

# **Cementação de aço baixo carbono enriquecido superficialmente com molibdênio em plasma DC**

**Henrique Cezar Pavanati<sup>1</sup>, Daniel Xavier da Rosa Coelho<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Professor do DAMM, Câmpus Florianópolis, pavanati@ifsc.edu.br

<sup>2</sup>Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Bolsista de iniciação científica, Câmpus Florianópolis, daniel@xpb.com.br

## **RESUMO**

A alteração das propriedades dos aços somente na superfície pode ser vantajosa, possibilitando a melhoria de propriedades como dureza e resistência ao desgaste, à corrosão e à fadiga. Nesse sentido, o tratamento de cementação é um dos mais utilizados industrialmente. A presença de elementos de liga nos aços pode influenciar as propriedades obtidas após o processo de cementação, e o uso de aços ligados somente na região superficial ainda é um campo de estudo com grande oportunidade de desenvolvimento. Nesse contexto, foram utilizadas amostras de aço ABNT1020, submetidas a um tratamento de enriquecimento superficial com molibdênio em plasma DC, sendo posteriormente cementadas e temperadas. Os resultados mostram que a região enriquecida apresentou dureza sensivelmente superior àquela obtida sem a presença desse elemento de liga. Acredita-se que esses resultados estejam relacionados à presença de carbonetos de Mo precipitados na região superficial aliada à microestrutura martensítica na camada enriquecida.

**Palavras-Chave:** Tecnologia de plasma DC, Enriquecimento superficial de molibdênio, Cementação.

## **Introdução**

Os tratamentos superficiais dos aços são já bastante conhecidos pela comunidade científica e pela indústria. A grande vantagem desses tratamentos refere-se à flexibilização de propriedades importantes para o desempenho de uma peça de aço, como sua resistência ao desgaste, à corrosão e à fadiga, entre outros. Modificar somente a superfície do aço tem suas vantagens, pois pode-se efetuar tal modificação a uma espessura mínima, ou seja, pequena o suficiente para alterar as já citadas características intrínsecas às solicitações que ocorrem somente na superfície, sem alterar significativamente o comportamento mecânico relacionado ao volume, como tenacidade, resistência à tração, flexão, entre outros. Apesar de os tratamentos superficiais já serem bem consolidados, ainda existe um vasto campo para estudo e desenvolvimento dessa técnica, uma vez que há inúmeras possibilidades de modificação

superficial dos aços. Nesse contexto, pode-se citar como uma importante área de estudo os tratamentos superficiais por plasma (BOGAERTS, *et al.* 2002; HOLLAND, 1977).

