência ao desgaste tanto a baixa quanto a alta tensão, bem como mantendo a dureza a elevadas temperaturas, o que resulta em melhor resistência ao desgaste. Embora essas ligas sejam de valores mais elevados, elas possuem uma resistência à abrasão significativamente maior quando comparadas com as ligas constituídas exclusivamente de carbonetos primários.

De um modo geral, os elementos formadores de carbonetos aumentam a resistência ao desgaste⁽²⁾, sendo neste caso, necessária a presença de uma matriz e uma coesão matriz/carbonetos que suportem adequadamente esses carbonetos. Analogia direta entre a propriedade mecânica de dureza e a resistência à abrasão não é considerada válida para todos os casos. Em materiais constituídos por duas ou mais fases é difícil relacionar a resistência à abrasão em termos de propriedades mecânicas, já que o tamanho, geometria e dureza do abrasivo devem ser considerados, como também a fração volumétrica das partículas de segunda fase dentro do metal. Em ligas destinadas a resistir ao desgaste, a dispersão de partículas duras é fixa, evidências sugerem que a resistência à abrasão de tais ligas é controlada predominantemente pela fração volumétrica da fase dura e pelo seu tamanho e morfologia, dentro da estrutura. Entretanto, a fração volumétrica da fase dura, nestas ligas e a dureza por si só, não são capazes de determinar a resistência à abrasão. As morfologias dos carbonetos precipitados exercem fundamental importância nos revestimentos duros resistentes ao desgaste abrasivo. Morfologias globulares de carbonetos de W, Ti e Nb mostram-se mais resistentes ao desgaste abrasivo que os tradicionais carbonetos prismáticos de Cr.

Em⁽³⁾, verifica-se a influência do número de camadas de solda na microestrutura de revestimento, fração volumétrica e dureza, onde foram estudadas em detalhes. Os resultados mostraram que o Carboneto de tamanho grande é presença no revestimento próximo à interface do substrato e o volume é aumentando linearmente com o aumento do número de camadas de soldagem. A Soldagem contínua de múltiplas camadas de revestimento duro fornece energia térmica contínua a soldagem, causando WC para nucleação e crescimento na região de não-carboneto (matriz). Este efeito aumenta a dureza geral do revestimento. O aumento do número de camadas aumentará a dureza da região da matriz, aumentando a dureza geral do revestimento. Isso proporcionará melhor resistência ao desgaste do revestimento duro. A avaliação de desgaste feita por⁽⁴⁾, o revestimento FeCrC com sobreposição de cordões, tendeu a melhorar a resistência ao desgaste em depósitos cuja dureza foi maior, mas propõe a avaliação através da análise quantitativa da microestrutura do material do revestimento. Haja vista que a microestrutura do revestimento normalizado foi refinada na matriz, estima-se um melhor desempenho na resistência ao desgaste com revestimento normalizado, ainda que os materiais reforçados com carboneto de titânio (TiC) possuam cadeias muito fortes, proporcionalmente melhores propriedades de resistência ao desgaste da liga e elevada dureza se comparados aos reforçados com carboneto de cromo (CrC), característico no revestimento FeCrC.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 – Materiais, métodos e resultados

Para a realização dos ensaios, foi efetuada a soldagem de revestimento na superfície de uma Barra Teste, em aço SAE 1020-normalizado, nas dimensões Ø 280mm x

600mm de comprimento, com a realização de soldagem em duas camadas (passes). Desta barra foram retirados os corpos de prova para preparação das amostras. A identificação dos tipos de revestimentos utilizados foi assim considerada: revestimento A - Corpo de Prova **A (CP A)** e revestimento B - Corpo de prova **B (CP B)**, cujas composições e propriedades dos consumíveis empregados são apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Composição química (%) informados nos Data Sheets dos fornecedores dos Consumíveis dos Revestimentos A e B

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	v	w	Σ ligas
CP A	0,65	0,4	2,0	5,0	0,6	1,0	3,3	-	-	12,9
CP B	1,0/1,5	0,5/2,5	0,5/1,5	5,5/9,5	-	0,5/1,5	5,5/9,5	<1,0	1,0/2,0	22,3

Tabela 2 Valores de dureza s e microestrutura especificados para os consumíveis

Revestimento	HRC	HV	Microestrutura
CP A	54/58	579 / 650	Martensita com carbonetos de Nb
CP B	50/54	510 / 579	Martensítica e carbonetos diversos

Nota: Informações dos Data Sheet dos fornecedores.

