

INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS NO PROCESSO DE CEMENTAÇÃO À BAIXA TEMPERATURA

Laércio Malfatti, laercio.malfatti@ufpr.br¹

Silvio Francisco Brunatto, brunatto@ufpr.br¹

Rodrigo Perito Cardoso, rodrigo.perito@ufpr.br¹

Grupo de Tecnologia de Fabricação Assistida por Plasma e Metalurgia do Pó, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 81531-980, Brasil

Resumo: Este artigo apresenta os resultados do experimento de cementação assistida por plasma à baixa temperatura de cinco aços inoxidáveis martensíticos (AISI 410, AISI 416, AISI 420, AISI 440C e CA6NM). O tratamento foi realizado em reator de plasma por um período de 12 horas na temperatura de 723 K (450 °C). Estes parâmetros de tempo e temperatura estão apoiados em Scheuer et al. (2013), que determinou a influência do tempo e da temperatura na cinética do processo de difusão para uma amostra de AISI 420. De acordo com Scheuer et al. (2013), até estas condições se pode produzir camadas de difusão livres de precipitação: se tem aumento de dureza da superfície tratada e não há comprometimento da resistência à corrosão da superfície tratada. A câmara de vácuo do reator foi mantida na pressão de 3 Torr (400 Pa) e com mistura gasosa de 99,5% (80% H₂ + 20% Ar) + 0,5% CH₄. Foi utilizada uma fonte de corrente contínua pulsada (4,2 kHz), com forma de onda retangular com período de pulso de 240 µs, tempo de pulso ligado variável no intervalo entre 10 e 230 µs e tensão selecionada em 700 V. A potência média fornecida ao plasma pela fonte, para controle da temperatura, foi dirigida pelo tempo do pulso ligado (t_{ON}). As amostras dos aços inoxidáveis foram caracterizadas por difratometria de raios-X (DRX), micrografia, microscopia ótica e por medidas de dureza. Os resultados indicam que a composição química do substrato, em especial o teor de carbono, tem influência na cinética de tratamento e consequentemente nas propriedades da camada tratada.

Palavras-chave: Cementação por plasma a baixa temperatura, Aços inoxidáveis martensíticos, Composição química, Cinética de tratamento, Propriedades da camada tratada.

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são conhecidos e largamente empregados por suas características fundamentais: resistência à corrosão, relativa dureza e resistência ao desgaste (Cardoso, Mafra e Brunatto, 2016; Lebrun, 2015). Para serem inoxidáveis, os aços devem conter, no mínimo, 10,5% de cromo em peso (Lippold e Kotecki, 2005). A presença de Cr melhora a resistência à corrosão do aço pela formação de uma camada rica em óxido de cromo muito fina, estável, regenerativa e passiva sobre a superfície. Essa condição de passividade significa que a reação do metal com sua vizinhança forma uma camada superficial protetiva uniforme, que dificulta a reação (Bhadeshia et al., 2017). Porém, a principal característica dos aços inoxidáveis é a resistência à corrosão, a qual é preservada apenas sob determinadas condições (Cardoso, Mafra e Brunatto, 2016; Lebrun, 2015). Assim, a pretensão de melhoria de propriedades dos aços inoxidáveis não pode comprometer sua inoxidabilidade.

Os aços inoxidáveis martensíticos têm sido amplamente utilizados na fabricação de peças para a indústria de geração de energia (hidráulica, óleo e gás, térmica e nuclear), instrumentos cirúrgicos, cutelaria, engrenagens e eixos. Algumas aplicações também incluem pás de turbinas a vapor, a gás e a jato, grandes rotores de turbinas hidráulicas, tubulações e válvulas. Esta classe de aço inoxidável foi desenvolvida com o objetivo de combinar em um mesmo material boa resistência à corrosão sob condições atmosféricas ambientais e alta resistência (Brunatto, Cardoso e Scheuer, 2016).

O tratamento termoquímico assistido por plasma à baixa temperatura se constitui em uma técnica para tratar as superfícies dos aços inoxidáveis. A cementação realizada por esta técnica permite melhorar as propriedades da superfície dos aços inoxidáveis sem comprometer sua resistência à corrosão (Lewis et al., 1993), uma vez que a temperatura é suficientemente baixa para que não haja mobilidade considerável dos átomos, prevenindo assim a precipitação de carbonetos de cromo, processo que leva à redução localizada do teor cromo em solução sólida e consequentemente à

redução da resistência à corrosão do aço inoxidável (Baniasadi *et al.*, 2016). Na cementação, a adição de átomos de C por difusão térmica melhora propriedades da superfície dos aços inoxidáveis, como dureza e resistência ao desgaste (Lai, Lo e Shek, 2012). O tratamento de cementação por plasma à baixa temperatura produz uma zona de difusão, a qual pode ser ou não coberta por uma camada (*outer layer*), dependendo das condições de tratamento. Principalmente quando as condições de tratamento levam à maior espessura da camada de difusão, a cementação por plasma à baixa temperatura produz efetiva melhora da resistência ao desgaste dos aços inoxidáveis martensíticos (Angelini *et al.* 2016; Scheuer, Cardoso e Brunatto, 2015).