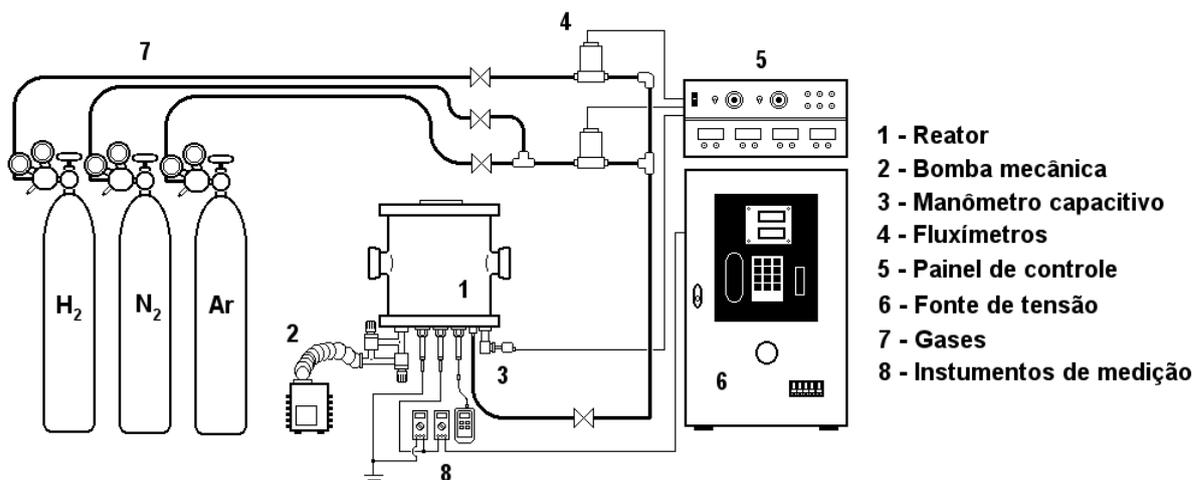
Tal tecnologia permite um melhor controle da microestrutura obtida na superfície, além de possibilitar processos que não são viáveis pelos métodos tradicionais. Há algumas décadas, a tecnologia de plasma com baixo grau de ionização, também conhecida como plasmas frios em corrente contínua (ou Plasma DC), passou a ser utilizada para, entre outras aplicações, realizar tratamentos superficiais nos aços, tais como nitretação, cementação e limpeza por plasma (BERNARDELLI, *et al.* 2011; SHROEDER *et al.* 2011; SANTOS *et al.* 2005). Na última década, o uso dessa tecnologia foi também estendido à metalurgia do pó, mais precisamente na etapa de sinterização (BATISTA, *et al.* 1998; MALISKA, *et al.* 2003; PAVANATI, *et al.* 2005), e ao tratamento de enriquecimento superficial com elementos metálicos (PAVANATI *et al.* 2005, PAVANATI *et al.* 2007, KLEIN *et al.* 2013). Neste último caso, tal tecnologia permite depositar elemento(s) químico(s) na superfície de uma peça que se encontra em elevada temperatura. Durante a deposição, os átomos depositados se difundem para o seu interior, produzindo uma liga até uma profundidade específica da peça (na ordem de dezenas de micrômetros). Essa tecnologia vem sendo estudada e aprimorada.

Um dos desdobramentos dessa tecnologia é o estudo do efeito da combinação de diversos tipos de enriquecimentos no aço, como enriquecimento de átomos metálicos e enriquecimento com carbono feito em ciclo único ou em etapas separadas. O desenvolvimento desses estudos pode levar à otimização de propriedades superficiais dos aços, oportunizando a obtenção de componentes com alto desempenho e alto valor agregado.

Este artigo objetiva, portanto, descrever um estudo que compreendeu a cementação de amostras de aço ABNT1020 submetidas a um tratamento de enriquecimento superficial com molibdênio em plasma DC, sendo posteriormente cementadas e temperadas. Na sequência é descrito o processo, apresentados os resultados e a discussão.

## **Material e Métodos**

As amostras para o estudo foram obtidas a partir de uma barra redonda de aço ABNT1020 com 1” de diâmetro. Cada amostra possuía aproximadamente 15 mm de altura. As amostras foram lixadas, e as superfícies planas (topo e base) foram polidas com alumina 1 µm. A seguir, um grupo de amostras foi submetido ao tratamento de enriquecimento superficial com molibdênio. Esse tratamento foi realizado em reator de plasma DC, com características similares aos indicados no trabalho de Pavanati *et al.* (2005). A Figura 1 mostra um desenho esquemático do reator de plasma.