O processo de soldagem empregado foi o de Arco Submerso (SAW). Os cordões de revestimento foram depositados do tipo filetado, com controle das variáveis de processo. A soldagem foi realizada em Máquina de Revestimento de Rolos (MRR) - semi-automatizada (Figura 5) – na PTBRA e com contínuo acompanhamento de temperaturas de pré-aquecimento em forno controlado e as temperaturas entressoldas monitoradas. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de soldagem empregados. O controle de temperaturas entressoldas na MRR é realizado através de queimadores especiais, dispostos ao longo do eixo da solda, posicionados diretamente sobre a Barra Teste. Todo este sistema é envolvido por uma câmara refratária, compondo uma célula de soldagem, para melhor acondicionamento e controle das temperaturas.

A Figura 6 apresenta o Forno de Tratamento Térmico utilizado; destaca-se o fato da sua localização ser próximo da MRR, facilitando o deslocamento da Barra Teste e de Rolos durante a soldagem, evitando perdas de temperaturas, essenciais ao processo.



Figura 5. Vista geral da Máquina de Revestimento de Rolos (MRR), na unidade da PTBRA, localizada em Santa Cruz – RJ, durante soldagem dos revestimentos na Barra Teste.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem utilizados para revestimentos

	I(A)	Tensão(V)	Polaridade	Oscilação	Ø	Velocidade
CP A	380/500	26/30	CC+	35 mm	3,2 mm	3 a 6m/min
CP B	320/400	26/30	CC+	35 mm	3,2 mm	3 a 6m/min



Figura 6. Vista geral do Forno de Tratamentos Térmicos, utilizado para os tratamentos da Barra Teste e de componentes diversos, na unidade da PTBRA, localizada em Santa Cruz – RJ.

Corte e preparação das amostras

A Figura 7 apresenta a Barra Teste, após soldagem e usinagem de preparação para os testes de dureza superficiais. A usinagem foi realizada em diversos diâmetros intercalados, no dois tipos de revestimentos. Os diâmetros estabelecidos foram para o **Revestimento A**: de 246,5 mm; 245,5mm; 245,0 mm; 243,0 mm ; 242,0 mm e 241,4mm; para o **Revestimento B**: de 247,7 mm; 246,8mm; 246,3 mm; 242,3 mm ; 241,5 mm e 240,7mm. Esta variação objetivou a verificação da dureza em profundidades diversas. A escala do ensaio deste teste foi em HRC, utilizando aparelho de dureza portátil, do tipo Equotip.

Pela Figura 8 observa-se a separação das Amostras que foram retiradas da Barra Teste, para a realização dos ensaios físicos, químicos e metalográficos, para Amostra CP A, no diâmetro de 246,6 mm e para o CP B no diâmetro de 247,7mm. Parte destas amostras foram encaminhadas para o tratamento térmico, subdividindo-as em amostras com e sem tratamentos térmicos posteriores.

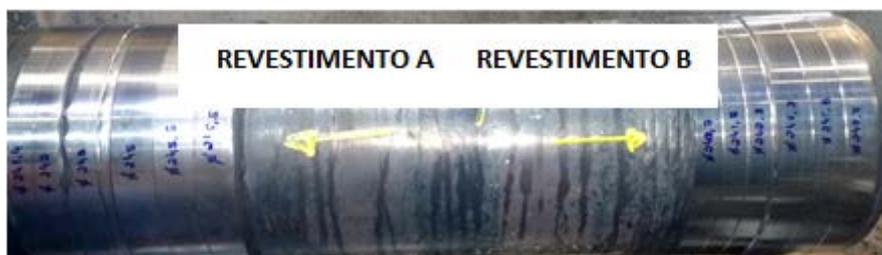


Figura 7. Mostra a Barra Teste, após usinagem dos diferentes diâmetros, e identificação dos tipos de Revestimentos A e B.

