

## NITRETAÇÃO A PLASMA DO AÇO AISI D2: UMA REVISÃO

Brunela Bonatto Milli<sup>1</sup>, Danielly Cristina Gripa<sup>2</sup>, George Simonelli<sup>3</sup>

1. Graduada em Engenharia Química pela Faculdade de Aracruz (brunelabonatto@hotmail.com), Aracruz – Brasil.
  2. Mestranda em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Instituto Federal do Espírito Santo (daniellycristinagripa@yahoo.com), Vitória – Brasil.
  3. Mestrando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Instituto Federal do Espírito Santo (ggsimonelli@gmail.com), Vitória – Brasil.
- Data de recebimento: 07/10/2011 - Data de aprovação: 14/11/2011**

### RESUMO

A nitretação a plasma consiste em um tratamento de endurecimento superficial, sob a ação de um ambiente nitrogenoso a uma temperatura determinada. A mesma resulta em melhorias nas propriedades mecânicas e tribológicas dos materiais. Após o processo de nitretação iônica, constata-se normalmente o aumento da resistência ao desgaste, à fadiga e à corrosão. Esta técnica é empregada para conferir melhor desempenho a ferramentas, biomateriais, componentes automotivos, e outros. Para o aço AISI D2, que é o aço ferramenta para trabalho a frio mais utilizado, a dureza superficial e a resistência ao desgaste microabrasivo são satisfatoriamente elevadas quando este material é nitretado a plasma.

**PALAVRAS-CHAVE:** Nitretação iônica, Tratamento, Superfície, Aço ferramenta D2.

### PLASMA NITRIDING AISI D2 STEEL: A REVIEW

#### ABSTRACT

The plasma nitriding is a surface hardening treatment, under the action of a nitrogen atmosphere at a given temperature. The same results in improvements in mechanical properties and tribological properties of materials. After the process of ion nitriding, contact is usually an increase in wear resistance, fatigue and corrosion. This technique is used to provide better performance tools, biomaterials, automotive components, and others. For the AISI D2 tool steel that is cold work longer used, the surface hardness and wear resistance microabrasivo are satisfactorily high when this material is plasma nitrided.

**KEYWORDS:** Ion Nitriding, Treatment, Surface, D2 tool steel.

### 1. INTRODUÇÃO

Para melhorar as propriedades tribológicas e triboquímicas dos materiais usava-se tradicionalmente o desenvolvimento de novos aços e ligas. Porém, fatores como tempo e custo tornam este caminho na maioria das vezes proibitivo. Em resposta a estes problemas surgiram diferentes formas de tratamento superficial (PINEDO, 2004).

No tratamento superficial, o emprego de diferentes técnicas permite melhorar as propriedades dos materiais metálicos convencionais, conferindo a estes

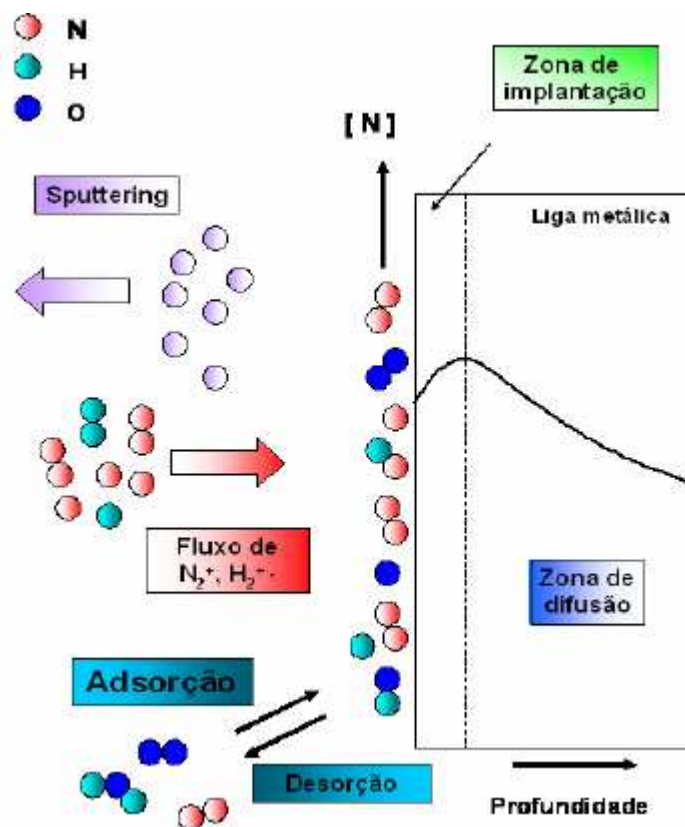
características especiais que não seriam obtidas somente com o metal base. Entre as rotas que podem ser usadas para que isso aconteça, podem ser citados os processos químicos, físicos, térmicos e mecânicos. No tratamento superficial de ligas metálicas a zincagem, galvanoplastia, cementação e nitretação gasosa têm sido substituídas por técnicas que usam feixes de íons, elétrons, deposição química e física de vapor, laser e plasma, que não empregam substâncias nocivas ao meio ambiente (GOBBI, 2009).

O processo conhecido como nitretação iônica, nitretação em descarga luminosa ou nitretação por plasma é uma forma de tratamento superficial que teve pouca utilização no passado, permanecendo assim, restrita aos ambientes acadêmicos por muitos anos, devido ao seu alto custo e dificuldades técnicas de equipamento e operação. Com a eliminação dos problemas, este processo tem se tornado cada vez mais empregado nas indústrias e na substituição de outros modos de nitretação (líquida e a gás) (VENDRAMIM, 2002).