No tratamento termoquímico à baixa temperatura, a cinética da transformação de nitretos e carbonetos de cromo é cercada pelo processo de difusão atômica. Na superfície tratada são formadas fases metaestáveis (fases expandidas), consequência de não estarem em equilíbrio termodinâmico. Essas fases são soluções sólidas supersaturadas contendo átomos intersticiais de N ou C em uma condição metaestável. Para aços inoxidáveis martensíticos, a fase obtida pode ser chamada de martensita expandida pelo carbono (α_c), tratando-se de cementação. A formação das fases metaestáveis é possível uma vez que os átomos que estão sendo introduzidos na superfície tratada são intersticiais (C, no caso da cementação), ao passo que Cr é um átomo substitucional (Cardoso, Mafra e Brunatto, 2016). A temperatura de cementação ideal deve ser baixa o suficiente para evitar a difusão substitucional, mas ainda alta o suficiente para permitir o transporte intersticial suficientemente rápido de carbono (Cao, Ernst e Michal, 2003). Nos aços inoxidáveis martensíticos, o aumento da dureza se deve principalmente à formação de martensita expandida pelo carbono.

De acordo com Edenhofer *et al.* (2015), um aumento do teor de C da superfície reduz o tempo de ciclo de cementação. A difusão de C no aço é proporcional ao gradiente negativo de concentração de carbono e a temperatura de acordo com a primeira lei de Fick. Para Cermak e Kral (2014), a difusão do C em matrizes saturadas de carbono não é totalmente compreendida. As características da difusão de C na camada superficial mais próxima com maior concentração de C também permanecem incertas.

O tratamento termoquímico de cementação assistida por plasma à baixa temperatura de aços inoxidáveis martensíticos pode ser precedido de têmpera. Para obter-se máxima resistência é importante controlar adequadamente a composição de aço, de modo que uma microestrutura 100% martensítica seja obtida após a têmpera (Lai, Lo e Shek, 2012). Aços inoxidáveis martensíticos com elevado teor de C, como o AISI 440C, possuem uma baixa temperatura de início da transformação martensítica (M_s). Assim, após o tratamento térmico, mesmo se submetidos à têmpera subzero em nitrogênio líquido, esses aços apresentam quantidades significativas de austenita retida (Yang, Yu e Wang, 2006). De acordo com Shan e Fu (2014), o teor de austenita não transformada no AISI 440C pode chegar a 30%. Por sua vez, Yang, Yu e Wang (2006) afirma que esse teor pode chegar a 50%.

Ainda sobre a austenita retida, conforme Edenhofer *et al.* (2015), com o aumento do teor de cromo e níquel, aumenta a tendência para a formação de austenita residual. Isso se deve à dependência da solubilidade do carbono sobre a composição química do aço, que desloca o limite de saturação para o carbono dissolvido na austenita para valores mais baixos.

Os aços inoxidáveis martensíticos utilizados neste trabalho possuem diferentes teores de C em peso em sua composição química, conforme especificado na Tabela 1. Enquanto o CA6NM tem apenas 0,025% de C, o AISI 410 tem 0,102% de C, o AISI 416 tem 0,123% de C, o AISI 420 tem 0,288% de C e o AISI 440C tem 1,045% de C em peso em sua composição.

As amostras dos aços inoxidáveis martensíticos CA6NM, AISI 410 e AISI 416 são variedades de baixo teor de C. O AISI 410 e o AISI 416 são muito semelhantes, exceto que o AISI 416 tem maior usinabilidade. O aço AISI 420 também tem alto teor de carbono. O AISI 440C encontra aplicações onde a resistência à abrasão é uma preocupação principal (Lai, Lo e Shek, 2012).

Particularmente em relação ao processo de cementação por plasma a baixa temperatura dos aços inoxidáveis martensíticos, os mecanismos relacionados à mudança de propriedades são apenas parcialmente compreendidos, especialmente devido à formação de fases metaestáveis. Assim, em busca de melhor compreensão do processo, neste trabalho pretende-se estudar a influência da composição química do substrato nas características e propriedades das superfícies dos aços inoxidáveis martensíticos cementadas à baixa temperatura. Ênfase foi dada na difusão do C e na dureza da camada tratada.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Barras de 9,5 mm de diâmetro foram austenitizadas em 1268 K (995°C) (AISI 410 e AISI 416) e em 1323 K (1050 °C) (AISI 420, AISI 440C e CA6NM) por 0,5 h e depois temperadas ao ar, exceto a amostra de AISI 416 que foi temperada em óleo. Amostras cilíndricas de 9,3 mm de comprimento foram obtidas a partir do corte das barras temperadas. A dureza das amostras na condição temperada foi de 436,5 HV_{0,3} (AISI 410), 523,5 HV_{0,3} (AISI 416), 676,5 HV_{0,3} (AISI 420), 739,5 HV_{0,3} (AISI 440C) e 373,25 HV_{0,3} (CA6NM). A composição química destes aços foi obtida pela técnica de espectrometria de emissão ótica e os valores medidos são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1. Composição química das amostras de aços inoxidáveis martensíticos obtida por espectrometria de emissão ótica.

