

# A MODIFICAÇÃO DE SUPERFÍCIES DE LIGAS FERROSAS PELO PROCESSO DE NITRETAÇÃO IÔNICA, ou NITRETAÇÃO A PLASMA

Vendramim, J.C. <sup>(1)</sup>

(1) Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Campinas – UNICAMP – sócio do empreendimento Isoflama < [vendramim@isoflama.com.br](mailto:vendramim@isoflama.com.br) >

## Breve História

A técnica da nitretação iônica foi patenteada por J.J.Egan em 1931,EUA; e por Berghaus, em 1932, Suíça. Essa técnica recebe denominações diversas, tais como nitretação iônica (“íon nitriding”, “nitriding ionic”, “ionitriding”), nitretação em descarga luminescente (“glow discharge nitriding”), ou nitretação por plasma (“plasma nitriding”, “nitriding in plasma”), e, ou, mais recentemente, nitretação por plasma pulsado (“pulsed plasma nitriding”) [1].

A nitretação iônica teve pouca utilização no passado, permanecendo restrita aos ambientes acadêmicos por muitos anos, devido ao seu alto custo e dificuldades técnicas de equipamento e operação. Essas dificuldades consistiam basicamente em superaquecimento de partes das peças e abertura de arcos durante a nitretação das peças. Esses problemas foram eliminados a partir do final da década de 70 com o surgimento da eletrônica e microeletrônica que introduziu o aquecimento auxiliar e a operação com fonte de tensão pulsante controlados por microcomputadores [2]. A fonte de tensão pulsante tornou possível variar a temperatura do processo apenas com a alteração do intervalo entre os pulsos, deixando constantes os demais parâmetros como a tensão e a pressão. E a partir disso a nitretação iônica, ou nitretação a plasma, além de objeto de pesquisa nas universidades com o desenvolvimento de vários modelos para explicar a cinética do processo,

[Digite texto]

experimentou grande expansão na sua utilização pela indústria e, conseqüentemente, está gradualmente substituindo os processos convencionais de nitretação, tais como a nitretação líquida (banho de sal fundido - Tenifer®) e a nitretação com gás (amônia dissociada – NH<sub>3</sub>), processos considerados parcialmente controláveis e poluidores.

No Brasil, pesquisas em processos e construção de reatores de fontes pulsadas têm sido contemplados nos projetos de mestrado e doutorado das universidades. Podem-se citar, por exemplo, alguns pesquisadores brasileiros pioneiros no estudo da tecnologia de nitretação iônica, ou plasma, tais como o Prof. Clodomiro da Universidade Federal do Rio Grande do Norte que construiu o primeiro reator de fonte pulsada na Universidade Federal de São Carlos, o Prof. Casteletti da USP-São Carlos, SP, e outros da Universidade Federal de Santa Catarina e Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Enfim, todos envolvidos e comprometidos em estudar e dominar a técnica da nitretação iônica que é considerada ambientalmente amigável devido ao menor consumo de energia elétrica e a não geração de resíduos. Além disso, e principalmente, devido permitir o controle de processo e a reprodução da mesma morfologia de camada nitretada, sendo esta uma exigência fundamental na aplicação para componentes automotivos, aeronáuticos e ferramentas do setor metal-mecânico (*matrizes e moldes para injeção de plástico e alumínio; conformação a frio e a quente; e ferramentas de corte*).