De forma geral, para que a nitretação a plasma seja entendida, deve-se tratar do conjunto de fenômenos envolvidos nesta técnica, e do equipamento utilizado para que o processo aconteça.

### 1.1 Fenômenos Envolvidos na Interface Plasma/Superfície

A Figura 1 apresenta de maneira simplificada os fenômenos envolvidos na nitretação a plasma de um material.



**FIGURA 1** – Representação esquemática da nitretação a plasma  
**Fonte:** FIGUEROA (2006).

Conforme a Figura 1, na ocorrência da nitretação a plasma alguns mecanismos são observados. Entre eles, podem-se ressaltar o *sputtering* do ferro, a

condensação de nitretos, o impacto de íons moleculares, e também a penetração, absorção e difusão do nitrogênio.

Segundo o modelo de Kölbl para a nitretação a plasma, os átomos de ferro são arrancados da superfície do material (*sputtering*), por íons moleculares de nitrogênio ou partículas neutras energizadas que colidem com o material (EDENHOFER, 1974). Os átomos de ferro se combinam com as espécies ativas do plasma formando nitretos (FeN) que são depositados na superfície da peça (condensação de nitretos), formando assim, nitretos mais estáveis (Fe<sub>2</sub>N, Fe<sub>3</sub>N e Fe<sub>4</sub>N). Quanto ao nitrogênio atômico presente no plasma, parte do mesmo penetra na peça, sendo absorvido e difundido para o interior do material (EDENHOFER, 1974).

A absorção de nitrogênio não é completamente entendida por não se conhecer bem as espécies presentes no plasma. Isto dificulta a obtenção de expressões analíticas universais que descrevam o fenômeno de transporte de massa por plasma para a superfície da peça (catodo). A análise matemática do fenômeno também é prejudicada pela simultaneidade de eventos que ocorrem na interface plasma/superfície do material. O impacto dos íons durante a nitretação provoca uma série de reações, produzindo uma camada endurecida diferente da que o material possuía inicialmente. A interação dos íons com a superfície do material pode ser por vaporização (*sputtering*) de átomos, ejeção de elétrons secundários e introdução de defeitos cristalinos (FRANCO Jr., 2003). Segundo INAL et. al. 1989, citado por FRANCO Jr., 2003, o processo de vaporização proporciona uma limpeza na superfície do material e a introdução de defeitos cristalinos, acentuando a transferência de massa plasma/superfície.

Na nitretação o plasma é utilizado como meio de transporte do nitrogênio atômico, sendo este constituído de moléculas, átomos, íons e elétrons provenientes de uma mistura de gases (geralmente N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, dentro de uma câmara com pressão da ordem de 10<sup>-1</sup> mbar) (VENDRAMIM, 2002). O processo de nitretação envolve um complexo conjunto de fenômenos na interface sólido-plasma que dão origem às diferentes fases de nitretos de ferro, formando assim, camadas na superfície. Em função dos parâmetros de processo utilizados, a nitretação pode produzir duas zonas superficiais distintas: uma camada externa, e uma zona de difusão (vide Figura 8). A camada externa formada é denominada camada de compostos ou camada branca, devido apresentar a coloração branca quando observada por microscopia óptica. A mesma é constituída de uma ou duas fases de nitretos de ferro, e outros nitretos formados com elementos de liga. Abaixo da camada de compostos é possível observar a camada formada pela difusão de nitrogênio no aço. Esta camada é denominada zona de difusão, ou simplesmente camada de difusão (VENDRAMIM, 2002).

O plasma é obtido em um regime de descarga pulsada mediante aplicação de uma tensão elétrica da ordem de 300 a 1000 Volts entre a peça (catodo) e a parede interna da câmara (anodo). O processo necessita da pulsação da tensão elétrica para garantir a uniformidade do plasma e evitar a ocorrência de superaquecimento do aço em áreas específicas (regiões delgadas da peça, por exemplo). Em virtude dessa necessidade de se pulsar o plasma, o processo de nitretação iônica também é conhecido como nitretação a plasma pulsado. O aquecimento das peças à temperatura de nitretação para cada tipo de aço ocorre pelo bombardeamento de íons que se deslocam entre o anodo e o catodo, ou com o auxílio de resistências elétricas (VENDRAMIM, 2002).

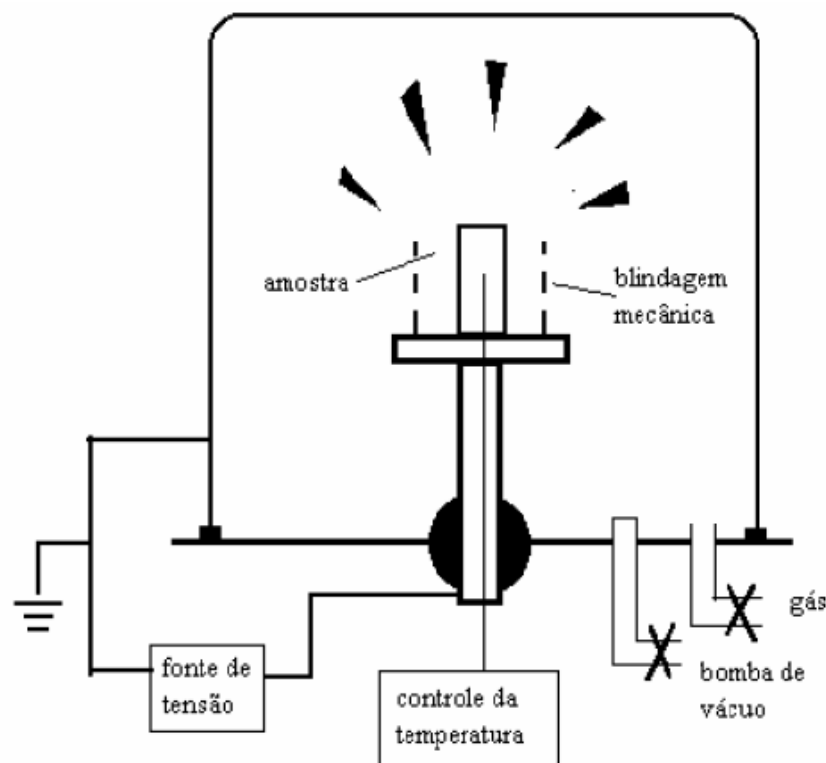
A nitretação por plasma pulsado proporciona a modificação das propriedades mecânicas da superfície do aço com a finalidade de aumentar a dureza superficial, reduzir o coeficiente de atrito, aumentar a resistência à fadiga, melhorar a resistência ao desgaste e à corrosão (BALLES, 2004).

