

ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE DE ROLOS DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO SAE 4140 REVESTIDOS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 411*

*José Amilton Cardoso de Oliveira Filho¹
João Victor da Silva Pinto²
Letícia Rabelo Muniz³
Soraia Karolinne Castro Silva⁴
Hamilton Ferreira Gomes de Abreu⁵*

Resumo

O presente trabalho visa investigar, por meio de análises nas propriedades, a integridade física de rolos industriais de aço SAE 4140 revestidos de aço inoxidável AISI 411 constituintes do maquinário de lingotamento contínuo de dois veios tendo em vista a relação de desgaste com a perda de suas características, parâmetro importante para preservar a vida útil dos componentes da máquina. 4 (quatro) amostras, todas submetidas a processo de retrabalho, sendo 3 (três) de dimensões distintas e processadas pela empresa A, e 1 (uma) pela empresa B, foram identificadas e analisadas considerando suas propriedades mecânicas, bem como propriedades químicas e metalurgia física. Apesar de se observar a olho nu defeitos mecânicos, na microestrutura, também, nota-se a presença de microtrincas intergranulares propagando-se ao longo dos contornos do revestimento. Além disso, deduz-se que, ao longo da solidificação contínua, houveram fenômenos térmicos decorrentes da temperatura na superfície dos rolos, perpetuando-se por condução ao longo do material, causando indiretamente tratamento térmico de normalização no substrato e em sua interface revestimento-substrato. Conclui-se, sumariamente, desconsiderando demais parâmetros variáveis da máquina (tensão exercida, taxa de solidificação, etc), que os rolos foram submetidos a temperaturas superiores às estipuladas por tempo suficiente para a geração da sucessão de defeitos apresentados, reduzindo, dessa forma, a vida útil dos rolos.

Palavras-chave: SAE 4140, AISI 411, Defeitos, Lingotamento Contínuo.

COMPARATIVE STUDY OF WEARNESS IN SAE 4140 CONTINUOUS CASTING ROLLS COATED BY AISI 411 STAINLESS STEEL

Abstract

The present research intends to investigate, by means of analysis of properties, the physical integrity of SAE 4140 industrial rolls coated by AISI 411 stainless steel, belonging to a twin continuous casting machine, considering the relation between weariness and loss of characteristics, essential parameter to preserve the service life of the machine components. 4 (four) samples, each one submitted by rework process, 3 (three) of them were been processed by company A, and 1 (one) by company B, that, after identified, were been analyzed considering mechanical properties, as well as chemical properties and physical metallurgy. Although the possibility to observe mechanical flaws in naked eye, it is stated to have the appearance of intergranular microcracks propagating along the grain boundaries of the coating on the microstructure. Besides, it is deduced that, along the continuous solidification, there has been noticed thermal phenomena arising from the temperature on the rolls surface, perpetuating by conduction along the material, indirectly causing a heat treatment called normalization on substrate and, on the interface, the substrate-coating. In conclusion, summarily, disconsidering further

* Contribuição técnica ao 18º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2018, São Paulo, SP, Brasil.

parameters of the machine (applied tension, solidification rate, etc), the rolls had been submitted to higher temperatures than stipulated for enough time to generate a succession of flaws, reducing, thus, the rolls service life.

Keywords: SAE 4140, AISI 411, Flaws, Continuous Casting.

- ¹ *Graduando em Engenharia Metalúrgica, Bolsista PIBIC – CNPq pelo Laboratório de Caracterização de Materiais - LACAM, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - DEMM, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, Ceará, Brasil.*
- ² *Graduando em Engenharia Metalúrgica, Bolsista PIBIC – CNPq pelo Laboratório de Caracterização de Materiais - LACAM, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - DEMM, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, Ceará, Brasil.*
- ³ *Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Bolsista PIBIC – CNPq pelo Laboratório de Caracterização de Materiais - LACAM, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - DEMM, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, Ceará, Brasil.*
- ⁴ *Graduada em Ciências Contábeis, Universidade Federal do Ceará – UFC, Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Bolsista PIBIC – CNPq pelo Laboratório de Caracterização de Materiais - LACAM, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - DEMM, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, Ceará, Brasil.*
- ⁵ *Graduado em Engenharia Naval – Escola Politécnica da USP (1981); Mestre em Engenharia Nuclear – University of California – Berkeley (1991); Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFRJ (1998); Pós-doutorado em University of Cambridge – United Kingdom; Professor titular da Universidade Federal do Ceará – UFC.*
- ⁶

1 INTRODUÇÃO

Desde o século passado, o lingotamento contínuo apresenta-se como o mais vantajoso para produção industrial em larga escala devido a otimização de produtividade. Nesse método, o aço fundido presente na calha é submetido a etapas de solidificação e conformação mecânica resultando em um material semi-acabado em formato de lingote, tarugo, beamblank, bloco ou placa.