## **Equipamento e Processo**

Nitretação é o nome genérico utilizado nas técnicas de modificação das propriedades mecânicas da superfície do aço mediante a difusão de átomos de nitrogênio que combina com o ferro e outros elementos químicos do aço para: a) incrementar a dureza superficial; b) reduzir o coeficiente de atrito; c) incrementar a resistência a fadiga em alto ciclo; d) melhorar a resistência ao desgaste; e f) aumentar a resistência a corrosão [3]. A nitretação iônica utiliza o plasma como meio de transporte do nitrogênio atômico sendo este constituído de moléculas, átomos, íons e elétrons formados de uma mistura de gases, geralmente N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>, dentro de uma câmara a baixa pressão – da ordem

[Digite texto]

de  $10^{-1}$  mbar. O plasma é obtido num regime de descarga anormal (“*glow discharge*”) mediante aplicação de uma tensão elétrica da ordem de 300 a 1000 [V] entre a peça (cátodo) e a parede interna da câmara (ânodo). O processo tem necessidade de se “*pulsar*” a tensão [V] para garantir a uniformidade do plasma e evitar a ocorrência de sobreaquecimento do aço em áreas específicas (regiões delgadas da peça, por exemplo). Em virtude dessa necessidade de se pulsar o plasma, como citado anteriormente, o processo de nitretação iônica também é conhecido como “*nitretação a plasma*”, ou “*nitretação de plasma pulsado*”.

O aquecimento das peças à temperatura interessante de nitretação para cada tipo de aço ocorre pelo bombardeamento dos íons que se deslocam entre o ânodo e o cátodo. Esse aquecimento também pode ocorrer com o auxílio de resistências elétricas. O processo de nitretação iônica envolve um complexo conjunto de fenômenos na interface sólido-plasma que dão origem às diferentes fases de nitretos de ferro formando camadas na superfície. Em função dos parâmetros de processo utilizados, a nitretação pode produzir duas camadas, ou zonas superficiais distintas: uma camada externa, constituída de uma, ou duas fases de nitretos de ferro – ferro  $\gamma'$   $\text{Fe}_4\text{N}$  e, ou ferro  $\epsilon$   $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$  – e outros nitretos formados com os elementos de liga presentes. Essa camada mais externa é denominada de “*camada de compostos*”, ou “*camada branca*” devido se apresentar com a coloração branca quando observada por microscopia óptica depois de superfície adequadamente preparada no laboratório metalográfico e atacada com reagente químico (“nital” 3 a 5% – ácido nítrico diluído em álcool). Abaixo da camada de compostos tem-se a camada formada pela difusão de nitrogênio no aço e denominada zona de difusão, ou simplesmente, “*camada de difusão*”.

Os complexos fenômenos da nitretação iônica, resumidamente, são mostrados Figura 1.