Entre as possibilidades de aplicação da nitretação por plasma pode-se citar o uso em dispositivos opto-eletrônicos, isolantes térmicos, componentes automotivos, fabricação de ferramentas, biomaterias, peças sinterizadas, eixos, entre outras aplicações (BALLES, 2004).

O setor de fabricação de ferramentas é o usuário mais antigo e tradicional dos materiais modificados superficialmente (RANALLI et al., 2007). Aços ferramentas são aqueles que possuem como características elevada dureza, boa resistência à abrasão, corrosão e tenacidade. Além disso, eles mantêm as propriedades de resistência mecânica até mesmo em elevadas temperaturas. A maioria dos aços-ferramentas são forjados, mas também podem ser fabricados por fundição de precisão ou por metalurgia do pó. Esse tipo de aço pode ser usado em operações de conformação, corte, afiação, estampagem ou quaisquer outras atividades relacionadas com a modificação de um material (RANALLI et al., 2007).

## 1.2 Equipamento para nitretação a plasma

Na Figura 2, observa-se o esquema básico de um equipamento para nitretação iônica.



**FIGURA 2** – Esquema básico de um equipamento para nitretação iônica  
**Fonte:** ALVES Jr. (2011).

O equipamento usado na nitretação a plasma é constituído de um sistema de vácuo, uma fonte de potência e um reator. O sistema de vácuo deve atingir uma pressão em torno de  $10^{-2}$  Torricelli (torr) e possuir válvulas para o controle da vazão dos gases introduzidos para o tratamento. A fonte de potência possui uma saída

com voltagem máxima de aproximadamente 1500 Volts, e uma corrente capaz de fornecer energia à peça para que ela seja aquecida a uma temperatura entre 300 e 600° C. O reator é dotado de dois eletrodos onde o catodo também funciona como um suporte para a amostra (ALVES Jr., 2001). No reator devem existir saídas para medida da pressão, temperaturas e outras variáveis desejadas no controle do processo (ALVES Jr., 2001). Devem ter ainda entradas para a atmosfera nitretante, bomba de vácuo, e acessórios que sejam necessários à nitretação da amostra. Um vácuo de aproximadamente  $10^{-2}$  torr é produzido inicialmente no reator (ALVES Jr., 2001). Aplica-se uma diferença de potencial entre os eletrodos, cujo valor situa-se entre 400 e 1200 Volts, e então se introduz o gás nitretante (mistura de  $N_2-H_2$ ) no reator até que seja atingida a pressão de trabalho que deve estar na faixa de 1 a 20 torr (ALVES Jr., 2001).

Na nitretação por plasma, o controle sobre a metalurgia da camada nitretada é sem dúvida, o aspecto mais importante e vantajoso. A utilização de um sistema computadorizado permite introduzir de forma individual e precisa os gases de processo ( $H_2$  e  $N_2$  em geral) em frações volumétricas variadas, de modo a compor uma atmosfera gasosa específica para cada tipo de aço e aplicação desejada. Os parâmetros temperatura, tempo e composição do substrato também são aspectos importantes na formação da camada nitretada (PINEDO, 2004).

Outra vantagem da utilização da nitretação a plasma está ligada aos aços inoxidáveis. Os processos convencionais de nitretação possuem grande limitação para a aplicação em aços inoxidáveis, associada à presença do filme superficial passivo de óxido de cromo ( $Cr_2O_3$ ) (PINEDO, 2004). Quando a nitretação de aços inoxidáveis é realizada pelos processos convencionais, há a necessidade de se efetuar uma pré-operação de depassivação do material. Isto é realizado através de métodos químicos ou mecânicos, o que pode vir a comprometer o acabamento superficial da peça e não garante uma nitretação homogênea da superfície, já que a cinética de formação do filme passivo é elevada (PINEDO, 2004).

O uso do processo de nitretação por plasma é de particular interesse para os aços inoxidáveis, em virtude da possibilidade de eliminação do filme passivo, presente na superfície, por meio de um bombardeamento prévio sob um plasma de alta intensidade de hidrogênio puro (PINEDO, 2004). Como o processo ocorre a vácuo, a ausência de oxigênio impede a repassivação, e o bombardeamento iônico, ativa a superfície para a etapa posterior de nitretação, que se dá de forma homogênea em toda superfície (PINEDO, 2004). A nitretação a plasma é o único processo capaz de permitir a difusão do nitrogênio em condições cinéticas aceitáveis para os processos industriais realizados em torno de 400°C (PINEDO, 2004).