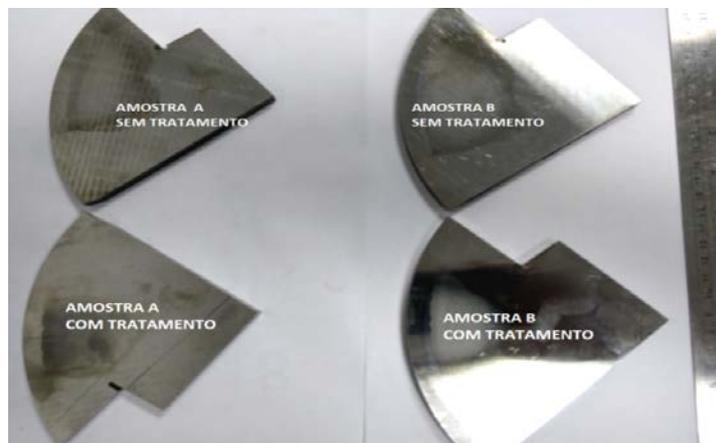


Figura 8. Corpos de prova retirados para os ensaios, dos Revestimentos A e B, respectivamente, CP A e CP B, antes e após tratamento térmico.

Resultados de ensaios físicos e químicas

A Tabela 4 apresenta os resultados das composições químicas nos metais de soldas depositados nos **CP A e CP B**.

Os Gráficos apresentados nas Figuras 9 e 10, mostram os resultados de ensaio de dureza em HRC, realizados nos **CP A e CP B**, antes do tratamento térmico, verificados nos diversos diâmetros da Barra Teste. A Figura 11 apresenta os resultados de Dureza e de microdureza em HV0.2, antes e após o tratamento térmico realizados nos corpos de prova dos revestimentos.

Tabela 4. Composição química encontrada no corpos de prova do Metal de Solda depositado

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	v	w	Σ ligas
CP A	0,6	0,9	1,5	5,8	0,6	0,8	3,5	-	-	13,1
CP B	0,9	1,3	1,7	7,9	0,4	0,7	6,4	0,6	1,2	20,2

Nota: Análise via Espectrometria de Raio X e por via Óptica;