amostra	Composição química (% em peso)												
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	Nb
AISI 410	balanço	0,102	0,456	0,90	0,018	0,010	12,01	0,34	0,30	0,219	0,006	0,044	0,008
AISI 416	balanço	0,123	0,309	1,27	0,019	0,091	12,27	0,31	0,002	0,000	0,007	0,049	0,017
AISI 420	balanço	0,288	0,313	0,52	0,020	0,014	11,79	0,34	0,026	0,016	0,008	0,049	0,011
AISI 440C	balanço	1,045	0,901	0,79	0,014	0,007	16,98	0,28	0,030	0,000	0,009	0,048	0,006
CA6NM	balanço	0,025	0,508	0,91	0,024	0,000	12,51	3,89	0,459	0,045	0,011	0,093	0,055

As amostras temperadas foram preparadas usando lixas de SiC na faixa de 120 a 1200 e depois polidas com suspensão abrasiva de Al_2O_3 de 1 μm . Nesta condição, foram submetidas a banho de ultrassom com álcool etílico (absoluto) por 10 min e levadas à câmara de vácuo do reator de plasma, que foi mantida à pressão de 3 Torr (400 Pa). No estágio inicial, as amostras foram expostas ao plasma com fluxo gasoso ($80\% \text{H}_2 + 20\% \text{Ar}$) por 1 h e a temperatura de 573 K (300 °C), para remoção da camada de óxido de cromo da superfície. Depois deste período, a temperatura foi elevada até a de tratamento (723 K), adicionado CH_4 ao fluxo de gases e mantida esta condição por 12 h. A cementação ocorreu com uma atmosfera de tratamento com composição de 99,5% ($80\% \text{H}_2 + 20\% \text{Ar}$) + 0,5% CH_4 . O fluxo de gás foi de $200 \text{ cm}^3 \text{min}^{-1}$ ($3,33 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$). A composição da mistura de gases e a taxa de fluxo dos gases foram ajustadas por três controladores de fluxo, de $8,33 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ para H_2 e Ar e de $8,33 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ para CH_4 .

As amostras foram acondicionadas em um porta-amostra previamente cementado, o qual foi colocado no catodo da descarga no interior da câmara de vácuo, negativamente polarizado por uma fonte de corrente contínua pulsada de 4,2 kHz e tensão de saída de 700 V. O aquecimento das amostras foi consequência do bombardeamento do catodo pelas espécies rápidas do plasma (íons e partículas neutras). A corrente pulsada permitiu variar a potência transferida ao plasma. Desta forma, a temperatura das amostras foi controlada pelo tempo de pulso ligado (t_{ON}) da descarga. A temperatura foi medida por meio de termopar chromel-alumel (tipo k com 1,63 mm de diâmetro) inserido 17 mm de profundidade no porta-amostra. A pressão na câmara de vácuo foi mantida em 3 Torr (400 Pa) pela ação de um controlador marca Novus, modelo N1200 configurado no modo automático de atuação sobre a abertura da válvula.

As amostras cementadas foram limpas em banho de ultrassom com álcool etílico (absoluto) por 10 min. A identificação das fases presentes na superfície tratada foi realizada por difratometria de raios-X (DRX) com o uso de difratômetro de raios-X marca Shimadzu, modelo XRD7000, na configuração Bragg-Brentano. As medidas de dureza da superfície tratada foram realizadas com o uso de microdurômetro Vickers marca Shimadzu, modelo HMV-2T. Foram utilizadas as cargas de 25, 50, 100 e 300 gf e tempo de contato de carga máxima de 15 s. Para cada uma das cargas foram realizadas seis medições, sendo a dureza de cada amostra determinada pela média dessas medições. Para a realização da micrografia, as amostras tratadas foram cortadas longitudinalmente ao eixo do cilindro, embutidas em baquelite e preparadas até o polimento como antes descrito. Foi dada ênfase para a camada tratada de cada uma das amostras. O ataque químico foi realizado com reagente Vilela e a aquisição digital das imagens foi realizada com o uso de um microscópio ótico Olympus, modelo BX51M, equipado com uma câmera CCD (dispositivo de carga acoplada).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta os padrões de DRX da superfície das amostras de CA6NM, AISI 410, AISI 416, AISI 420 e AISI 440C, tanto para a condição temperada quanto para a condição cementada a 723 K (450 °C) por 12 h. A ordem em que estão escritas as amostras dos aços inoxidáveis martensíticos é crescente em relação ao teor de carbono em peso na composição química desses materiais. Neste sentido, o menor teor de carbono em peso do conjunto de amostras é o do CA6NM, enquanto que o maior teor de carbono em peso deste conjunto de amostras é o do AISI 440C.

O pico principal do padrão de DRX na condição temperada identifica a martensita (α') como fase presente, enquanto que o mesmo pico correspondente à condição cementada identifica a fase martensita expandida pelo carbono (α'_c). O processo de expansão da martensita desloca esse pico para ângulos (2θ) menores e o deixa mais alargado em decorrência do aumento de tensão da rede. Este comportamento está evidenciado nos padrões de DRX da Fig. 1, cujos correspondentes valores estão especificados na Tab. 2 (deslocamento do pico principal) e na Tab. 3 (expansão do pico principal). Essa evolução do comportamento do pico principal apenas não correu em relação ao deslocamento do AISI 440C para um ângulo menor. Neste caso, houve um deslocamento nulo do pico principal da condição cementada em relação à condição temperada. Isto indica que não houve difusão do C, como também não houve revenimento. Por outro lado, o pico principal do CA6NM, amostra com menor teor de C em peso, apresentou o maior deslocamento da condição temperada para a condição cementada.