Na Figura 3 é apresentado um exemplo de peça submetida ao tratamento termoquímico de nitretação a plasma. Trata-se de um molde para injeção de alumínio nitretado e oxidado.



**FIGURA 3** - Molde para injeção de alumínio, nitretado e oxidado (magnetita).  
**Fonte:** UNICAMP (2011).

### **1.3 Considerações de custos**

Trata-se de uma tarefa complexa relacionar a valoração econômica de uma peça nitretada em relação a uma não nitretada, uma vez que a vida útil do material submetido a este tratamento termoquímico varia de acordo com o nível de resistência ao desgaste ao qual é solicitado (FRANCO Jr., 2011).

O que pode ser categoricamente afirmado, é que a redução dos gastos em manutenção das ferramentas chega a até 60%, proporcionando o aumento da produção em cerca de 50% entre dois intervalos de manutenção, devido a menos interrupções da operação (NITRION DO BRASIL, 2010). Por aumentar a resistência ao desgaste do material tratado, menor será o consumo de óleo lubrificante (chegando a cerca de 80%), reduzindo também, custos de descarte de peças e contribuindo paralelamente à proteção do meio ambiente (NITRION DO BRASIL, 2010).

Os custos da nitretação dependem basicamente do frete que será pago para as peças serem levadas até a empresa que realiza a nitretação, do peso da peça e do tempo de tratamento. Sendo que para diferentes materiais, o tempo de nitretação necessário para que a peça apresente boa resistência ao desgaste, varia de acordo com o tipo de material. Em geral, as empresas cobram por quilograma do material, para um determinado tempo de tratamento (FRANCO Jr., 2011).

No Brasil estão presentes 12 empresas no ramo de nitretação a plasma. São elas: Nitron do Brasil, Unitrat, Techniques Surfaces do Brasil, Nitramet, Coating Revestimentos Técnicos de Metais, Brasimet, Bosh, Mahle, Heat Tech, SDS Soluções Empresarial e Plasmanit (FRANCO Jr., 2011). Segundo BAUMVOL e FIGUEROA (2008), desde 1970 o número de plantas de nitretação por plasma em funcionamento no mundo tem crescido de forma linear, consolidando uma forte tendência de mudança tecnológica em favor da nitretação.

A seguir serão apresentadas as características do aço AISI D2, e destacadas informações relativas à nitretação iônica desse material, segundo o trabalho de alguns autores.

## **2. AÇO-FERRAMENTA AISI D2**

### **2.1 Características**

Entre os aços para trabalho a frio da série D, o aço AISI D2 é o mais utilizado. Este material tem sido amplamente empregado em decorrência da

combinação positiva entre resistência mecânica, dureza, e resistência ao desgaste (MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO, 2011).

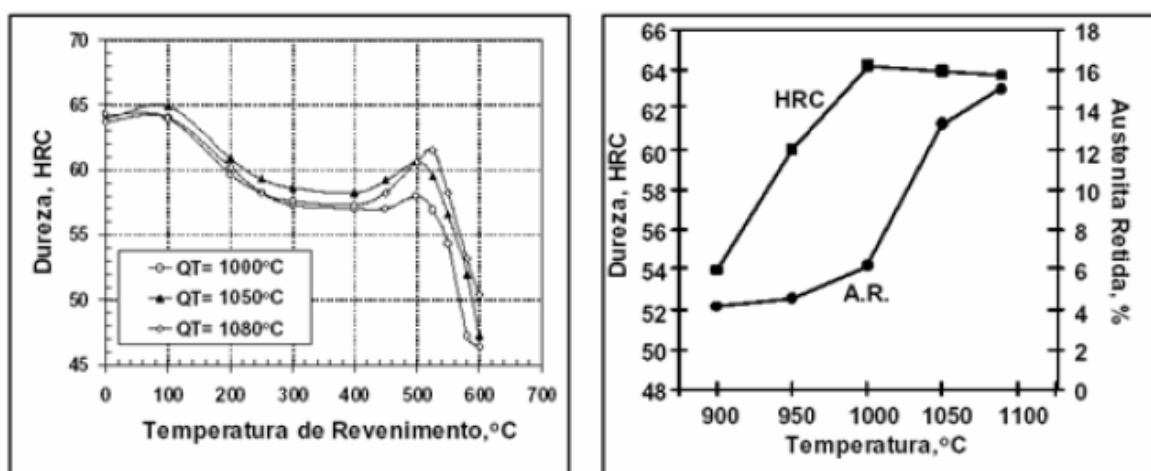
Em geral, os aços da série D são empregados em matrizes de corte, estampagem, embutimento, em pentes para laminação de roscas, punções, calibres, mandris, lâminas para corte a frio e feiras para trefilação (SILVA & MEI, 2006).

O alto teor de cromo e de carbono nos aços da série D proporciona elevada resistência ao desgaste a estes materiais. Isto acontece em virtude da presença de carbonetos de cromo, e baixíssima distorção no tratamento térmico (SILVA; MEI, 2006). Entretanto, a tenacidade destes aços é fortemente dependente da distribuição dos carbonetos eutéticos do tipo  $M_7C_3$  (MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO, 2011). Esta dependência é de particular importância à medida que a dimensão do material de partida deve ser adequada à dimensão final da ferramenta, principalmente quando a matéria-prima é proveniente de material cortado em distribuidores (MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO, 2011).

O aço AISI D2 é aplicado em matrizes para estampagem, cunhagem e repuxo, rolos e pentes laminadores de roscas, centros para tornos, punções e calibres (VILLARES METALS, 2003).