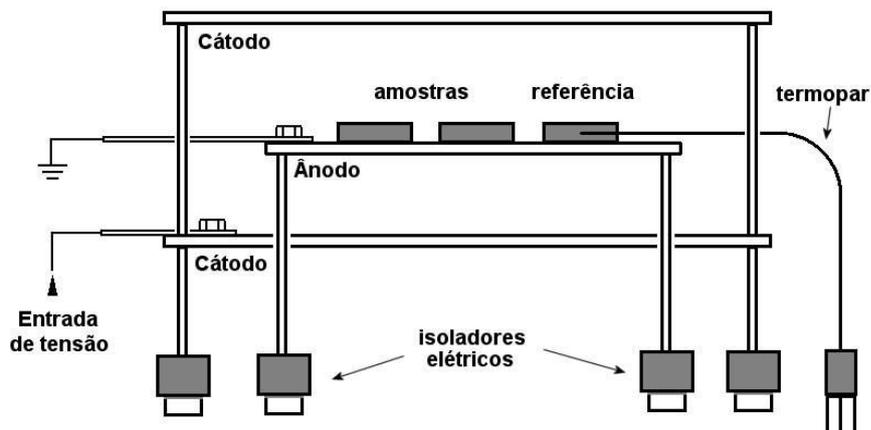
**Figura 1** – Desenho esquemático do reator de plasma utilizado para o enriquecimento superficial das amostras com Mo  
**FONTE:** Pavanati *et. al.* (2005).

Nesse tratamento, uma descarga luminescente em regime anormal é gerada em uma câmara com uma mistura gasosa à baixa pressão. Essa descarga é gerada entre eletrodos e envolve totalmente o cátodo. As condições utilizadas para o enriquecimento superficial com Mo das amostras são mostradas na Tabela 1.

**Tabela 1** – Parâmetros de controle do ciclo de enriquecimento superficial de Mo por plasma DC.

Configuração dos Eletrodos	Amostra sobre o ânodo e descarga sobre o cátodo
Material do cátodo	Liga TZM (99,5%Mo)
Tensão de pico	700 V
Pressão da câmara	260 Pa
Atmosfera	80% Ar / 20% H <sub>2</sub>
Temperatura de patamar	1150 °C
Tempo de patamar	1,0 h

Dependendo da disposição dos eletrodos sobre o cátodo, é possível alterar a estratégia de tratamento utilizado, pois o cátodo é submetido ao bombardeamento direto de íons energéticos do plasma e átomos ou moléculas neutras rápidas geradas pelo efeito de troca simétrica de carga na bainha catódica (DAVIS e VANDERLSICE, 1963). A geometria dos eletrodos dentro da câmara do reator é mostrada na Figura 2.



**Figura 2** – Configuração dos eletrodos no reator de Plasma DC para o enriquecimento superficial com molibdênio.

FONTE: Pavanati et al (2007)

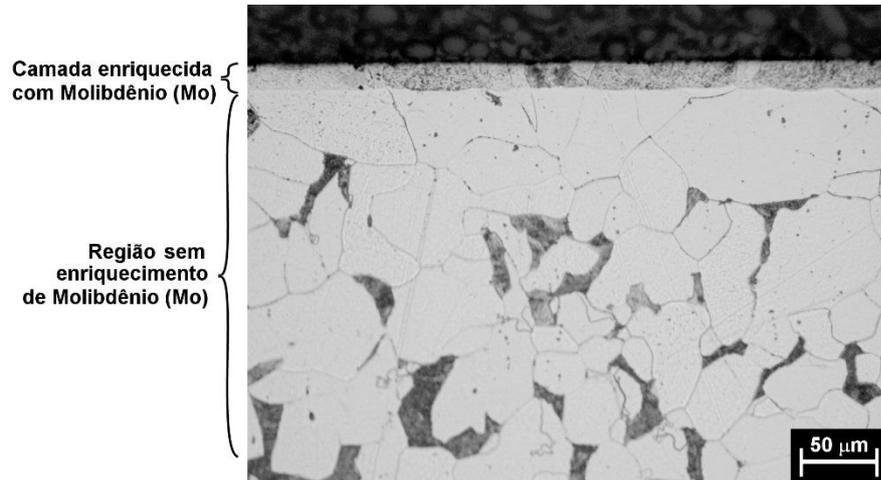
Na configuração mostrada na Figura 2, as amostras são posicionadas no ânodo da descarga. Como a descarga se forma no cátodo, o bombardeamento das espécies energéticas do plasma gera a pulverização de átomos no mesmo. Parte desses átomos se difunde até a superfície das amostras que se encontram posicionadas sobre o ânodo. Considerando que as amostras estão em temperatura elevada (1150 °C), esses átomos se difundem no volume próximo à superfície, formando uma liga de ferro e molibdênio, gerando a superfície enriquecida com Mo, mencionada neste trabalho.