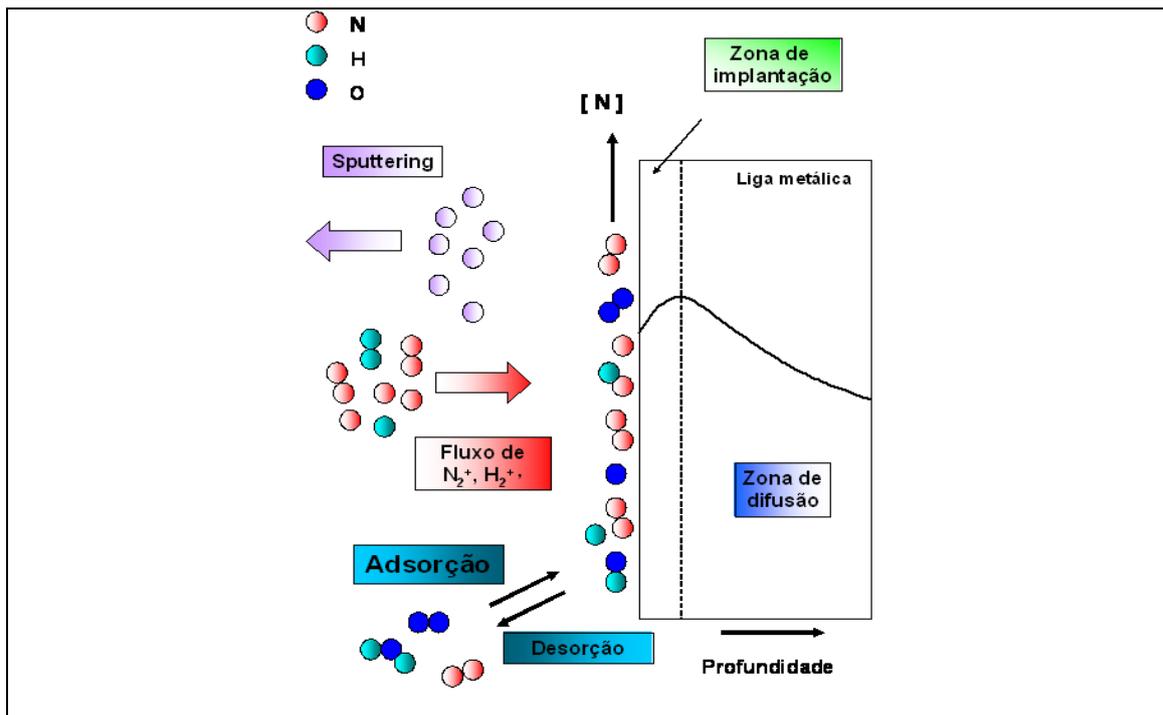


Figura 1 – Modelo para mecanismo da nitretação de aços por plasma [4]

A Nitretação Iônica utiliza os seguintes gases no processo: a) Nitrogênio –  $N_2$ ; b) Hidrogênio –  $H_2$ ; c) Metano –  $CH_4$ ; e d) Óxido nítrico –  $N_2O$  ; ou  $CO_2$  (eventualmente utilizado). A nitretação iônica tem a versatilidade de poder ser conduzida numa ampla faixa de temperatura desde 150 até 650 °C.

O processo de nitretação é dependente do tempo à temperatura, da temperatura e da composição química do aço. No processo de nitretação iônica a participação de cada gás, principalmente o hidrogênio e o nitrogênio, na mistura condiciona o tipo final de camada que se pretende formar. O gás  $N_2O$ , no caso da tecnologia Plateg®, é utilizado somente no final do processo e nas situações de peças, ou ferramentas, em que se deseja obter a oxidação da superfície nitretada para melhorar a resistência a corrosão e, ou, para atender a aspectos estéticos (superfície preta).

A Figura 2 é uma representação esquemática do forno de nitretação iônica.

[Digite texto]