Tendo em vista o estudo e análise das propriedades adquiridas em rolos de lingotamento contínuo compostos de aço SAE 4140 envolto por AISI 411, será exposto no presente trabalho o desgaste excessivo do revestimento e suas possíveis causas. Cabendo citar que as amostras averiguadas são oriundas de fontes distintas, 3 (três) rolos, com diâmetros variados e altura semelhante, foram produzidos por uma empresa enquanto um quarto rolo, de dimensões desconhecidas, teve sua fabricação em uma segunda empresa.

No lingotamento, os rolos conduzem o metal em uma configuração vertical, mas que, através de curvas levemente acentuadas, tendem a finalizar em um padrão horizontal e estão submetidos a temperaturas próximas a 800 °C. Sob tais condições, o aço SAE 4140, com notórias propriedades de elevada resistência mecânica, resistência a fratura e a fadiga, combinados com as especificidades do AISI 411, sendo estas a alta resistência mecânica, metal de difícil corrosão e resistência tração, estão conferindo respostas indesejadas ao processo de fabricação.

Com a análise da composição química, ensaios de dureza e microdureza, microscopia óptica e softwarethermo-calc, serão apurados dados e resultados que, com auxílio da literatura e conhecimentos pré-adquiridos, irão findar em uma qualificação mais precisa e embasada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A análise e comparação dos rolos de lingotamento 4140 com revestimento de aço inoxidável, detalhando os materiais, equipamento e procedimentos utilizados, será exposto nas subdivisões a seguir.

2.1 MATERIAIS

- I. Rolos 4140 e revestimento de aço inoxidável, cujas composições químicas estão explanadas nas tabelas 1 a 7 e nas posteriores imagens.
- II. Lixas nas granulometrias 100, 220, 320, 40, 600 e 1200.
- III. Para o polimento das amostras: Panos;
Alumina (Al_2O_3) de $1\mu m$ e $0,05\mu m$;
Pasta de diamante de $3\mu m$ e $1\mu m$.
- IV. Nital 2% (2ml HNO_3 + 98ml Álcool Etílico).
- V. Vilella (5ml HCl + 2g Ácido Pírico + 100ml Álcool Etílico).

2.2 EQUIPAMENTOS

- I. Máquina de Corte (Serra Fita Grande) – LPTS.

- II. Cut-off – LACAM.
- III. Serra Fita Manual – LACAM.
- IV. Máquina de Lixamento ArotecAropol 2V – LACAM.
- V. Máquina de Polimento ArotecAropol 2V –LACAM.
- VI. Microscópio Óptico ZeissAxio Imager.M2m – LACAM.
- VII. Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss– LPTS.
- VIII. Câmera fotográfica de 12MP.
- IX. Espectrômetro de emissão óptica Shimadzu PDA7000 – LACAM.
- X. Thermo-calc - LACAM.
- XI. Durômetro (Rockwell C) – LEM.
- XII. Microdurômetro (Vickers) - LACAM.

2.3 PROCEDIMENTOS

2.3.1 ANÁLISE QUÍMICA

A princípio, com auxílio da serra fita, os quatro rolos foram reduzidos a tamanhos aptos ao manuseio sendo possível, após o lixamento até 220, obter a análise de composição química, realizada no espectrômetro PDA7000.

Para o revestimento da quarta amostra a composição foi obtida através do ensaio de EDS (Energy Dispersion Spectroscopy), o qual é realizado no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura), e, como era desejado a região de uma microestrutura específica, passou-se pelo lixamento, polimento e ataque com o reagente vilella para a revelação do grão, os resultados de EDS serão discutidos posteriormente. Os dados se encontram nas seguintes tabelas e figuras.