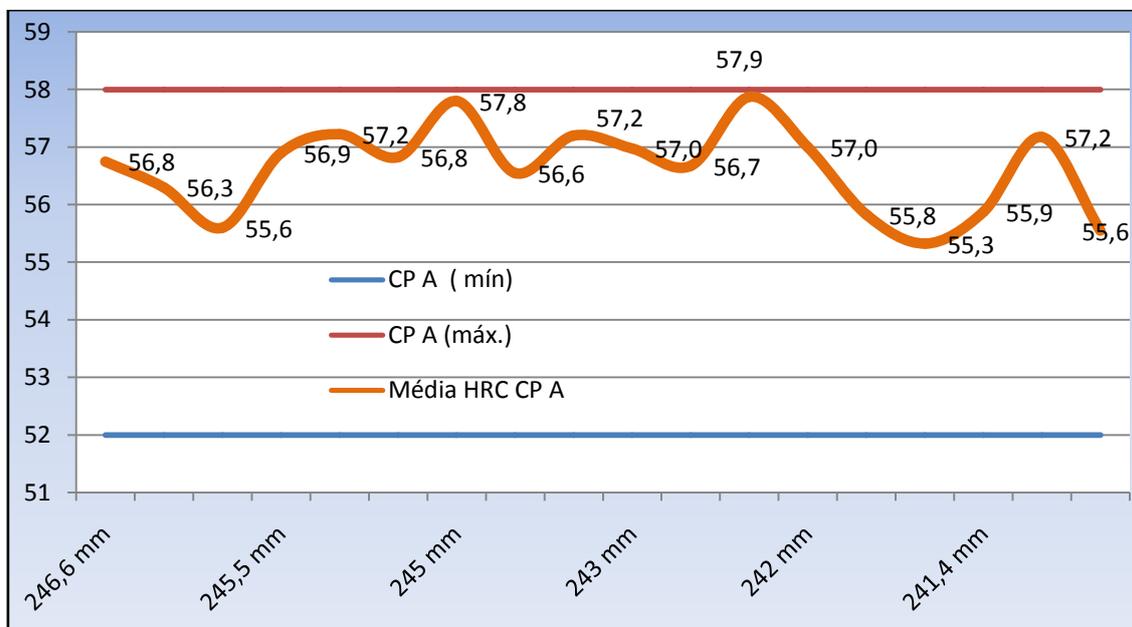


Figura 9. Resultados de dureza em HRC na superfície da Barra Teste, nos diferentes diâmetros, do CP A, antes do TT do Rolo, a partir da superfície, antes do Tratamento Térmico;

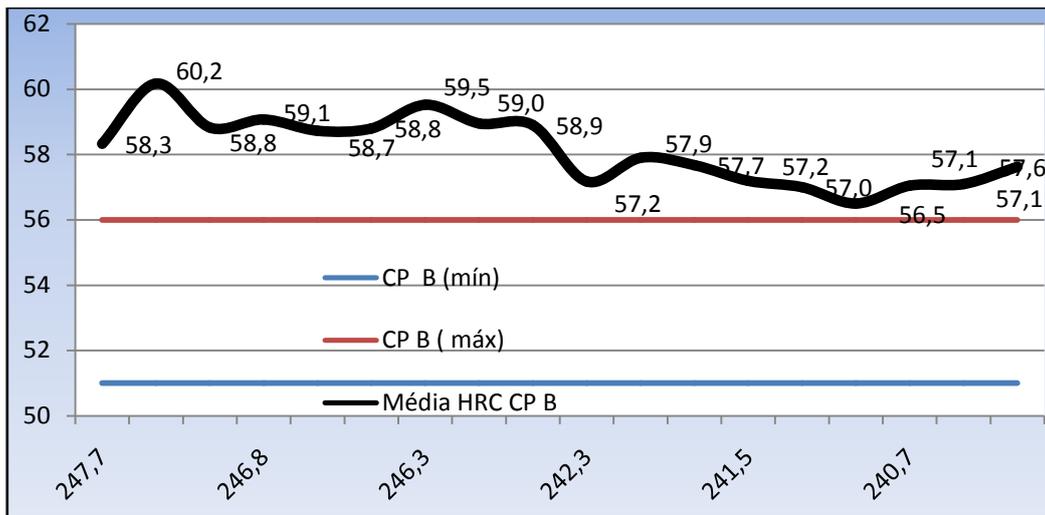


Figura 10. Resultados de dureza em HRC na superfície da Barra Teste, nos diferentes diâmetros, do CP B, a partir da superfície, antes do Tratamento Térmico;