A estrutura do aço AISI D2, assim como de todos os aços ferramenta para trabalho a frio, consiste em uma matriz de martensita revenida contendo dispersão de carbonetos complexos. Embora as propriedades mecânicas se apresentem como um fator relevante nestes materiais, as propriedades tribológicas são as mais estudadas, porque em suas aplicações estes materiais sempre sofrem constantes solicitações de desgaste (GOBBI, 2009).

Após serem confeccionadas, as ferramentas produzidas com o aço AISI D2 devem ser revenidas imediatamente após a têmpera, tão logo atinjam 60°C. É necessário que sejam feitos no mínimo dois revenimentos, e entre eles, as peças devem ser resfriadas lentamente até a temperatura ambiente. A temperatura para realização do revenimento tem que ser escolhida conforme a dureza desejada, ou tratamento subsequente (Figura 4). Cada revenimento deve ser de no mínimo 2 horas, e para peças que possuam mais que 70 mm, o tempo deve ser calculado em função de sua dimensão, de modo que em geral considera-se uma hora para cada polegada de espessura (GOBBI, 2009).



**FIGURA 4** - Têmpera e revenimento para um aço AISI D2.

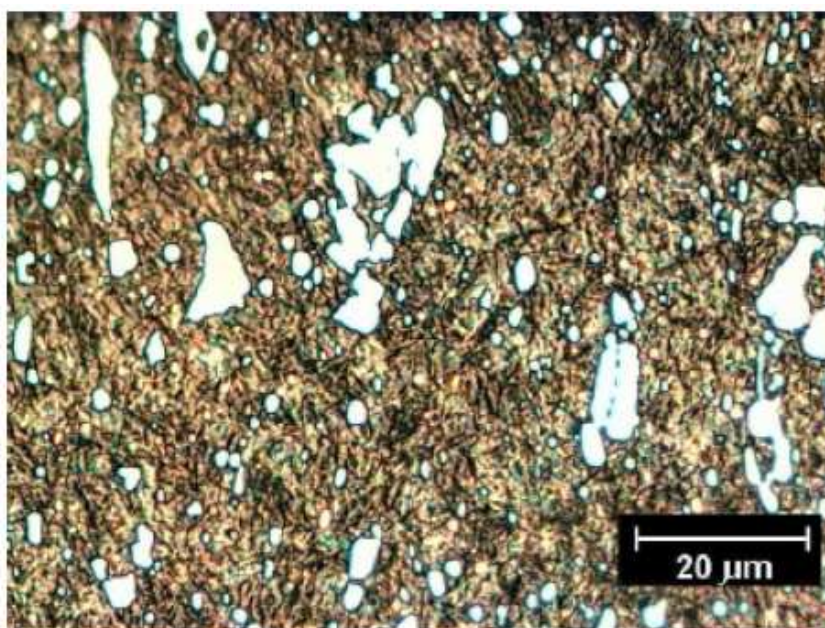
Fonte: MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO (2011).

O aço AISI D2, por ser um aço hipereutetóide, possui a resposta ao tratamento térmico influenciado pelas condições de austenitização que definirão a quantidade de carbono, de elementos de liga dissolvidos na austenita e presentes na forma de carbonetos. Além, evidentemente, do tamanho de grão austenítico (VALADÃO, 2008). Desse modo, a temperabilidade, a quantidade de austenita retida e o comportamento no revenimento são fundamentalmente modificados pelos parâmetros de austenitização. Estes aspectos interferem conseqüentemente nas propriedades da ferramenta (VALADÃO, 2008).

Este aço, fornecido no estado recozido possui dureza máxima de 255 HB. Através da adição de molibdênio (Mo) e vanádio (V) na ordem de 1,0%, melhora-se a resposta deste material ao revenimento (VALADÃO, 2008). Sua sequência de solidificação tem início com a formação da austenita ( $\gamma$ ), com o líquido sofrendo uma reação eutética ( $\gamma + M_7C_3$ ). No aço AISI D2, os carbonetos eutéticos são os responsáveis pela elevada resistência ao desgaste (VALADÃO, 2008).

Na Figura 5 é apresentada a microestrutura do aço ferramenta D2 após austenitização, têmpera e duplo revenimento.

Por meio da Figura 5, nota-se a martensita revenida e os carbonetos  $M_7C_3$  provenientes do tratamento empregado (FRANCO Jr., 2003).



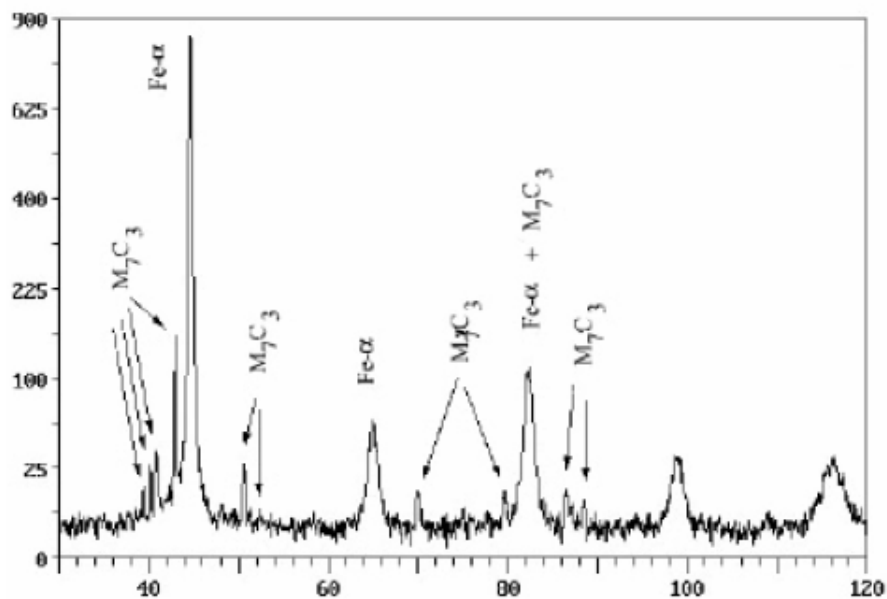
**FIGURA 5** - Aço ferramenta D2 austenitizado a 1080°C, resfriado em óleo e duplo revenido a 540°C. Martensita revenida e carbonetos  $M_7C_3$ . Dureza: 58 HRC (seção transversal). Aumento: 1000X (seção longitudinal).