Particularmente em relação à amostra do aço AISI 440C, o elevado teor de carbono (1,045% em peso) é um limitador da difusão durante o processo de cementação. A condição descrita do pico principal indica a saturação de carbono na matriz decorrente do mencionado teor do elemento. Colabora com a restrição da difusão do C o significativo percentual presumido de austenita retida, conforme Shan e Fu (2014). De acordo com o *software* Thermo-Calc, a partir da base de dados TCFE6 versão 6.2, essa austenita representa 89,3% da liga na temperatura de 1050 °C e é rica em Cr (fração de massa de 12,5%). Ainda de acordo com o mesmo *software*, o restante da liga nessa temperatura é composto pelo carboneto

indissolúvel M_7C_3 , com fração de massa de 66,7% de Cr. É provável que na temperatura ambiente a austenita retida tenha maiores teores de Cr e de C do que na temperatura de austenitização definida.

Na Figura 2, os padrões de DRX do pico principal da superfície das amostras dos aços CA6NM, AISI 410, AISI 416, AISI 420 e AISI 440C, cementadas a 723 K (450 °C) por 12 h, mostram que os substratos com menor teor de carbono em peso estão mais sujeitos ao deslocamento para ângulos menores do que os substratos com maior teor de carbono. Esta condição indica que quanto menor o teor de carbono em solução sólida do substrato, maior é a susceptibilidade à difusão do carbono pelo processo de cementação. Esta compreensão tem concordância com as afirmações de Edenhofer *et al.* (2015).

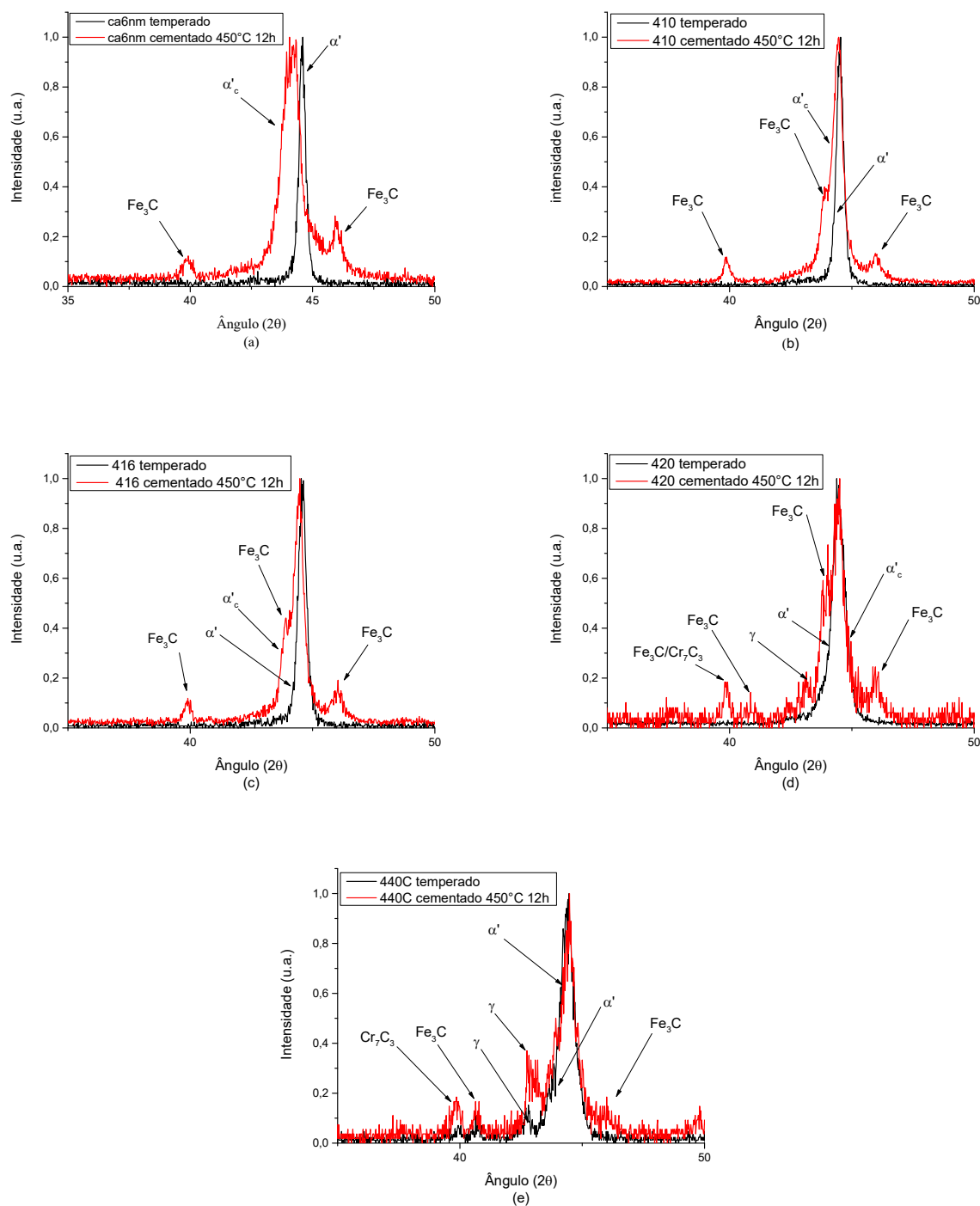


Figura 1. Padrão de DRX entre os ângulos 35 e 50 da superfície das amostras cementadas e temperadas dos aços: (a) CA6NM, (b) AISI 410, (c) AISI 416, (d) AISI 420 e (e) AISI 440C.