Em seguida, as amostras, com e sem enriquecimento de Mo, foram submetidas ao tratamento termoquímico de cementação em caixa num forno de mufla, a uma temperatura de 960°C para tempos de patamar de: 1, 2, 3, 4 e 6 horas. As amostras foram inseridas em uma caixa metálica, contendo granulados de cementação enriquecidos com carbonato de bário. As amostras foram então normalizadas em um ciclo duplo e, na sequência, parte delas foi temperada em água.

As amostras, nas diversas condições de tratamento, foram seccionadas e preparadas metalograficamente para a análise. A microestrutura foi revelada através de ataque químico com o reagente Nital 2%. As micrografias foram obtidas com o auxílio de um microscópio óptico Leica DM4000 para aumentos de 50x e 500x. A profundidade cementada foi obtida por meio de análise de imagens das amostras somente cementadas (com e sem enriquecimento de Mo), utilizando-se o *software* para análise de imagens ImageJ 1.41o. Os perfis de microdureza foram obtidos com o auxílio de um microdurômetro Leco AMH43.

## Resultados e discussão

A Figura 3 mostra a micrografia de uma amostra ABNT1020 somente enriquecida com molibdênio para se ter uma ideia do efeito do carbono já presente no aço (aproximadamente 0,20%C) sobre a morfologia da camada enriquecida. Essa camada é de uma liga contendo aproximadamente 3% de Mo em peso, a uma profundidade de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ .

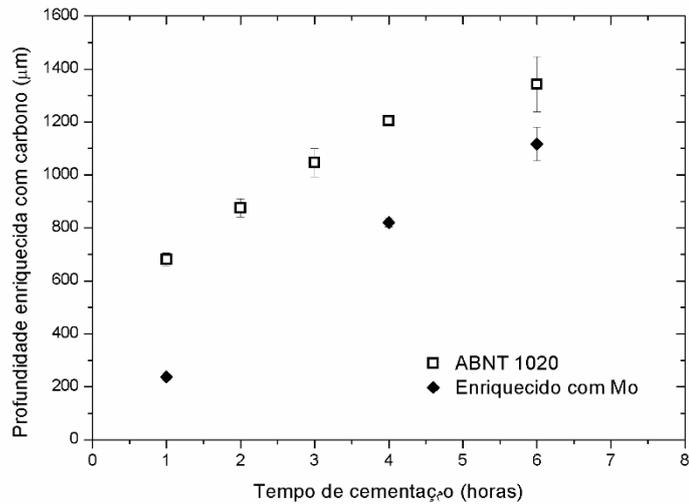


**Figura 3** – Micrografia da seção transversal do aço ABNT1020 enriquecido superficialmente com Mo em Plasma DC.

**FONTE:** Dados desta pesquisa

Pode-se notar na Figura 3 uma camada com pequenos precipitados, correspondente à profundidade enriquecida. Essa camada mostra que o Mo difundiu para o interior da amostra, não formando uma camada rica em Mo. Observa-se também que a presença de molibdênio difundido a partir da deposição via plasma provocou uma difusão do carbono em direção à superfície. Nota-se que na camada há a presença de precipitados e, logo abaixo dela, uma região descarbonetada, evidenciando a afinidade do Mo com o C.

O procedimento de cementação realizado em vários tempos de patamar pode trazer alguns indicativos relacionados ao efeito da presença de Mo na superfície da amostra no tratamento de cementação dessas ligas. A Figura 4 mostra a evolução da profundidade cementada com o tempo de cementação para os aços com e sem enriquecimento superficial de Mo.