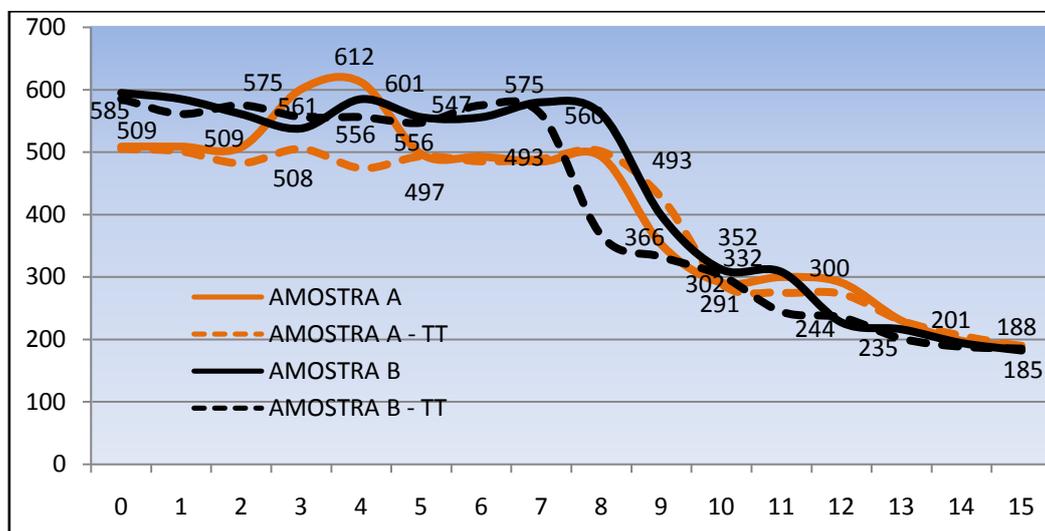
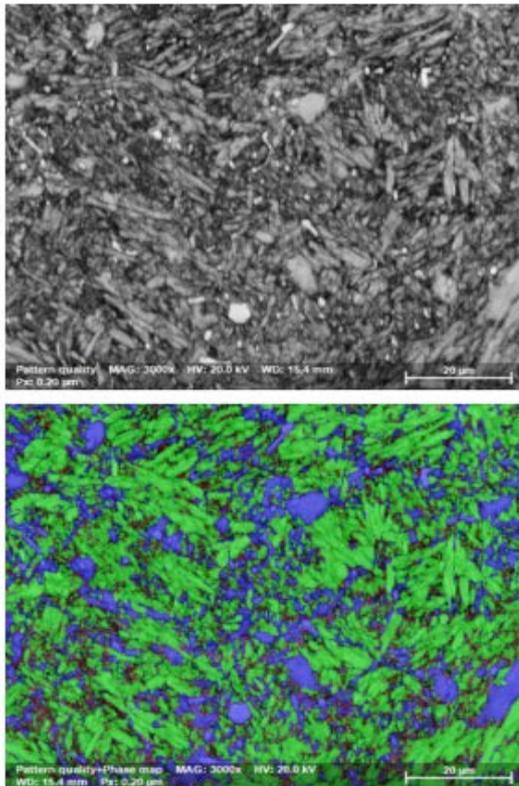


Figura 11. Resultados de Microdureza em HV0.2 das Amostras CPs A e B, antes e após o Tratamento Térmico, em escalas de 1 mm, a partir da superfície;

Exames metalográficos e de MEV

As Figuras 12 e 13 apresentam os resultados de Mapas de Fases EBSD e Tabela indicativa de percentuais das Fases indexadas analisadas no topo das amostras do CP A, com e sem tratamento térmico, respectivamente. As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados das amostras do CP B, semelhantes ao CP A, com e sem tratamento térmico, respectivamente.

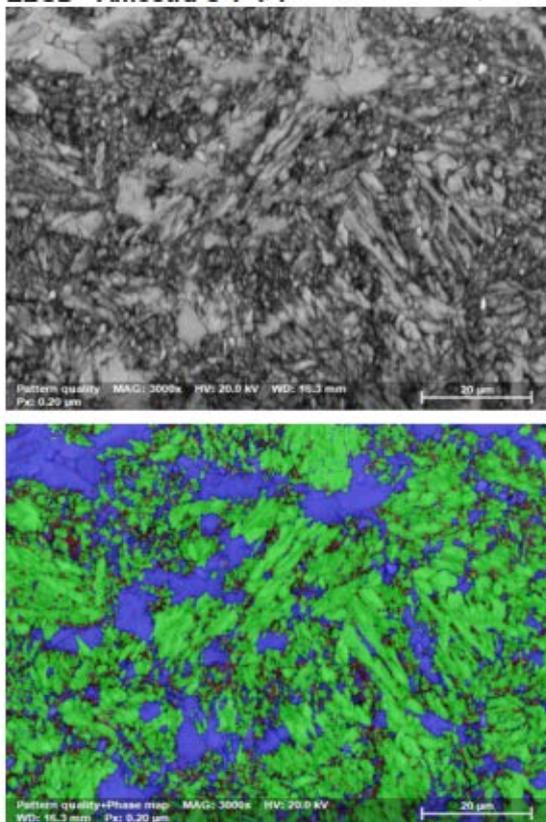
Os resultados dos ensaios foram retirados dos Relatórios N° 018/18- 01 e 018/18-02 realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos e Microestruturais – LEMM – Instituto Senai de Tecnologia de Soldagem - RJ.