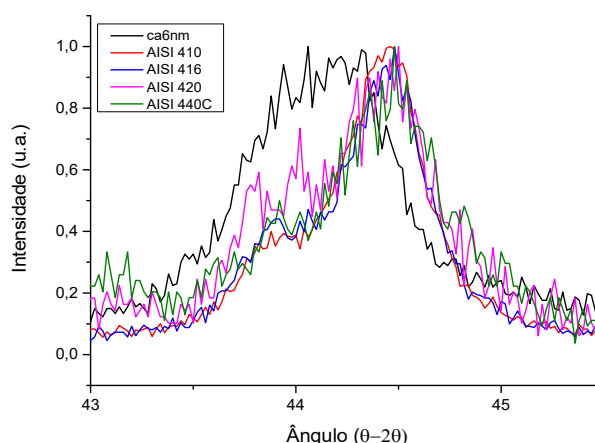


Figura 2. Padrão de DRX entre os ângulos 43 e 45,5 da superfície das amostras dos aços CA6NM, AISI 410, AISI 416, AISI 420 e AISI 440C cementadas a 723 K (450 °C) por 12 h.

Tabela 2. Ângulo (2θ) do pico principal do padrão de DRX da superfície das amostras de CA6NM, AISI 410, AISI 416, AISI 420 e AISI 440C nas condições temperada e cementada a 723 K (450 °C) por 12 h.

Amostra	Ângulo (2θ) para a condição	
	Temperada	cementada a 723 K por 12 h
CA6NM	44,58	44,13
AISI 410	44,51	44,38
AISI 416	44,58	44,36
AISI 420	44,45	44,31
AISI 440C	44,38	44,38

Na tabela 3 estão expressas as larguras dos picos principais das amostras dos aços inoxidáveis martensíticos, nas condições temperada e cementada. Todas as amostras apresentaram alargamento do pico principal, da condição cementada em relação à condição temperada. O CA6NM foi o aço inoxidável martensítico que apresentou o maior alargamento do pico principal. O AISI 440C, que não apresentou deslocamento do pico principal para ângulos menores, sofreu apenas alargamento desse pico.

Tabela 3. Largura (Å) do pico principal do padrão de DRX da superfície das amostras de CA6NM, AISI 410, AISI 416, AISI 420 e AISI 440C nas condições temperada e cementada a 723 K (450 °C) por 12h.

Amostra	Largura (Å) do pico principal para a condição	
	Temperada	cementada a 723K por 12h
CA6NM	0,28	0,84
AISI 410	0,32	0,64
AISI 416	0,36	0,71
AISI 420	0,58	0,92
AISI 440C	0,65	0,93

Na figura 3 está indicada a evolução da dureza da superfície das amostras dos aços inoxidáveis CA6NM, AISI 410, AISI 416, AISI 420 e AISI 440C, na condição recebida, temperada e cementada a 450 °C por 12 h (superfície tratada e base). Todas as amostras tiveram incremento de dureza na condição cementada, a partir da condição temperada. A partir desta condição, a amostra que teve maior ganho de dureza foi o CA6NM, o que está de acordo com a maior evolução deste material quanto ao deslocamento do pico principal para um ângulo menor em relação à condição temperada. Este comportamento sugere difusão de maior quantidade de C no CA6NM diante das demais amostras.

Os resultados apresentados neste trabalho, particularmente em relação ao AISI 420, não atingiram os níveis de melhoria das propriedades expressos por Scheuer *et al.* (2013). Constatou-se, após o tratamento termoquímico de cementação assistida por plasma, a presença de fuligem sobre as amostras. Este fato, de origem desconhecida, não impediu a difusão do C, mas pode ter contribuído para essa variação no resultado. Outro fator a considerar é a diferença, embora pequena, entre as composições químicas do AISI 420 dos dois trabalhos.