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
97,446	0,348	0,219	0,717	0,007	0,006	0,026	0,933	0,202

Tabela 1. Composição Química 4140 (%) – Rolo 1

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0,164	0,437	1,240	0,003	0,003	1,984	11,825	0,842

Tabela 2. Composição Química AISI 411 (%) – Rolo 1

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
97,524	0,336	0,214	0,676	0,107	0,008	0,056	0,0878	0,174

Tabela 3. Composição Química 4140 (%) – Rolo 2

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0,132	0,425	1,223	0,011	0,005	2,031	11,139	0,829

Tabela 4. Composição Química AISI 411 (%) – Rolo 2

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
97,498	0,341	0,192	0,748	0,103	0,007	0,027	0,912	0,188

Tabela 5. Composição Química 4140 (%) – Rolo 3

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
---	----	----	---	---	----	----	----

0,142	0,404	1,241	0,012	0,006	1,923	11,706	0,859
-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	-------

Tabela 6. Composição Química AISI 411 (%) – Rolo 3

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
97,331	0,446	0,266	0,884	0,032	0,006	0,019	0,769	0,198

Tabela 7. Composição Química 4140 (%) – Rolo 4

2.3.2 DUREZA

Após a planificação das peças, fez a dureza no equipamento manual de Rockwell C em perfis que tinham início e fim, respectivamente, no revestimento e metal base. O durômetro estima a deformação plástica ocorrida no material sob a aplicação de determinada carga, habilitando, dessa forma, o conhecimento de algumas propriedades específicas, dentre elas a resistência mecânica.

2.3.3 MICROGRAFIA

Adequando-se a essa etapa e as posteriores, as amostras foram cortadas novamente em peças menores, com auxílio da cut-off.

Para a micrografia, na qual espera-se visualizar com maior precisão a microestrutura da superfície analisada, fez-se o lixamento e polimento completo e, em seguida, na região correspondente ao revestimento o reagente utilizado foi a vilella e para o metal base, nital 2%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 MICROGRAFIAS

Inicialmente, requeriu-se micrografar as diferentes regiões dos rolos, para saber como as microestruturas mudam de acordo com a região, e se as horas de funcionamento mudaram a disposição dos componentes para formas diferentes das previstas no diagrama de fase de cada material que compõem os rolos.

Nas figuras 4 a 7, há representadas as microestruturas presentes no rolo 1. A figura 1 representa a microestrutura do substrato, compostas de ferritas aciculares, bainitas e martensitas. Microestruturas comumente encontradas em aços ligados e microligados, que tenham passado por tratamentos térmicos como normalização ou austêmpera.

A figura 2, representa a microestrutura presente no revestimento dos rolos, com composição de um aço inoxidável 411, com estrutura ferrítica, revelada pelo reagente vilella, é possível ver o contraste entre a região perlítica desse aço com a região de ferrita alfa, característica pela presença elevada de cromo e pela baixa presença de níquel. Nas figuras 3 e 4, obteve-se as microestruturas das zonas de transição entre o substrato e o revestimento, no qual a figura três revela a região do revestimento até a transição com o substrato de aço 4140. A figura 4, revela a região do 4140 até a transição com o revestimento. Observa-se que as zonas são fundidas uma a outra atreves do processo de soldagem, observa-se que a pouca penetração do revestimento no substrato, e uma pouca mistura das fases de ambos os metais

soldados, observando apenas algumas áreas de microsegregação na figura 4, causada pela difusão de carbono, fazendo com que regiões maiores de ferrita aparecessem na área de transição.

Nas figuras 8 a 11, temos as micrografias que foram coletadas da amostra proveniente do rolo 2. Como anteriormente, a figura 8 e 9 apresentam, respectivamente, as microestruturas do substrato do rolo e do revestimento, compostos de aço 4140 e aço inoxidável 411, com microestruturas apresentando ferritas aciculares com presença de bainita e martensita, para o 4140, e uma microestrutura de ferrita alfa para o aço inoxidável 411.

Já para as regiões de transição, discriminadas nas figuras 10 e 11, há uma zona, no qual há uma grande mistura entre metal base e revestimento, no qual a mistura de composição química e a alta temperatura atingida na soldagem, surge uma região de microsegregação de carbono, na qual há grande presença de martensita, que é visto na figura 11, e a zona branca são as ferritas com pouco carbono.

Nas figuras 12 a 15, temos as microestruturas que compõem o rolo 3, seguindo a mesma vertente dos rolos anteriores; Microestrutura do substrato composta por ferrita acicular, com bainita e martensita. Revestimento de aço inoxidável com microestrutura de ferrita alfa, para prover uma resistência a corrosão e tenacidade. Zona de transição pequena, e sem a presença de grandes áreas de mistura entre substrato e revestimento, mas ainda com a presença de martensita na área, evidenciado pelos grãos com formato agulhado presentes na figura 15, porém com menos intensidade e menores que nos rolos anteriores, devido ao tamanho do rolo, o calor dissipou-se mais rapidamente, fazendo com que a transformação não alcançasse comprimentos elevados.