Phase name	norm (%)
Ferrite (Cubic)	63,9
Niobídeo (Cubic)	28,2
Niobium carbide (Orthorhobic)	7,86

EBSD não indexa a fase martensita devido à similaridade entre os parâmetros de rede. Neste caso a técnica indica a fase ferrita.

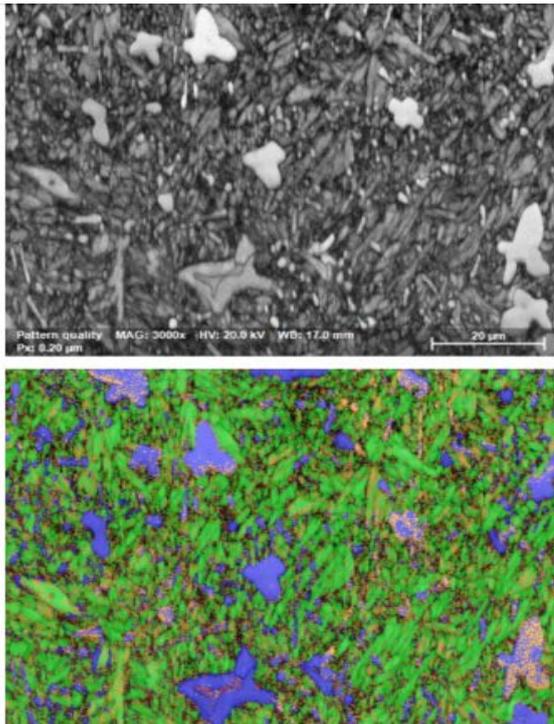
Figura 12. Mapa de Fase EBSD e Tabela indicativa de percentuais das Fases indexadas (relativo a parâmetros de rede) analisadas no topo da amostra do CP A, sem tratamento térmico;



Phase name	norm (%)
Ferrite (Cubic)	64,8
Niobídeo (Cubic)	29,6
Niobium carbide (Orthorhobic)	5,53

EBSD não indexa a fase martensita devido à similaridade entre os parâmetros de rede. Neste caso a técnica indica a fase ferrita.

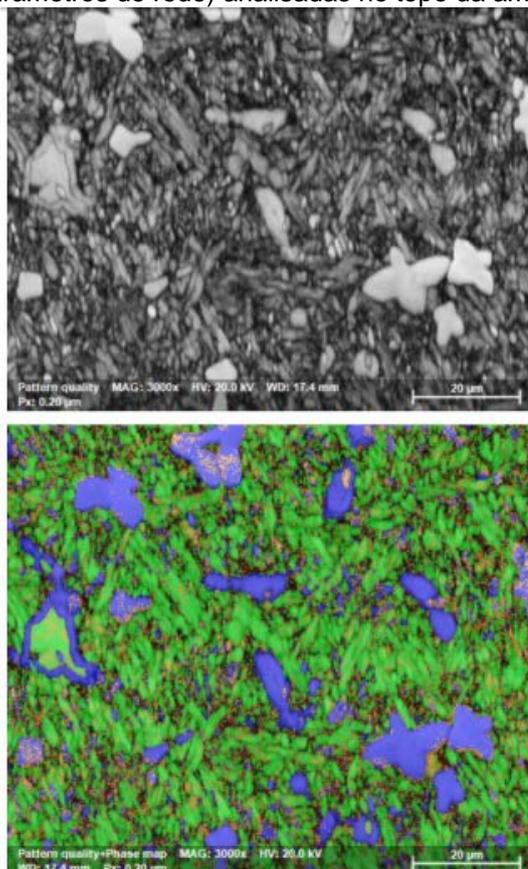
Figura 13. Mapa de Fase EBSD e Tabela indicativa de percentuais das Fases indexadas relativo a parâmetros de rede) analisadas no topo da amostra do CP A, após tratamento térmico;



Phase name	norm (%)
Ferrite (Cubic)	51,8
Niocarbide (Cubic)	17,2
Niobium carbide (Orthorhobic)	5,1
Vanadium carbide (Trigonal)	24,3
Tungsten carbide (Hexagonal)	1,59

EBSD não indexa a fase martensita devido à similaridade entre os parâmetros de rede. Neste caso a técnica indica a fase ferrita.