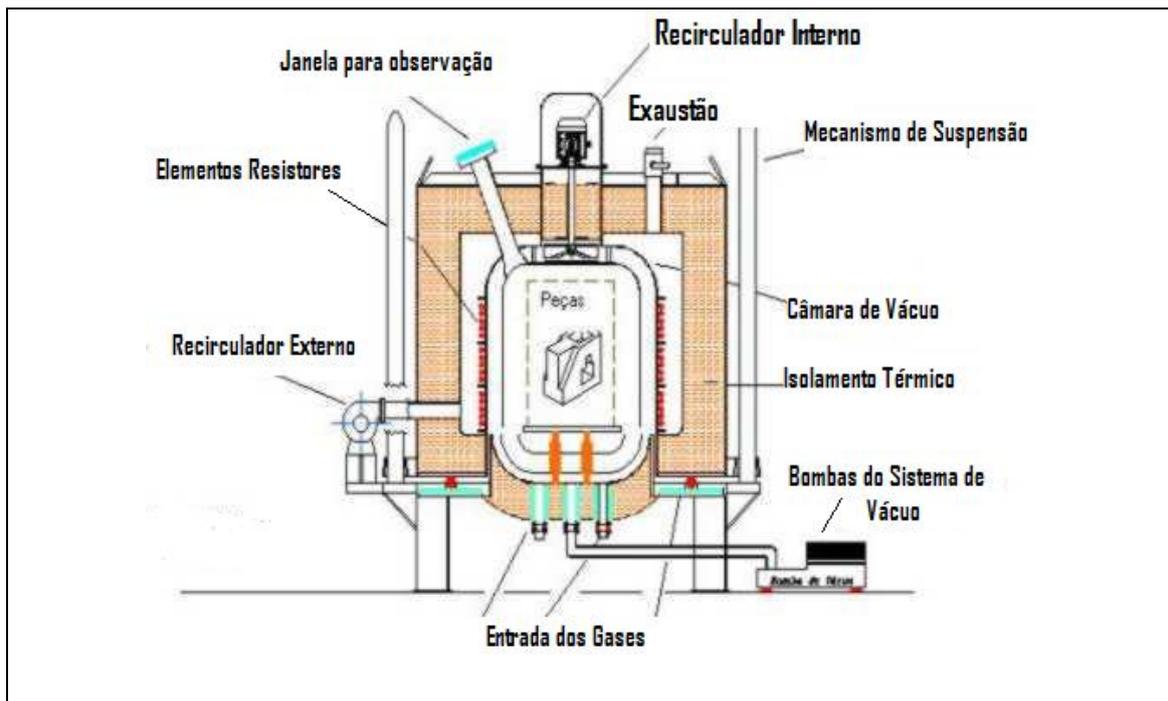


Figura 2. – Representação esquemática do forno de nitretação iônica, ou plasma pulsado

O equipamento Plateg® é um forno de parede quente, aquecido por resistências elétricas isoladas termicamente com cerâmica prensada e invólucro de aço inox. O vaso se ergue mediante um mecanismo de suspensão motorizado (*“lifting”*) para permitir a carga e a descarga do material, sem necessidade de remoção dos cabos e mangueiras externas. O aquecimento é obtido por resistências distribuídas ao longo da parede lateral do vaso, as quais estão divididas em 3 setores de forma a possibilitar uniformidade e controle de temperatura nas peças nitretadas, com uma potência elétrica de aquecimento de até 45 KVA. A temperatura é monitorada por 3 termopares de *Fé / Constantan*, isolados eletricamente até 2KV.

A retorta de vácuo é integralmente construída com aço inox refratário e solda especial, testada com He, apresentando um vazamento < 0,5 Pa l/s. O vácuo final <math>10^{-3}</math> torr à temperatura ambiente e <math>10^{-2}</math> torr a 500 °C. A flange inferior, com canal para vedação com *“o-ring”* de Viton, completa a retorta de vácuo. A flange, também construída em aço inoxidável, contém os passantes elétricos, para vácuo, controle, etc., refrigerados por água mediante um circuito

[Digite texto]

hidráulico fechado pressurizado. A atmosfera ( $H_2 + N_2$ ) dentro do forno durante o processo de nitretação é comandado eletronicamente mediante controladores de fluxo de massa enquanto a pressão de trabalho controlada via válvula “borboleta” localizada à saída do sistema (“*down stream control*”).

A fonte de tensão pulsada que gera o plasma, construída com componentes semicondutores de potência de última geração apresenta as seguintes principais características:

- Tensão e corrente de pulso ajustável
- Densidade de corrente constante
- Duração do pulso ajustável
- Duração do tempo entre pulsos ajustável
- Estabilidade de corrente para permitir perfeita uniformidade do plasma sobre as peças
- Controle da fonte de plasma por “*controlador lógico programável*”

A Figura 3 apresenta o aspecto do plasma de nitretação para algumas peças dentro do forno formado com uma mistura de gases hidrogênio e nitrogênio na proporção 60-40, respectivamente, à temperatura de 500 °C. O plasma foi observado e fotografado através de uma “*janela de observação*” (vide Figura 2). A área violeta em torno da superfície das peças é a imagem mais conhecida que se tem para o plasma.



Figura 3 – Imagem do plasma no interior do forno de nitretação iônica. Fonte Plateg®

O equipamento **PLATEG®** é uma planta integrada de nitretação por plasma pulsado em forno à vácuo. O sistema opera como uma unidade autônoma controlada por PLC (Controlador Lógico Programável) e supervisionada desde um PC usando uma interfase gráfica. O sistema de controle permite definir os parâmetros do processo, supervisionar a operação, armazenar programas completos de processo (receitas) e emitir relatórios (tabelas e gráficos) das diversas variáveis do ciclo térmico e de implantação.