**Fonte:** FRANCO Jr. (2003).

A Figura 6 é referente à difração de raios X do aço ferramenta D2 após ser austenitizado, temperado e revenido duas vezes.

Na Figura, são observadas reflexões que indicam a presença de carbonetos  $M_7C_3$ , e da martensita revenida ( $Fe-\alpha$ ). Não ficaram evidenciados os picos da austenita retida devido sua fração volumétrica estar abaixo da quantidade detectável na técnica de difração (FRANCO Jr., 2003).





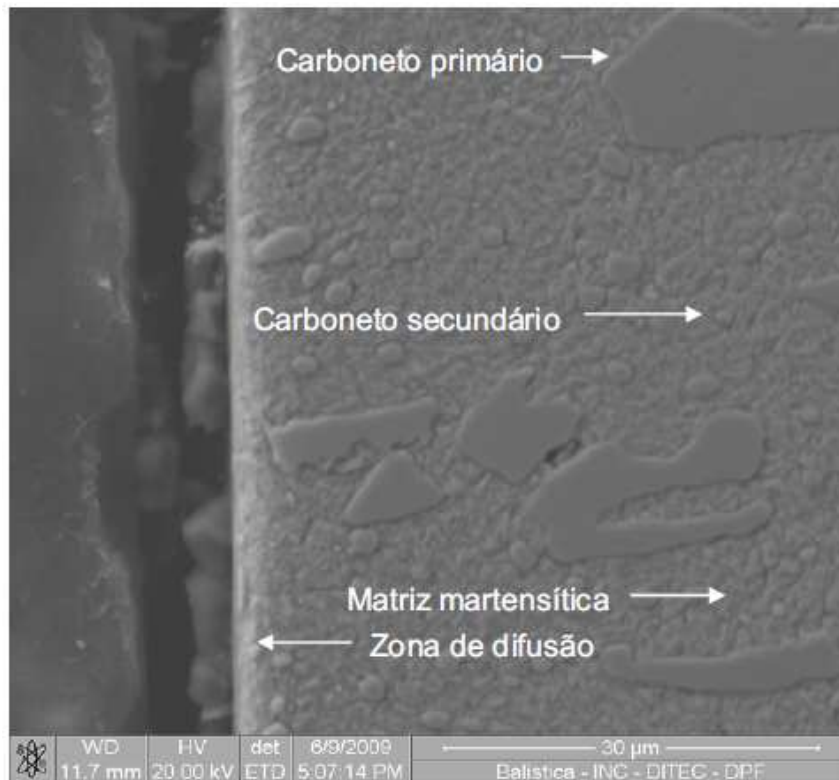
**FIGURA 6** - Difratograma para o aço D2 austenitizado a 1080°C, resfriado em óleo e duplo revenido a 540°C.  
**Fonte:** FRANCO Jr. (2003).

Na utilização de aços ferramenta, o desgaste é um dos fatores mais significativos que conduz ao fim da vida útil do material. Portanto, a durabilidade de uma ferramenta e sua integridade depende principalmente das propriedades mecânicas da sua superfície. Neste sentido, a nitretação a plasma é um dos processos utilizados para aumentar a durabilidade de ferramentas.

## 2.2 Nitretação a plasma

GOBBI (2009) estudou a influência do tempo de nitretação na formação da camada nitretada, e na resistência ao desgaste microabrasivo do aço ferramenta AISI D2. No estudo, os corpos de prova foram nitretados a 400°C com uma pressão de 4,5 mbar (450 Pa), e utilizando-se uma mistura gasosa de 80% em volume de H<sub>2</sub> e 20% de N<sub>2</sub>. Os tempos de tratamento empregados foram de 30, 60, 120, 180 e 360 minutos.

Os resultados do trabalho mostraram que para todos os tempos de tratamento foi possível obter o endurecimento superficial e o aumento na resistência ao desgaste microabrasivo (GOBBI, 2009). De acordo com a pesquisa, o melhor resultado, para a nitretação a 400°C, foi obtido com o tempo de tratamento de 360 minutos (Figura 7). Neste caso, o aumento de dureza superficial alcançado foi de 94,6%, e a resistência ao desgaste microabrasivo de 15%. Este resultado foi explicado pelo autor em termos da alta concentração de nitrogênio na rede cristalina do ferro-α que proporciona maior distorção do reticulando dificultando o movimento de discordâncias e formação adicional de nitretos (GOBBI, 2009).



**FIGURA 7** - Microestrutura obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura, de amostra nitretada do aço ferramenta AISI D2 temperado e revenido em função do tempo de nitretação (360 minutos). Ataque: nital 2%. Aumento: 4000X.