Figura 14. Mapa de Fase EBSD e Tabela indicativa de percentuais das Fases indexadas relativo a parâmetros de rede) analisadas no topo da amostra do CP B, antes do tratamento térmico;



Phase name	norm (%)
Ferrite (Cubic)	55,2
Niocarbide (Cubic)	19,7
Niobium carbide (Orthorhobic)	4,46
Vanadium carbide (Trigonal)	19,4
Tungsten carbide (Hexagonal)	1,22

EBSD não indexa a fase martensita devido à similaridade entre os parâmetros de rede. Neste caso a técnica indica a fase ferrita.

Figura 15. Mapa de Fase EBSD e Tabela indicativa de percentuais das Fases indexadas relativo a parâmetros de rede) analisadas no topo da amostra do CP B, após tratamento térmico;

As microestruturas apresentaram características de ligas do sistema FeCrCe carbonetos, microestrutura da base martensítica e dendritas de austenita, além da presença de carbonetos diversos nas formas primária e secundária.

Nos depósitos das amostras do CP A, considerando registros da superfície revestida até a profundidade de 8 mm, a microestrutura apresentou, antes do TT, durezas entre 517,7 e 541,1 HV0.2 (média de 530,8 HV0.2), com 63,9% de martensita e 36,06% de carbonetos de NbC; Após o Tratamento Térmico (TT), durezas entre 514,3 e 544,7 HV0.2 (média de 590,7 HV0.2), com 64,8% de martensita e 35,1% de carbonetos de NbC. As Figuras 12 e 13 apresentam os Mapas de Fases - EBSD e Tabelas indicativa de percentuais das Fases indexadas (relativo a parâmetros de rede) analisadas no topo da amostra do CP A, antes e após o tratamento térmico.

Nos depósitos das amostras do CP B, inicialmente a microestrutura apresentou, antes do TT, durezas entre 605,3 e 687,6 HV0.2 (média de 637 HV0.2), com 51,8% de martensita, 22,3% de carbonetos de NbC, 24,3% VC e 1,59% WC; Após o TT, durezas entre 557,2 e 619,9 HV0.2 (média de 603,4 HV0.2), com 55,2% de martensita, 24,2% de carbonetos de NbC, 19,4% VC e 1,2% WC. As Figuras 14 e 15 apresentam os Mapas de Fases EBSD e Tabelas indicativas de percentuais das Fases indexadas (relativo a parâmetros de rede) analisadas no topo da amostra do CP B, antes e após o tratamento térmico. Através destes resultados, verifica-se que o tratamento térmico ocasionou mudança significativa na microestrutura, na fração dos carbonetos e nos níveis de dureza. A dureza é um parâmetro importante, mas não é determinante na resistência ao desgaste. Como verificado no estudo⁽⁴⁾, em ensaios de desgaste abrasivo de baixa e de alta tensão em ligas FeCrC, a alta dureza dos depósitos implicou, em parte dos testes, na maior resistência ao desgaste. O decréscimo da dureza do revestimento e carbonetos, após normalização, pode estar relacionado ao alívio de tensões provocadas pelo processo de soldagem. Com isso, o resultado da diminuição de dureza após a normalização pode ser favorável às condições de campo. Quanto ao efeito da normalização na dureza global do revestimento, os resultados também são concordantes aos estudos apresentados: observou-se comportamento similar no CP B e pouco representativo no CP A. A Figura 16 esboça a variação de durezas médias dos cordões dos CP A e CP B, antes e após tratamentos térmico de alívio de tensões. A Figura 17 apresenta a variação da Fração de volume de carbonetos (%), na amostras dos CP A e do CP B, na região da superfície, correspondente a variação na segunda camada depositada.