A Figura 4 mostra o forno de nitretação iônica adquirido à Plateg® pela Isoflama e que será utilizado para a prestação de serviços de nitretação iônica à indústria brasileira.



Figura 4 – Forno de nitretação iônica Plateg® da Isoflama Ind.Com.Equip.Ltda

As principais características do equipamento **PLATEG®** da Isoflama:

- Forno vertical tipo “campânula”, com levantador giratório motorizado;
- Dimensões úteis: 900 x 1600 mm;
- Mínima e máxima temperatura de processo: 150 - 650 °C;
- Máximo desvio de temperatura na região de trabalho: +- 3 °C (temporal e espacial);
- Carga máxima: 2.000 kg;
- Potência máxima de plasma: 108 KVA;
- Corrente máxima de pulso: 120 A;
- Tensão máxima de pulso: 900 V;
- Sistema de vácuo composto por bombas mecânicas de duplo estágio e tipo “root”;
- Circuito fechado de refrigeração por água;

[Digite texto]

- “*Down Stream Control*” da pressão do forno;
- Controle da vazão dos gases mediante “*mass flowmeter controllers*”

Algumas das vantagens do processo de nitretação iônica podem ser sumarizadas como segue:

- Baixa temperatura de processo

A realização do processo em temperaturas de até 150 °C permite manter a dureza do núcleo do aço revenido a temperaturas baixas.

- Controle da camada

Permite o controle da estrutura da camada. Com facilidade, pode-se produzir uma fina e tenaz camada monofásica de nitreto  $\gamma'$ - Fe<sub>4</sub>N (~1 a 5  $\mu\text{m}$  de espessura), ou uma espessa camada (~1 a 25  $\mu\text{m}$ ) monofásica de nitreto  $\epsilon$  – Fe<sub>2,3</sub>N, sendo estes selecionados em função da aplicação da peça. Ou então, não formar essa “camada de compostos”, mas tão somente a camada de difusão.

- Tempo de nitretação

O tempo efetivo de nitretação é inferior aos processos convencionais. Por exemplo, uma camada nitretada no processo de nitretação a gás à mesma temperatura e tempo de 50 horas é obtida com a metade deste tempo na nitretação iônica.

- Proteção de áreas da peça

Partes da peça podem ser protegidas com máscara metálica – com folhas finas de aço ou materiais cerâmicos, por exemplo - contra a nitretação. Deve-se evitar a utilização de revestimento a base de estanho e cobre.

- Uniformidade de espessura de camada

[Digite texto]

O plasma é uniforme em toda a extensão da superfície da peça e, por conseguinte, a espessura de camada formada também é extremamente uniforme.

- Nitretação de ligas ferrosas especiais

Os processos convencionais têm problemas para nitretar aços do tipo inoxidável (caso da nitretação a gás) e ferro sinterizado (caso do gás e da nitretação líquida). A nitretação iônica nitreta muito bem os aços da linha inoxidável – austeníticos e martensíticos – e também os ferro sinterizados. No caso do ferro sinterizado a nitretação efetivamente ocorre somente na superfície, evitando alterações dimensionais significativas e não depende da densidade deste.

- Economia

Na nitretação iônica o custo da energia e do gás consumidos é menor que nos processos convencionais devido operação com baixa pressão (1 a 20 Torr) e fluxo contínuo baixo de gás. O aquecimento é realizado por resistências auxiliares e pelo plasma diretamente sobre as peças, não tendo necessidade de se aquecer paredes refratárias. A baixa transferência de calor por condução e convecção resulta em maior rendimento do aquecimento por plasma.