**Fonte:** GOBBI (2009).

VALADÃO (2008) em seu estudo, nitretou a plasma amostras do aço ferramenta AISI D2 em gaiola catódica, em atmosfera de 80% de  $N_2$  e 20% de  $H_2$ , utilizando pressão de 2,5 mbar, e temperaturas de 400 e 480°C, por tempos de 3 a 4 horas, com o objetivo de avaliar o desempenho em ferramenta de corte.

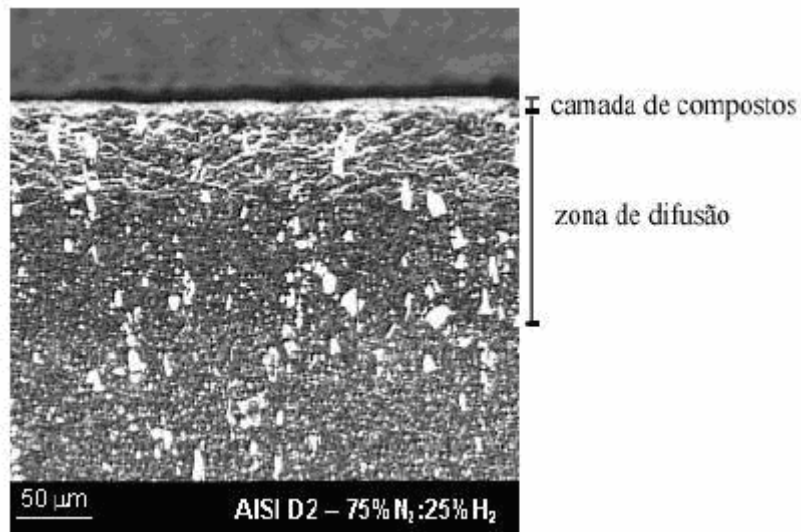
As amostras temperadas e revenidas apresentaram níveis de dureza de aproximadamente 600 Vickers (HV). Após o tratamento de nitretação na temperatura de 480°C durante 3 horas, (que foi a melhor condição de tratamento), as amostras apresentaram dureza superficial de 1110 HV (VALADÃO, 2008).

O uso de gaiola catódica no trabalho de VALADÃO (2008) buscou corrigir os efeitos indesejáveis que ocorrem na nitretação a plasma de peças com geometria complexa. São eles: o efeito de borda, efeito de cátodo oco nos furos e reentrâncias das peças, temperatura não uniforme e abertura de arcos (SOUSA, 2008).

FRANCO Jr. (2003), ao nitretar o aço AISI D2 com 5, 10 e 20% de nitrogênio por 42 minutos, 3, 6 e 11 horas, constatou que com o aumento da porcentagem de nitrogênio na mistura  $N_2/H_2$ , a dureza máxima é atingida em curto intervalo de tempo. Isto aumenta também a cinética de engrossamento de nitreto de cromo e de formação da camada branca.

A Figura 8 permite a visualização da zona de difusão na micrografia da amostra nitretada do aço AISI D2.

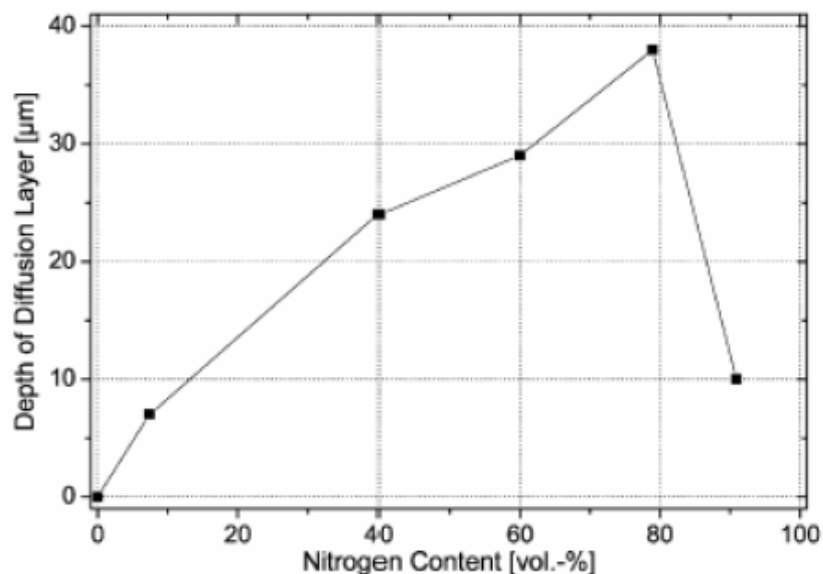
Pela comparação das Figuras 5 e 8 é possível constatar que fora da zona de difusão a microestrutura é a mesma da amostra não nitretada (VALADÃO, 2008).



**FIGURA 8** - Camada nitretada de um aço ferramenta AISI D2 nitretado por 10 horas, com 75% de  $N_2$ , a  $520^\circ C$  (Microestrutura obtida por microscopia óptica).

Fonte: PINEDO; FRANCO Jr.; TSCHIPTCHIN (2002).

A Figura 9 apresenta a espessura da camada nitretada do aço AISI D2 em função da razão  $N_2/H_2$ .



**FIGURA 9** - Espessura da zona de difusão em função do conteúdo de nitrogênio.

Fonte: STOIBER et al. (2003).

Observa-se na Figura 9, que a espessura da zona de difusão aumenta quando o teor de nitrogênio é elevado na mistura nitretante até o valor de 80% de  $N_2$ , em seguida, a espessura da camada decresce quando o teor de nitrogênio aumenta de 80 para 100%.