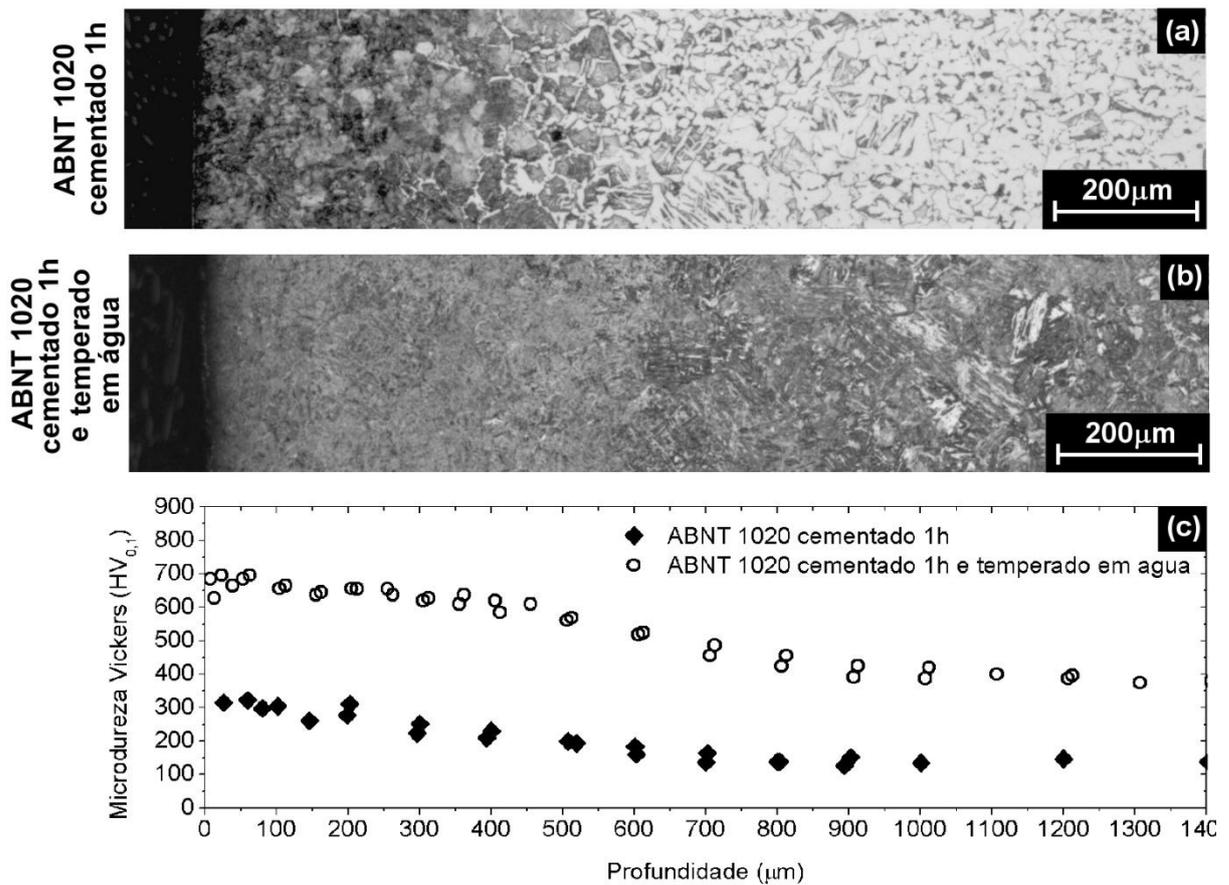


**Figura 4** – Profundidade enriquecida com carbono durante a cementação em caixa para os aços com e sem enriquecimento de Mo em função do tempo de cementação.