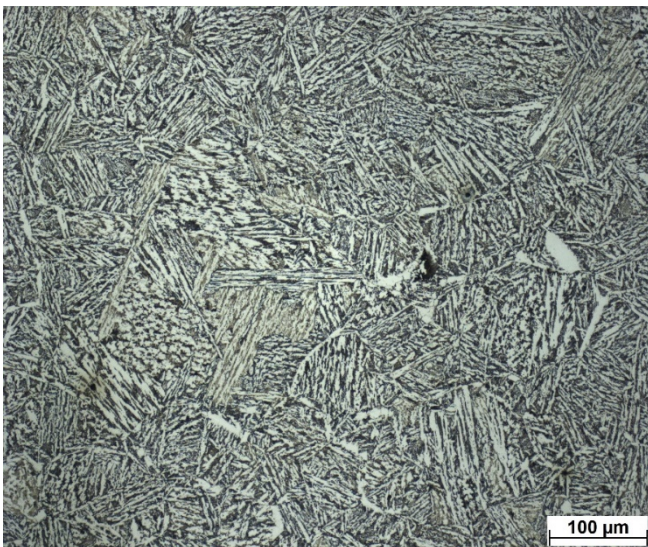


Figura 4. Microscopia (Zeiss) 4140 (200x) – Rolo 1

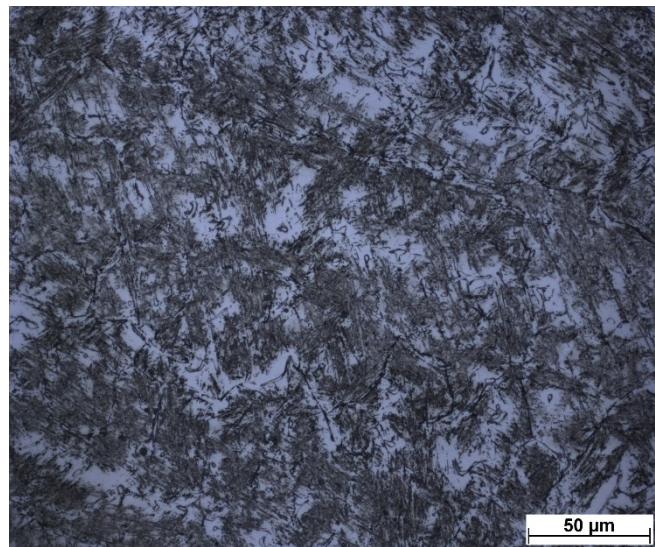


Figura 5. Microscopia (Zeiss) AISI 411 (500x) – Rolo 1

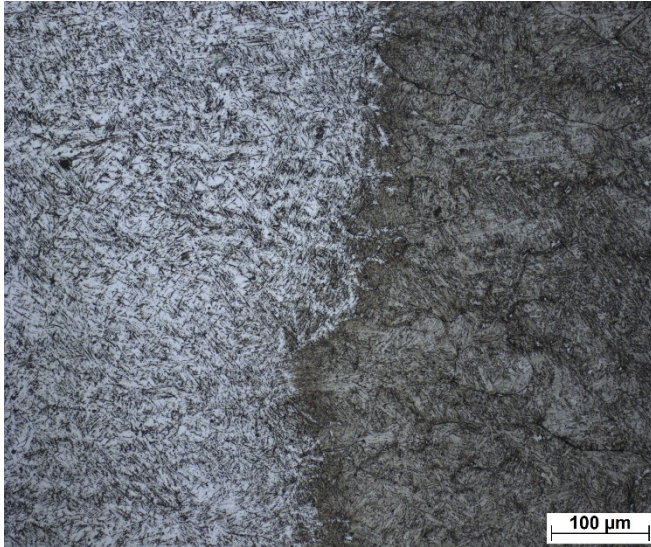


Figura 6. Microscopia (Zeiss) Transição (200x) – Rolo 1

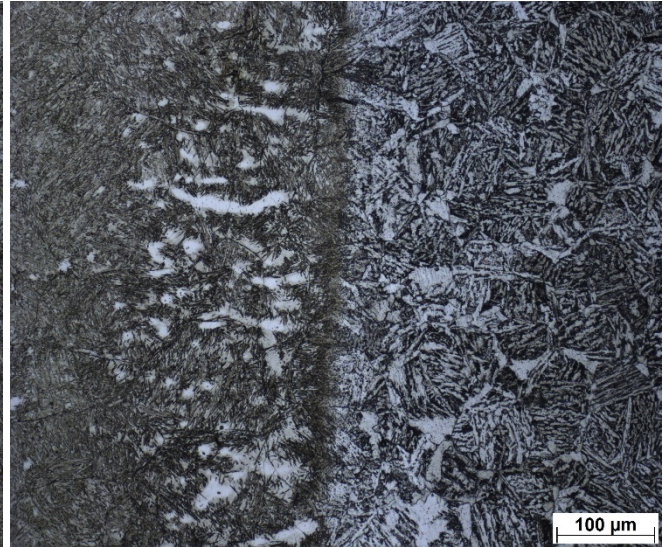


Figura 7. Microscopia (Zeiss) Interface (200x) – Rolo 1

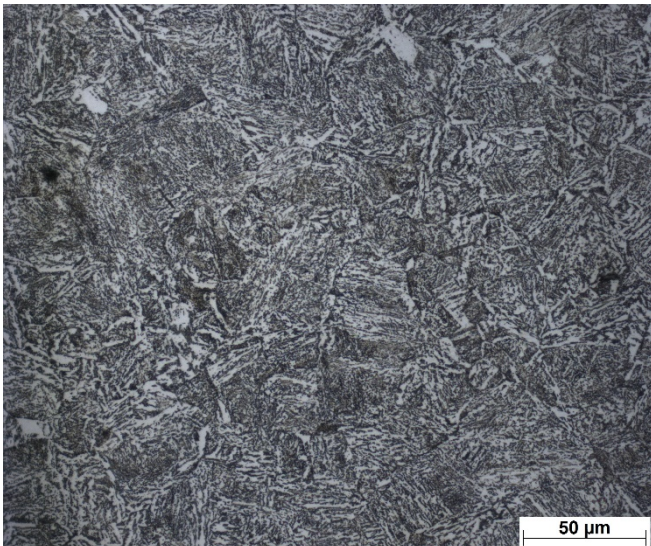


Figura 8. Microscopia (Zeiss) 4140 (500x) – Rolo 2

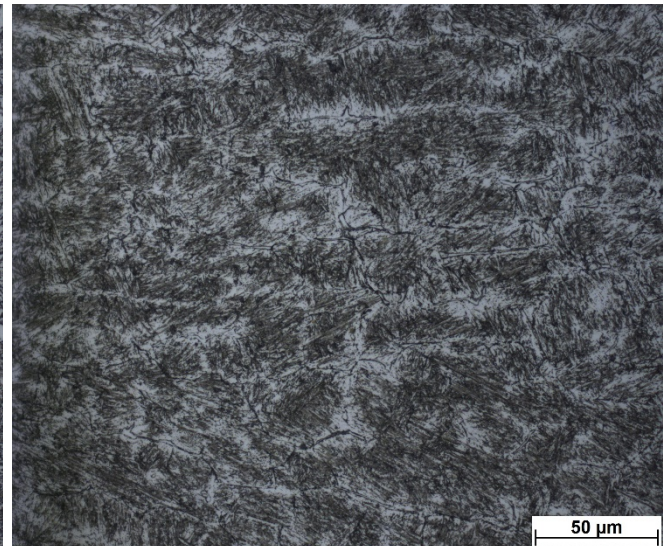


Figura 9. Microscopia (Zeiss) AISI 411 (500x) – Rolo 2

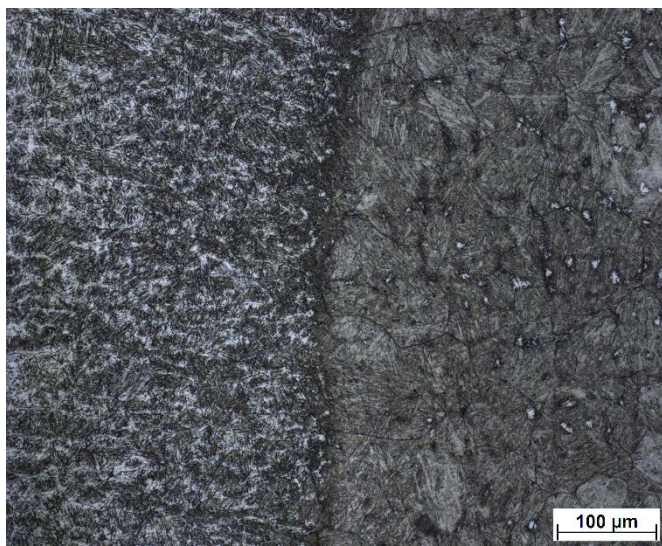