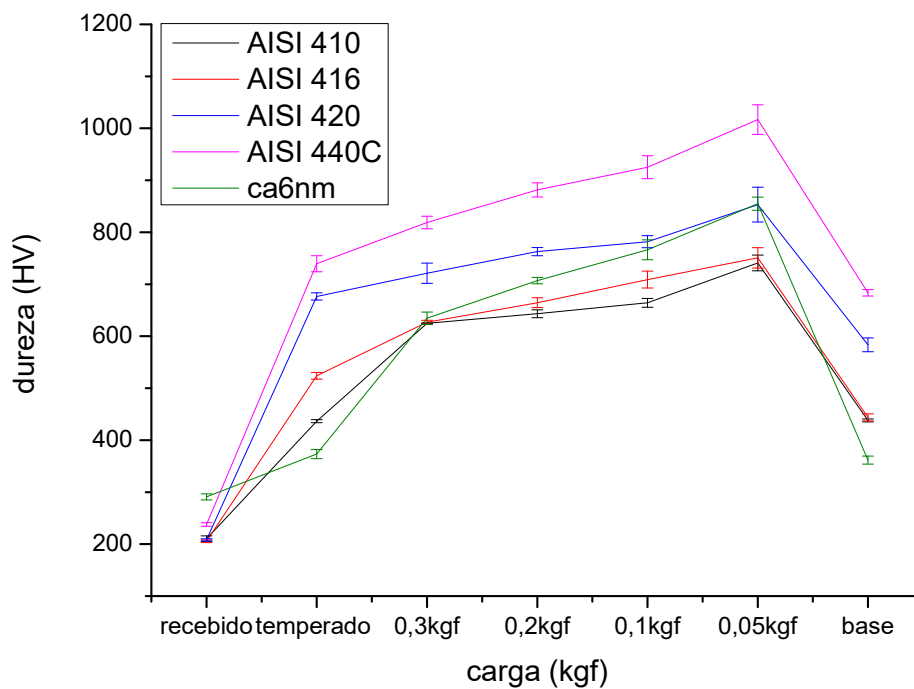
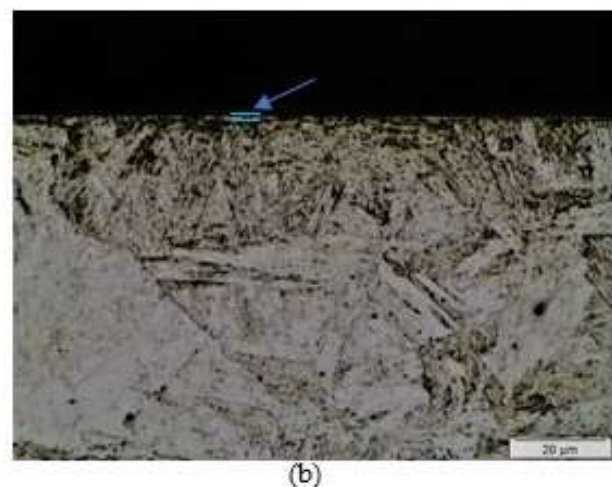
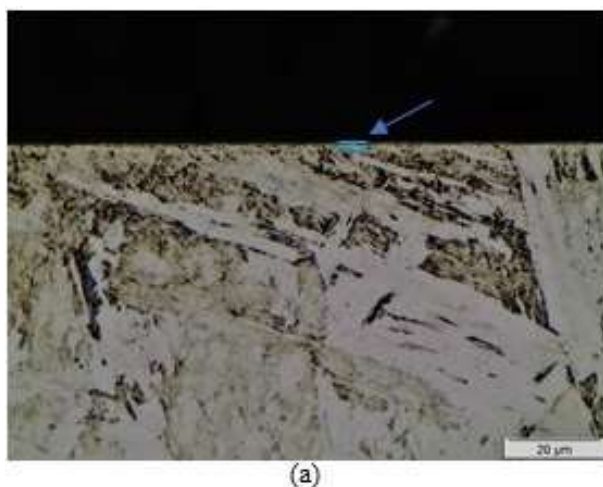


Figura 3. Dureza das amostras dos aços CA6NM, AISI 410, AISI 416, AISI 420 e AISI 440C na condição recebida (0,3 kgf), temperada (0,3 kgf) e cementada a 723 K (450 °C) por 12h [superfície tratada e base (0,3 kgf)].

Na figura 4 estão expressas as micrografias da seção transversal das amostras cementadas dos aços inoxidáveis CA6NM, AISI 410, AISI 416, AISI 420 e AISI 440C. Está evidenciada a presença da camada externa (*outer layer*) sobre a zona de difusão, conforme descrito por (Angelini et al. 2016; Cristiano José Scheuer, Cardoso, and Brunatto 2015).

A presença desta camada é mais saliente no CA6NM, embora presente em todas as amostras. Em relação ao aço AISI 440C, não há evidências claras de sensitização, a qual poderia indicar excesso de tempo ou temperatura de tratamento e, assim, justificar o deslocamento nulo do pico principal. Por outro lado, a presença de significativa quantidade de austenita retida aliada à presença de elevado teor de Cr pode permitir a difusão deste elemento ao invés do C, no caso da temperatura de tratamento ser excessiva, conforme estabelecido por Cao, Ernst e Michal (2003). Isto sugere que sendo alto o teor de C em peso da amostra, menor pode ser o tempo e/ou a temperatura ideal de tratamento termoquímico de cementação.