**Fonte:** Dados desta pesquisa.

Como era de se esperar, a profundidade da camada cementada aumenta com o tempo. Além disso, observando-se a evolução da profundidade, pode-se notar que a taxa de crescimento da camada parece ser similar para os dois casos. Porém, para o caso em que se tem a camada enriquecida com molibdênio, parece haver um atraso no início da formação da camada. Esse efeito pode ser atribuído à formação de carbonetos de molibdênio na região enriquecida nos primeiros momentos da cementação. Após a saturação (formação de carbonetos de molibdênio), a camada cementada cresce com taxas similares àquela observada para o aço sem enriquecimento superficial.

Uma parte das amostras cementadas foi então normalizada, e outra, normalizada e, em seguida, temperada e revenida a 200 °C por 2,0 h. A Figura 5 mostra micrografias da seção transversal dos aços sem enriquecimento de molibdênio, somente cementados e cementados e temperados em água, além do perfil de microdureza para os dois casos.



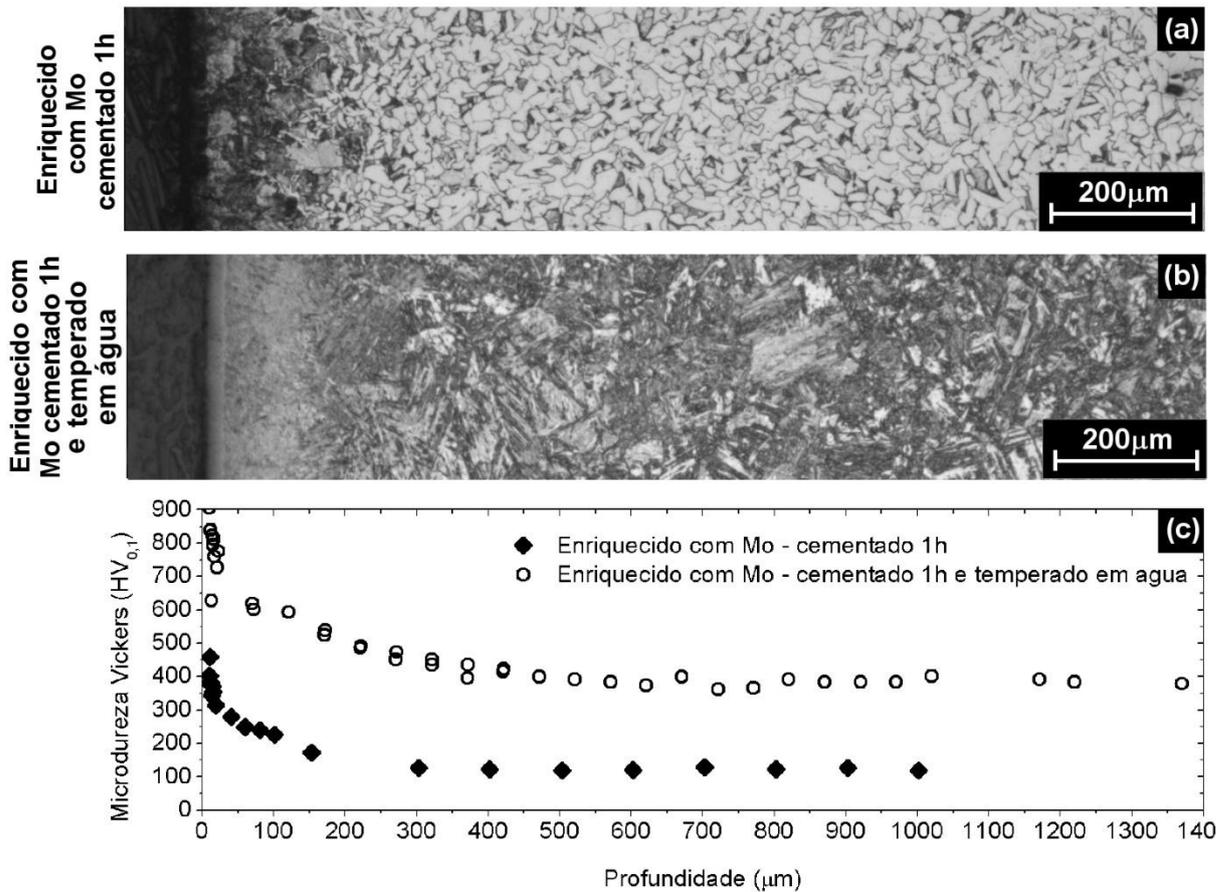
**Figura 5** – Microestrutura das amostras sem enriquecimento de Mo somente cementadas (a), amostras sem enriquecimento de Mo cementadas e temperadas (b) e perfil de microdureza para tempo de cementação de 1,0 h (c).