Figura 10. Microscopia (Zeiss) Transição (200x) – Rolo 2

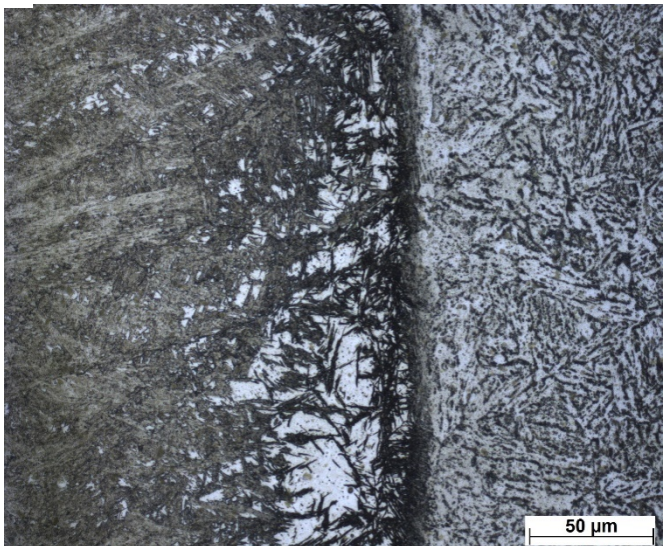


Figura 11. Microscopia (Zeiss) Interface (500x) – Rolo 2

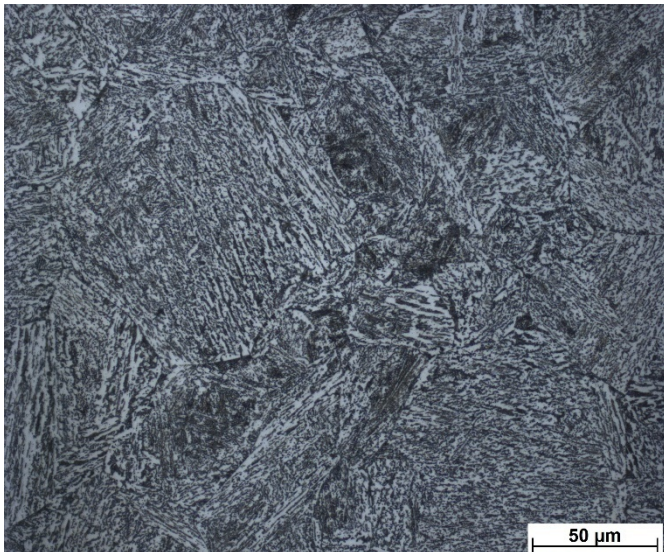


Figura 12. Microscopia (Zeiss) 4140 (500x) – Rolo 3

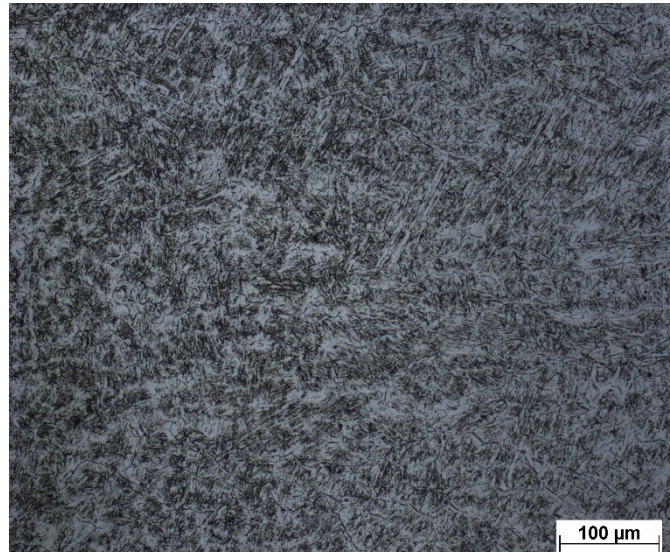


Figura 13. Microscopia (Zeiss) AISI 411 (200x) – Rolo 3

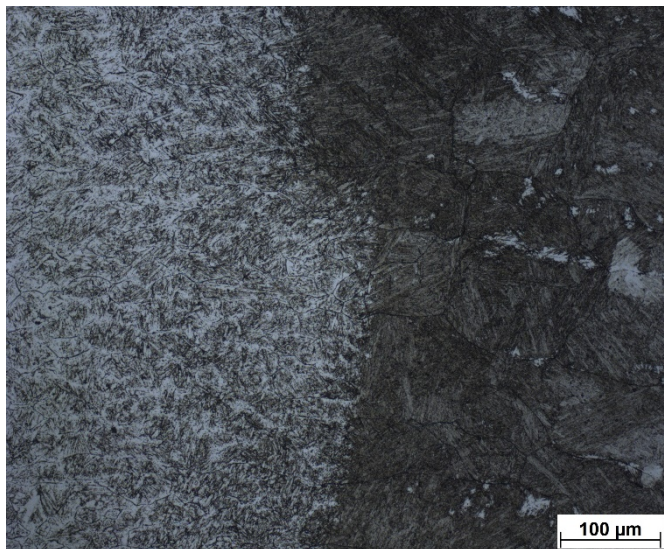


Figura 14. Microscopia (Zeiss) Transição (200x) – Rolo 3

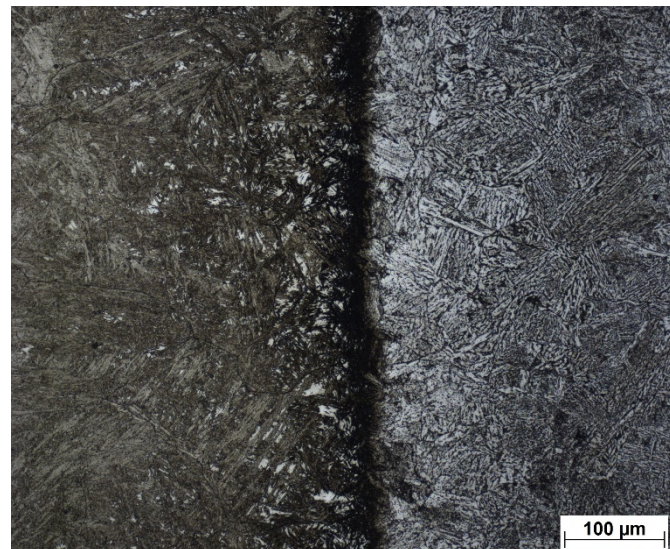


Figura 15. Microscopia (Zeiss) Interface (200x) – Rolo 3

3.2 Dureza