Não se poderia deixar de comentar que, obviamente, também existem limitações da nitretação iônica. Algumas limitações são vantagens sob alguns aspectos, outras nem tanto, e estão sumarizadas a seguir:

- Efeito em “Catodo Ôco”

Efeito que ocorre em peças de geometria complexa [4] baseado no aumento da densidade do plasma em algumas regiões de pequenos furos, concavidades, que leva a um aumento da concentração de elétrons secundários e, em consequência, aquecimento indesejável e localizado da peça. As tecnologias atuais adotaram recursos operacionais (fonte pulsante, entre outros) para evitar a ocorrência desse efeito e, portanto, eliminando esse tipo de ocorrência.

[Digite texto]

- Penetração do plasma em pequenos furos

Existiria um limite de diâmetro de furos abaixo do qual o plasma não penetraria. Esse limite seria, aproximadamente, duas vezes a largura da bainha catódica [5]. Atualmente, essa situação está superada e se consegue nitretar furos, ou cavidade à maiores profundidades.

- Limpeza e Montagem de carga

A operação de limpeza das peças é fundamental para evitar contaminação do forno. A montagem de carga no forno de nitretação iônica é uma operação manual e “delicada”, o que demanda tempo para a execução. Além disso, exige dispositivos para apoio das peças e cuidados especiais na disposição das peças.

Essas seriam, enfim, as principais limitações que se poderia citar para o processo de nitretação iônica.

### **A Metalurgia da Nitretação Iônica**

A nitretação iônica utiliza os gases  $H_2$ ,  $N_2$  que sob uma tensão em volts provoca a “quebra” das moléculas, ou seja, ionizadas, conforme mostrados na Figura 1 e descritas a seguir:

- $H_2 \rightarrow 2 [H]$
- $N_2 \rightarrow 2 [N]$

A molécula hidrogênio é utilizada para diluir o gás nitrogênio, ativar a superfície do aço e contribuir para a formação do plasma (liberar elétrons). A molécula nitrogênio, uma vez ionizada, forma átomos que são disponibilizados na superfície do aço para difundir e combinar com os elementos químicos deste. Nos casos de se necessitar difundir também átomos de carbono na superfície do aço, pode se adicionar o gás  $CH_4$  à mistura de gases  $H_2$  e  $N_2$ , sendo que a proporção deste é da ordem de 4 a 5%, em volume. A seguir, esquema de ionização da molécula de metano:

[Digite texto]

- $\text{CH}_4 \rightarrow [\text{C}] + 2 [\text{H}_2]$ .

Finalmente, uma outra etapa da nitretação pode ocorrer quando se deseja obter uma oxidação da superfície nitretada que, neste caso, é obtida adicionando o gás  $\text{N}_2\text{O}$  à mistura de  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ , ou  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  e  $\text{CH}_4$ .

A molécula do gás  $\text{N}_2\text{O}$  ao ser injetada no forno se quebra imediatamente liberando o átomo de oxigênio para a oxidação das peças, conforme a reação a seguir:.

- $\text{N}_2\text{O} \rightarrow 2 [\text{N}] + [\text{O}]$

Ao final do processo à temperatura de trabalho, por exemplo, 500 °C, e à pressão de  $10^{-1}$  mbar, tem-se uma mistura de gases  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2$  e, eventualmente,  $\text{O}_2$ . Uma vez concluída a nitretação iônica, injeta-se o gás nitrogênio para atingir a pressão atmosférica (1,033 bar), diluindo os resíduos do processo que restam em quantidades inferiores a 100 ppm. Resumidamente, a nitretação iônica compreende as seguintes e importantes etapas:

- **Etapa 1:** Aquecimento – Antes do aquecimento é feita a purga do ambiente interno do forno que neste estágio inicial é composto de ar. A purga é realizada com o auxílio de uma bomba de vácuo. O vácuo é feito até um nível de  $1 \times 10^{-2}$  mbar com posterior injeção de uma composição de  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2$ . A pressão interna do forno sobe e é mantida com auxílio do sistema (“*down stream control*”) em um nível de 1 a 10 mbar. As peças são aquecidas por radiação e com auxílio do plasma incandescente. Gases utilizados:  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2$ .
- **Etapa 2:** Limpeza ou “*Sputtering*”- Através do bombardeamento de íons, eventuais resíduos de sujidade na superfície das peças são eliminados.
- **Etapa 3:** Nitrocarbonetação – Fase em que as peças efetivamente são nitretadas. Gases utilizados:  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2$  e, ou não,  $\text{CH}_4$ .
- **Etapa 4:** Oxidação da camada nitretada, ou nitrocarbonetada. Gases utilizados:  $\text{N}_2$ ;  $\text{H}_2$ ;  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ .

- **Etapa 5:** Resfriamento – Introdução do gás Nitrogênio para uniformizar a pressão interna do forno com a pressão ambiente, externa, a 1,033 bar. A carga do forno é resfriada com a ajuda de um sistema de ventilação mecânico acionado por motores elétricos.

Para a realização da nitretação da nitretação iônica existe uma etapa anterior a Etapa 1 acima que é de suma importância: limpeza das peças. Essa operação de limpeza deve ser muito bem executada para evitar que o nível de vácuo estabelecido não seja alcançado, ou demore demais, assim como evitar contaminar o ambiente da câmara do forno. O processo também disponibiliza uma limpeza por plasma denominada “*sputtering*” que é anterior à nitretação.

A Figura 5 é uma representação esquemática do ciclo de nitretação iônica.

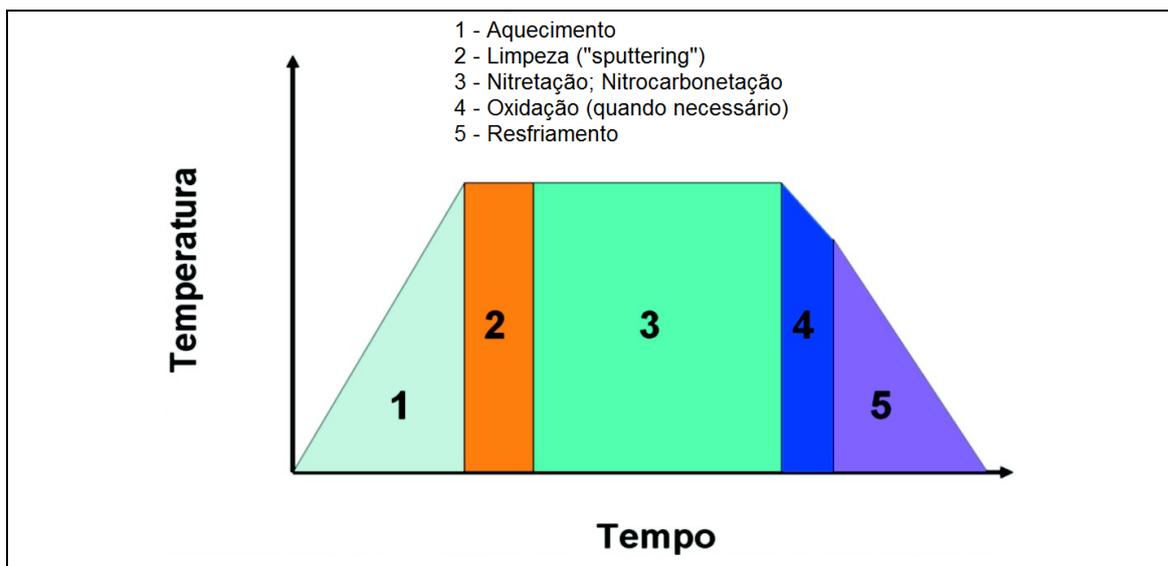


Figura 5. - Esquema de um processo típico de nitretação seguido de oxidação *in situ*.