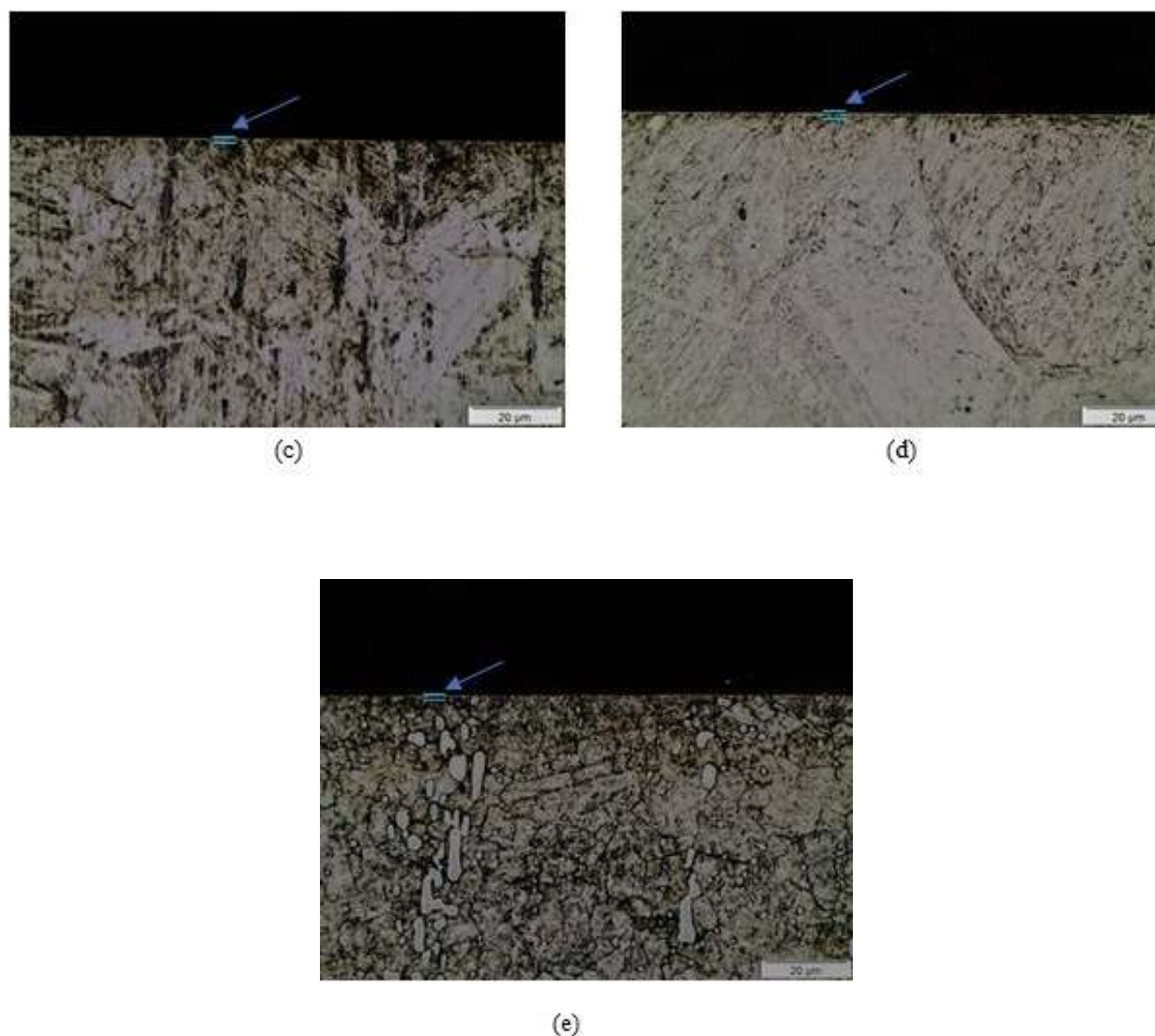


Figura 4. Micrografia da seção transversal das amostras cementadas a 450 °C por 12 h dos aços: (a) CA6NM, (b) AISI 410, (c) AISI 416, (d) AISI 420 e (e) AISI 440C. Aumento: 1000x. Reagente: Vilela.

4. CONCLUSÕES

Houve endurecimento da superfície tratada de todos os aços inoxidáveis martensíticos estudados, sendo que o maior ganho de dureza a partir da condição temperada foi da amostra de CA6NM, cujo teor de C em peso é o menor entre os aços inoxidáveis martensíticos CA6NM, AISI 410, AISI 416, AISI 420 e AISI 440C.

Exceto o AISI 440C, os demais aços estudados (CA6NM, AISI 410, AISI 416 e AISI 420) apresentaram expansão do pico principal, da condição temperada para a condição cementada a 450 °C por 12 h.

A microestrutura de todos os aços estudados apresentou *outer layer* na condição cementada a 450 °C por 12 h.

A composição química dos aços inoxidáveis martensíticos influi no processo de cementação. Há evidências de que quanto menor o teor de carbono em solução sólida do substrato, maior é a susceptibilidade à difusão do carbono pelo processo de cementação. Neste sentido, quanto menor o teor de carbono do substrato, maior é o tempo de tratamento para a saturação da rede com carbono, o que concorda com as observações de Edenhofer *et al.* (2015) sobre difusão do carbono.