Com as durezas medidas de cada rolo, foram traçados perfis de dureza rockwell C e vickers, para aferir propriedades a partir disto, como resistência mecânica. As durezas foram dispostas nas tabelas a seguir:

HRC					HV				
PERFIL 1	PERFIL 2	PERFIL 3	PERFIL 4	PERFIL 5	PERFIL 1	PERFIL 2	PERFIL 3	PERFIL 4	PERFIL 5
41	37	34	35	21	567	511	470	484	290
24	25	23	23	17	332	346	318	318	235
15	18	23	21	19	207	249	318	290	263
12	12	24	22	21	166	166	332	304	290
8	12	24	24	19	111	166	332	332	263
12	12	23	24	18	166	166	318	332	249

16	11	21	22	20	221	152	290	304	276
----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabela 8. Dureza Rockwell e Vickers – Rolo 1

HRC					HV				
PERFIL 1	PERFIL 2	PERFIL 3	PERFIL 4		PERFIL 1	PERFIL 2	PERFIL 3	PERFIL 4	
28	33	28	43		387	456	387	594	
20	19	19	28		276	263	263	387	
21	21	11	24		290	290	152	332	
21	14	13	15		290	194	180	207	
10	14	10	13		138	194	138	180	
12	18	12	11		166	249	166	152	

Tabela 9. Dureza Rockwell e Vickers – Rolo 2

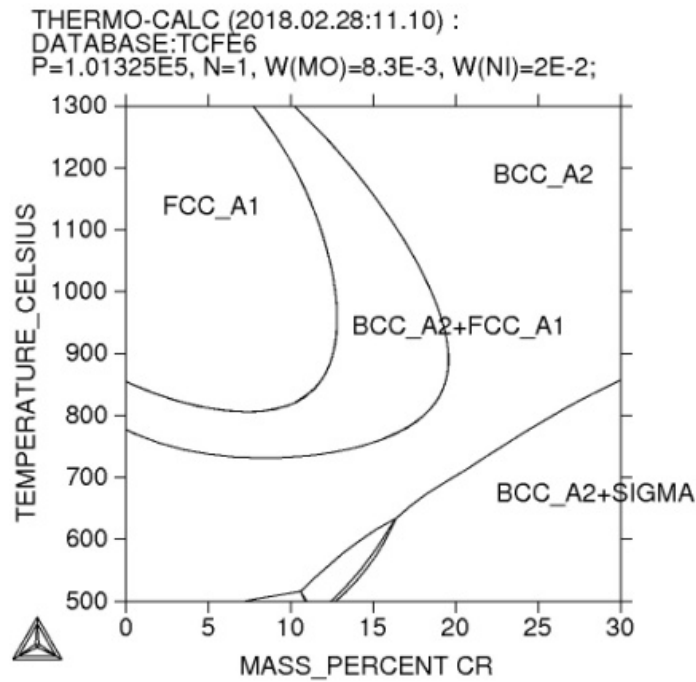
HRC					HV				
PERFIL 1	PERFIL 2	PERFIL 3	PERFIL 4		PERFIL 1	PERFIL 2	PERFIL 3	PERFIL 4	
35	40	39	41		484	553	539	567	
31	40	40	39		429	553	553	539	
24	33	26	39		332	456	359	539	
24	25	25	23		332	346	346	318	
25	32	25	20		346	442	346	276	