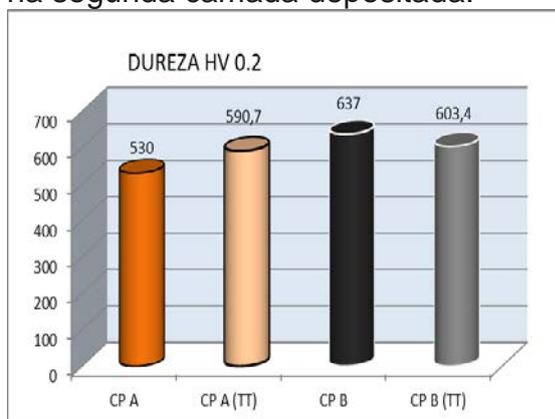


Figura 16. Variação de durezas em HV0.2 nas amostras do CP A e do CP B, antes e após tratamento térmico, respectivamente;

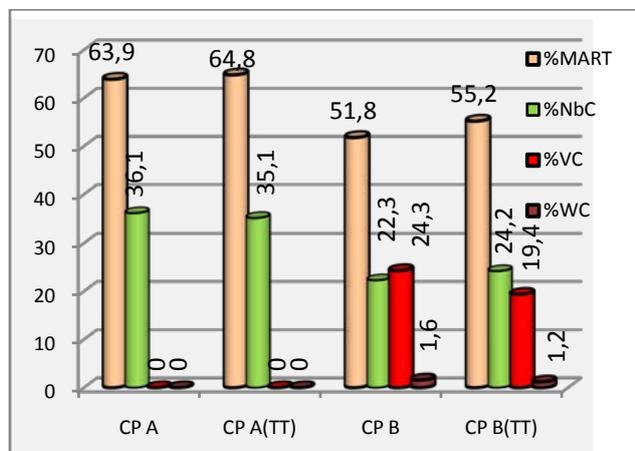


Figura 17. Variação da Fração de volume de carbonetos (%), na amostras dos CP A e do CP B, na região da superfície, não considerando a variação nas diferentes camadas depositadas, antes e após tratamento térmico;

A análise da fração volumétrica foi realizada para calcular a porcentagem de partículas de carbonetos na região próxima a superfície do segundo cordão de revestimento. A maior fração de volume de carbonetos tende a ser registrada por um maior número de camadas de solda depositada. Energia de calor fornecida devido a deposição contínua de múltiplas camadas de solda permite o crescimento de carboneto, aumentando assim seu teor na região total de revestimento em uma taxa linear crescente.

3 CONCLUSÃO

- O revestimento do **CP A** apresentou resultados de dureza superficial, em HRC, dentro da faixa esperada e o revestimento **CP B** com valores acima dos máximos especificados;
- Ambos os revestimentos apresentaram microestrutura, matriz e carbonetos diversos, uniforme e a manutenção de valores de dureza, em HV0.2, até profundidade de 8 mm, com pequenas oscilações;
- A amostra do revestimento duro **CP B**, apresentou Frações Volumétricas dos carbonetos superiores ao **CP A**, o que é confirmada com seus maiores índices de dureza e, conseqüentemente, apresentar uma maior resistência a abrasão. A constituição, morfologia e fração de carbonetos formados pelos elementos V, W e Nb, contribuíram para os resultados, através da formação dos carbonetos primários e secundários.
- A morfologia dos carbonetos e suas frações volumétricas observadas estão dentro do esperado, as quais são resultantes de apurados controles dos parâmetros e variáveis de soldagem, como também, de tratamentos térmicos empregados;
- Estes fatos, confirmam e caracterizam a PTBRA, condições favoráveis para a continuidade destes desenvolvimentos e a aplicações operacionais destas ligas nos revestimentos *Hardfacing* de Rolos para LTQ.

REFERÊNCIAS

- 1 AWS WELDING HANDBOOK, VOLUME 4 – Materials and Applications – Part 1 - Chapter 7 – Surfacing Materials - 2011;
- 2 Dennis W. Hetzer – SUB ARC ROLL REPAIR IMPROVES PERFORMANCE – Advanced materials and process – March 2005;
- 3 Effects of Weldment Layer on the Tungsten Carbide Hardfacing Microstructure - 9th International Conference on Tribology (Balkantrib'17) IOP Publishing / Materials Science and Engineering 295 (2018) 012041;
- 4 BUCHELY, M. F.; GUTIERREZ, J. C.; LEON, L. M. & TORO, A. The Effect of Microstructure on Abrasive Wear of Hardfacing Alloys. In: Tribology International. v259, p. 52 - 61, 2005.