**FONTE:** Dados desta pesquisa

Pode-se notar na Figura 5a, para a amostra não temperada, que houve difusão de carbono para a formação de perlita até uma profundidade de aproximadamente 700 μm. Além dessa profundidade, percebe-se a microestrutura típica de um aço ABNT1020, ferrita proeutetóide e poucas ilhas de perlita. Essas imagens são corroboradas pelos valores de microdureza, posicionados com a mesma escala (Figura 5c). Nota-se maior valor de dureza na região cementada, onde os valores chegam a aproximadamente 300 HV. Na região sem alteração microestrutural, os valores de dureza atingem aproximadamente 150 HV. Para a amostra cementada e temperada, notam-se na região próxima à superfície, a uma profundidade equivalente à camada cementada, valores de dureza da ordem de 600 a 700 HV até uma profundidade de aproximadamente 600 μm. Já, nas amostras sem têmpera, a dureza atingiu aproximadamente 300 HV. Como era de se esperar, na região cementada e temperada ocorreu a formação de uma microestrutura totalmente martensítica (Figura 5b) após a têmpera, enquanto que, além da camada cementada, houve a formação de uma mistura de

microestruturas (ferrita livre e martensita). Como a velocidade de resfriamento foi relativamente grande, mesmo no núcleo, houve a formação parcial de martensita, corroborando os valores de dureza apresentados.

A Figura 6 mostra micrografias da seção transversal dos aços com enriquecimento de Mo, somente cementadas e cementadas e temperadas em água, além do perfil de microdureza para os dois casos.



**Figura 6** – Microestrutura das amostras com enriquecimento de Mo somente cementadas (a), das amostras sem enriquecimento de Mo cementadas e temperadas (b) e perfil de microdureza para tempo de cementação de 1,0 h (c).

**FONTE:** Dados desta pesquisa.

Na amostra enriquecida, como a profundidade cementada foi menor, percebe-se que a região endurecida (com dureza acima de 600 HV) apresentou-se na mesma proporção (Figura 6c). A microestrutura formada foi muito similar àquela observada para as amostras sem enriquecimento de Mo. Para a amostra temperada em água (Figura 6b), na região onde houve a cementação, ocorreu a formação de martensita na superfície e uma mistura de ferrita proeutetóide e perlita para a região onde não houve enriquecimento com carbono. No entanto, pode-se perceber que na camada com enriquecimento de Mo a dureza é significativamente maior (entre 750 e 900 HV). Esse resultado pode ser atribuído à presença de carbonetos duros

dispersos numa microestrutura martensítica formada nessa região. A presença de uma matriz martensítica aliada a precipitados duros promove o aumento de dureza significativo, fato observado na caracterização microestrutural das amostras enriquecidas com Mo, cementadas e subsequentemente temperadas em água. A região mais dura observada em tais amostras pode levar a um aumento significativo de resistência ao desgaste, em comparação às amostras tratadas na mesma condição, mas sem enriquecimento com molibdênio. Isso porque a presença de uma camada dura, sustentada por um substrato com baixa susceptibilidade à deformação plástica, promove um conjunto ideal para solicitações na presença de componentes em contato com deslizamento relativo.