Tabela 10. Dureza Rockwell e Vickers – Rolo 3

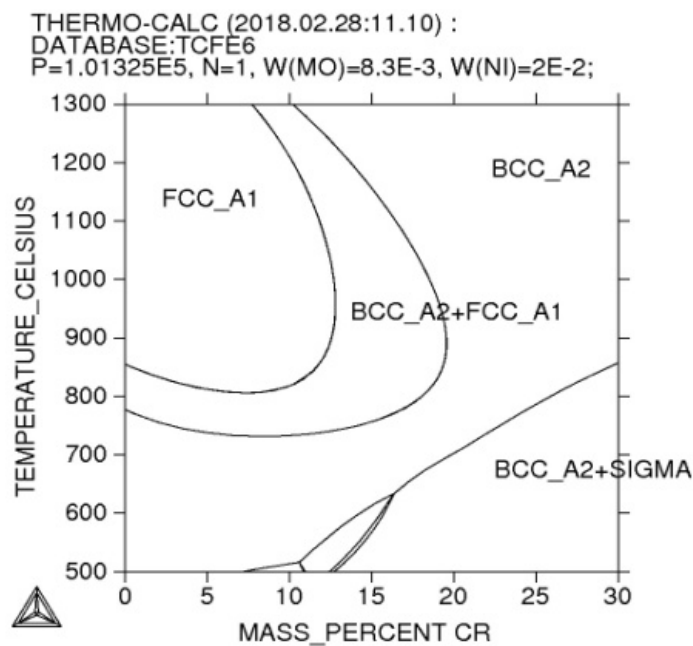
Afere-se, que em todos os rolos, há uma queda da dureza nas zonas de transição metal base/revestimento, o que talvez esteja diminuindo a vida útil desses rolos, fazendo com que o desgaste sobre os mesmos seja elevado.

3.3 THERMO-CALC

Foi realizado uma simulação, de como ficaria um diagrama de fases Fe-Cr-Mo-Ni e Fe-12%Cr para esses rolos, afim de saber quais as fases mais estáveis termodinamicamente nas regiões de temperatura de trabalho, para aferir que as fases observadas nas micrografias realmente correspondiam as que estavam nos diagramas, que estão dispostos a seguir:



output by user Usuário on 2018.02.28:11.10



output by user Usuário on 2018.02.28:11.10

Como se pode observar, as fases estáveis em ambos os casos, é a fase ferrítica, que é coerente com as micrografias feitas dos rolos. Há a presença de fases sigmas, porém, estas não foram observadas nas micrografias.

4CONCLUSÃO

Por conseguinte, conclui-se que, de acordo com o padrão e condições termomecânicas a que os rolos estão submetidos, desconsiderando demais parâmetros variáveis da máquina (tensão exercida, taxa de solidificação, etc), os rolos foram submetidos a temperaturas superiores às estipuladas por tempo suficiente para a geração da sucessão de defeitos apresentados, reduzindo, dessa forma, a vida útil dos rolos.

REFERÊNCIAS

- 1 DU TOIT, M., VAN NIEKERK, J. **Improving the life of continuous casting rolls through submerged arc cladding with nitrogen-alloyed martensitic stainless steel**. Metallurgical Engineering, University of Pretoria. 2010;1-2;5-8;
- 2 SILVA DE OLIVEIRA, L. J. **Comportamento dos aços peritéticos durante a solidificação no molde de lingotamento contínuo**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. 2009; 4-11; 23-28; 48-52;
- 3 SILVA, A. L., MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 3ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010;
- 4 CALLISTER, W.,RETHWISCH, D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 8º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 149-154; 181-192;