Por fim, tendo em vista a revisão dos resultados dos principais autores que trabalharam com a nitretação a plasma do aço AISI D2, observou-se a eficácia deste tratamento de superfície na melhoria das propriedades tribológicas deste material.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A nitretação possibilita tratar a superfície dos metais, conferindo a eles novas propriedades. No caso da nitretação a plasma, a técnica representa uma nova alternativa aos processos convencionais de tratamento de superfície.

Para o aço AISI D2, segundo os trabalhos de FRANCO Jr. (2003), VALADÃO (2008) e GOBBI (2009), a dureza superficial e a resistência ao desgaste microabrasivo são satisfatoriamente elevadas quando este aço ferramenta é nitretado a plasma.

Quando este material é fornecido no estado recozido, o mesmo deve ser submetido à têmpera e revenimento antes da realização do tratamento termoquímico de nitretação.

### REFERÊNCIAS

ALVES JR., C. **Nitretação a plasma: Fundamentos e Aplicações**. Natal/RN: Brasil, 2001.

BALLES, A. C. **Nitretação a Plasma como Meio Alternativo ou Complementar à Oxidação Negra na Proteção à Corrosão do Aço de Baixo Teor de Carbono**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

BAUMVOL, I. J. R.; FIGUEROA, C. A. **Revestimentos Protetores de Aços Obtidos por Plasma: Comparações com as Técnicas Convencionais e Aplicações**. Workshop em Revestimentos Protetores. Universidade de Caxias do Sul, 19 jun. 2008.

EDENHOFER, B. Physical and metallurgical aspects of ion nitriding – Part 1. **Heat Treatment of Metals**, v. 1, p. 23-28, 1974.

FIGUEROA, C.A. **Nitretação de metais a plasma: princípios, comparações com as técnicas convencionais e aplicações**. UCS-RGS, 2006.

FRANCO Jr, A. R. **Considerações sobre nitretação a plasma**. 2011. Professor Doutor do Instituto Federal do Espírito Santo, com Tese em nitretação a plasma. Entrevista concedida a George Simonelli, Vitória, 10 nov. 2011.

FRANCO Jr., A. R. **Obtenção de revestimentos duplex por nitretação a plasma e PVD-TiN em aços ferramenta AISI D2 e AISI H13**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal São Paulo, São Paulo, 2003.

GOBBI, V. J. **Influência da nitretação a plasma na resistência ao desgaste microabrasivo do aço ferramenta AISI D2**. Dissertação de mestrado em Ciências Mecânicas. Brasília/DF, 2009.

INAL, O. T. et. al. **A review of plasma modification: Process, Parameters and Microstructural Characterization**. In: 2<sup>nd</sup> International Conference on Ion Nitriding/Carburizing. Proceedings. ASM International, pp. 57-66, Cincinnati, Ohio EUA, 18-20 setembro 1989.

MEDANHA, A; GOLDENSTEIN, H; PINEDO, C.E. **Tratamentos Térmicos do Aço Ferramenta AISI D2 para Conformação e Corte.** Disponível em: <[http://www.heattech.com.br/publicacoes/2005\\_-\\_Conf\\_Corte\\_Trabalho\\_Final\\_AISI\\_D2.pdf](http://www.heattech.com.br/publicacoes/2005_-_Conf_Corte_Trabalho_Final_AISI_D2.pdf)>. Acesso em: 01 ago. 2011.

NITRION DO BRASIL. **Nitretação a plasma – tratamento térmico.** 29 set. 2010. Disponível em: <<http://nitriondobrasil.blogspot.com/2010/09/nitretacao-plasma-tratamento-termico.html>>. Acesso em 08 nov. 2011.

PINEDO, C. E. **Tratamentos superficiais para aplicações tribológicas.** Caderno técnico Metalurgia & Materiais. Abril de 2004.

PINEDO, C.E.; TSCHIPTCHIN, A.P.; FRANCO Jr., A.R. **Influência da composição gasosa na rugosidade de aços ferramenta nitretados por plasma.** In: 57º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM). São Paulo/SP, 22 a 25 de Julho, Anais em CD-ROM, (2002), p. 1993 – 1999.

RANALLI, G. A. et. al. **Avaliação do aço H10 nitretados em banhos de sal e a plasma.** 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. 23 a 25 de outubro de 2007.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais.** 2 . ed. Revisada e Ampliada. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

SOUSA, R. M. et. al. **Nitretação em gaiola catódica: influência do tempo de tratamento.** Revista Matéria, v. 13, n. 1, pp. 119 – 124, 2008.

STOIBER, M. et. al. **Surface and coating technology.** 174, 687 (2003).

UNICAMP. **Nitretação a plasma.** Disponível em: <[http://www.ifi.unicamp.br/~alvarez/Plasma-LIITS/introducao\\_a\\_nitretacao.htm](http://www.ifi.unicamp.br/~alvarez/Plasma-LIITS/introducao_a_nitretacao.htm)>. Acesso em: 08 nov. 2011.

VALADÃO, M. C. **Avaliação do desempenho do aço AISI D2 tratado termicamente e nitretado em plasma com gaiola catódica visando aplicação industrial. Dissertação de mestrado.** Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Natal, agosto de 2008.

VENDRAMIM, J.C. **Influência da nitretação na resistência a fadiga por flexão rotativa de molas para válvulas automotivas.** Faculdade de Engenharia Mecânica Unicamp. Dissertação de mestrado, 2002.

VILLARES METALS. **Aços para trabalho a frio.** Jul. 2003. Disponível em: <[http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT\\_13\\_VD2.pdf](http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_13_VD2.pdf)>. Acesso em: 08 nov. 2011.