### **Conclusões**

Pode-se observar que a presença de uma camada enriquecida com molibdênio reduziu sensivelmente a profundidade cementada. Essa redução pode ser atribuída à formação de carbonetos de molibdênio durante o processo de cementação. Após um tempo de saturação, a difusão de carbono para o interior da amostra ocorre seguindo uma taxa similar àquela observada para o aço sem enriquecimento. Outra evidência para a formação desses precipitados é a dureza obtida na camada enriquecida, aproximadamente 750 a 900 HV para a amostra temperada, enquanto que, para o aço ABNT1020 sem enriquecimento, o valor de dureza obtido para essa região foi de aproximadamente 700 HV. Esse fator mostra-se interessante pois sugere que a presença de molibdênio produziu maior dureza na face enriquecida da peça. Espera-se que um componente mecânico com o projeto microestrutural deste tipo possa suportar melhor o desgaste em situações de lubrificação limítrofe. Uma fina camada mais dura na superfície teria sua vida ampliada pela presença de uma subcamada com dureza intermediária, o que sustentaria as tensões geradas pelo contato com outro componente, evitando a fragmentação da camada superficial.

### **REFERÊNCIAS**

BATISTA, V.J.; BINDER, R.B.; KLEIN, A.N.; MUZART, J.L.R. Sintering Using an Abnormal Glow Discharge, **The international Journal of Powder Metallurgy**, Princeton, NJ, v. 34, n. 8, p. 55-62, 1998.

BERNARDELLI, E. A. ; BELMONTE, T. ; DUDAY, D. ; FRACHE, G. ; PONCIN-EPAILLARD, F. ; NOEL, C. ; CHOQUET, P. ; MIGEON, H.-N. . Interaction Mechanisms

Between Ar O<sub>2</sub> Post-Discharge and Stearic Acid II: Behaviour of Thick Films. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 31, p. 205-215, 2011.

BOGAERTS, A.; NEYTS, E.; GIJBETLS, R.; VAN DER MULLEN, J. Gas Discharge Plasmas and their Applications, **Spectrochimica Acta Part B**, v. 57, p. 609-658, 2002.

DAVIS, W.D.; VANDERSLICE, T.A. Ion Energies at the Cathode of a Glow Discharge, *Physical Review*, v.131, n.1, p.219-228, 1963.

HOLLAND, L. Some Characteristics and Uses of Low Pressure Plasma in Materials Science, **Journal of Vacuum Science Technology**, v. 14, n. 1 p. 5-15, 1977.

KLEIN, A.N. et al. DC Plasma Technology Applied to Powder Metallurgy: an Overview, **Plasma Science & Technology**, v15, p.70-81, 2013.

MALISKA, A.M.; PAVANATI, H.C.; KLEIN, A.N.; MUZART, J.L.R. The influence of ion energy bombardment on the surface porosity of plasma sintered iron, **Materials Science and Engineering A**, v. 352, p. 273-278, 2003.

PAVANATI, H.C.; MALISKA, A.M.; KLEIN, A.N.; MUZART, J.L.R. Sintering unalloyed iron in abnormal glow discharge with superficial chromium enrichment, **Materials Science and Engineering A**, v. 392, p. 313-319, 2005.

PAVANATI, H.C.; LOURENÇO, J.M., MALISKA, A.M.; KLEIN, A.N.; MUZART, J.L.R. Ferrite stabilization induced by molybdenum enrichment in the surface of unalloyed iron sintered in an abnormal glow discharge, **Applied Surface Science**, v. 253, p. 9105-9111, 2007.

SANTOS, M.A.; SILVA, H.R.T., MALISKA, A.M., KLEIN, A.N., MUZART, J.L.R. Oil Removal and Nitriding of Sintered Parts Using a DC Discharge, **Surface and Coatings Technology**, v. 195, p. 198-203, 2005.

SHROEDER, R.; HAMMES, G.; BINDER, C.; KLEIN, A.N. Plasma debinding and sintering of metal injection moulded 17-4PH stainless steel. **Materials Research**, v. 14, p. 564-568, 2011.