5. REFERÊNCIAS

- Angelini, V. et al., 2016. "Dry Sliding Behavior (Block-on-Ring Tests) of AISI 420 Martensitic Stainless Steel, Surface Hardened by Low Temperature Plasma-Assisted Carburizing." *Tribology International* 103: 555–65.
- Baniasadi, F., Bahmannezhad, B., Nikpoor, N. and Asgari, S., 2016, "Thermal Stability Investigation of Expanded Martensite". *Surface and Coatings Technology* 300: 87–94.
- Bhadeshia, H. and Honeycombe, R., 2017, "Chapter 12 - Stainless Steel". In *Steels: Microstructure and Properties*, Elsevier, 343–76.
- Brunatto, S.F., Cardoso, R.P. and Scheuer, C.J., 2016, "Martensitic Stainless Steel: Direct Current Low-Temperature Plasma Carburizing". In *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*, ed. Taylor & Francis Group. New York: CRC

Press, 2153–68.

- Cao, Y., Ernst, F. and Michal, G. M., 2003, “Colossal Carbon Supersaturation in Austenitic Stainless Steels Carburized at Low Temperature.” *Acta Materialia* 51(14): 4171–81.
- Cardoso, R.P., Mafra, M. and Brunatto, S.F., 2016, “Low-Temperature Thermochemical Treatments of Stainless Steels – An Introduction”. In *Plasma Science and Technology - Progress in Physical States and Chemical Reactions*, ed. Tetsu Mienu. InTech, 107–30.
- Cermak, J. and Kral, I., 2014, “Carbon Diffusion in Carbon-Supersaturated Ferrite and Austenite.” *Journal of Alloys and Compounds* 586: 129–35.
- Edenhofer, B., Joritz, D., Rink, M. and Voges, K., 2015, “Carburizing of Steels”. In *Thermochemical Surface Engineering of Steels*, Elsevier, 487–553.
- Ismail, M. I., S. S. Iskander, and E. B. Saleh. 1981. “Carburizing of Steels.” *Surface Technology* 12(4): 341–49.
- Lai, J., Leuk, K., Lo, K.H. and Shek, C.H., 2012, “*Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments*”. Dubai, United Arab Emirates: Bentham Science Publishers.
- Lebrun, J P., 2015, “Plasma-Assisted Processes for Surface Hardening of Stainless Steel”. In *Thermochemical Surface Engineering of Steels*, Elsevier, 615–32.
- Lewis, D.B. et al., 1993, “Metallurgical Study of Low-Temperature Plasma Carbon Diffusion Treatments for Stainless Steels”. *Surface and Coatings Technology* 60(1): 416–23.
- Lippold, J.C. and Kotecki, D.J., 2005, “*Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*”. Canada. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. 2005. New Jersey: John Wiley and Sons.
- Scheuer, C.J., Cardoso, R.P., Mafra, M. and Brunatto, S.F., 2013, “AISI 420 Martensitic Stainless Steel Low-Temperature Plasma Assisted Carburizing Kinetics”. *Surface and Coatings Technology* 214: 30–37.
- Scheuer, C.J., Cardoso, R.P. and Brunatto, S.F., 2015, “Low-Temperature Plasma Assisted Thermochemical Treatments of AISI 420 Steel: Comparative Study of Obtained Layers”. *Materials Research* 18(6): 1392–99.
- Shan, A. and Fu, L., 2014, “Heat Treating of Air-Hardening High-Strength Structural Steels”. In *Heat Treating of Irons and Steels*, Shanghai: ASM International, 169–78.
- Yang, J. R., Yu, T.H. and Wang, C.H., 2006, “Martensitic Transformations in AISI 440C Stainless Steel”. *Materials Science and Engineering A* 438440: 276–80.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CHEMICAL COMPOSITION INFLUENCE OF MARTENSITIC STAINLESS STEELS IN THE LOW TEMPERATURE CARBURIZING PROCESS

Laércio Malfatti, laercio.malfatti@ufpr.br¹

Silvio Francisco Brunatto, brunato@ufpr.br¹

Rodrigo Perito Cardoso, rodrigo.perito@ufpr.br¹

Plasma Assisted Manufacturing Technology and Powder Metallurgy Group, Federal University of Paraná, Curitiba-PR, 81531-980, Brazil

Abstract: This work presents the results of the low temperature plasma assisted carburizing experiment of five martensitic stainless steels (AISI 410, AISI 416, AISI 420, AISI 440C and CA6NM). The treatment was carried out in a plasma reactor for a period of 12 hours at a temperature of 723 K (450 °C). These time and temperature parameters are supported in Scheuer et al. (2013), which determined the time and temperature influence on the diffusion process kinetics for a sample of AISI 420. According to Scheuer et al. (2013), until these conditions, it can be produced precipitation free diffusion layers: there is treated surface hardness increase and there is no treated surface corrosion resistance compromise. The vacuum reactor chamber was maintained at a 3 Torr (400 Pa) pressure and with 99.5% (80% H₂ + 20% Ar) + 0.5% CH₄ gas mixture. A pulsed (4.2 kHz) direct current source with a rectangular waveform with a 240 μs pulse period was used, pulse time variable in the 10 to 230 μs range and voltage selected at 700 V. The mean power supplied to the plasma by the source, for temperature control, was driven by connected pulse time (tON). The stainless steels samples were characterized by X-ray diffractometry (XRD), micrography, optical microscopy and hardness measurements. The results indicate that the chemical composition of the substrate, especially the carbon content, influences the treatment kinetics and consequently the properties of the treated layer.

Keywords: Low temperature plasma carburizing, Martensitic stainless steels, Chemical composition, Treatment kinetics, Treated layer properties