As propriedades mecânicas e químicas das fases nitretadas são função do potencial de nitrogênio utilizado na nitretação iônica e estão representadas no esquema do diagrama de fases Fe-N da Figura 6, abaixo.

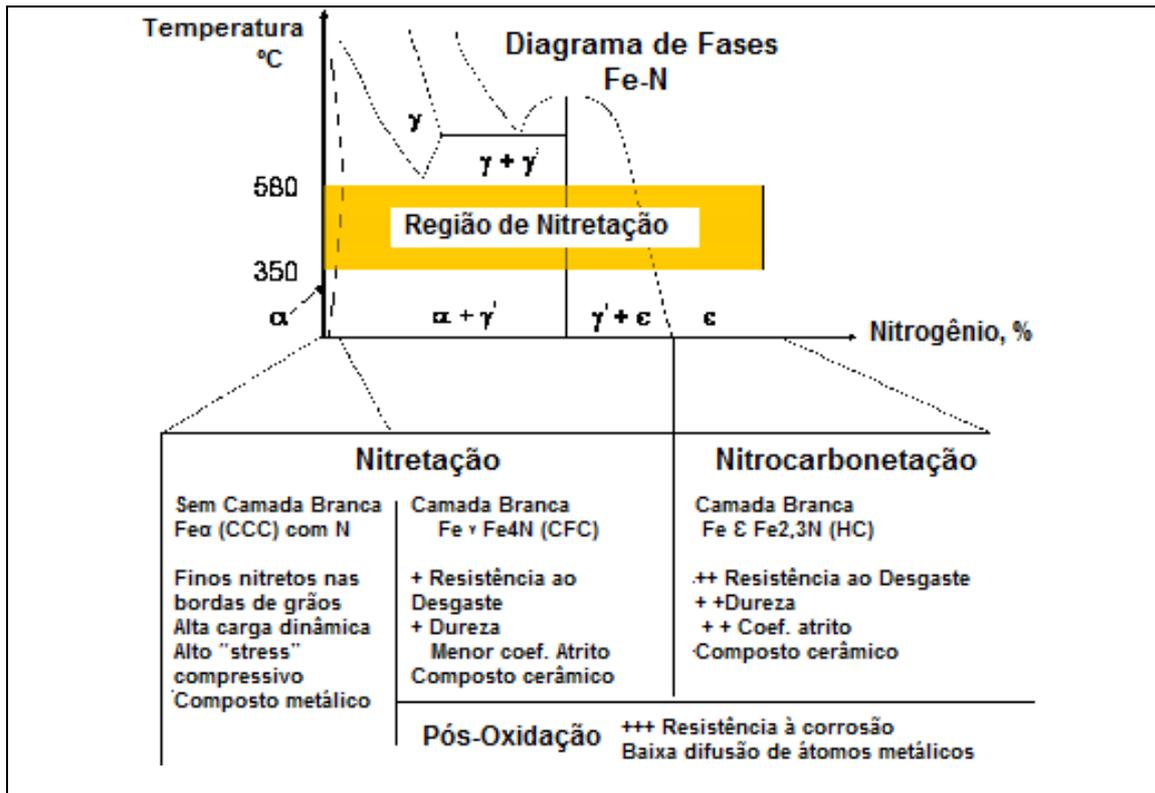


Figura 6 - Propriedades mecânicas e químicas das fases nitretadas no Diagrama Fe-N como uma função do potencial químico de nitrogênio utilizado [4]

### Aplicação e Resultados

A nitretação iônica, ou nitretação a plasma, tem um vasto arco de aplicação industrial que alcança de um lado alguns componentes mecânicos do setor automotivo e aeronáutico até as ferramentas de corte e moldes, ou matrizes, do setor metal-mecânico. No caso de ferramentas, moldes e matrizes construídas em aços-ferramenta o processo é desenvolvido em temperaturas inferiores à do último revenimento e a camada nitretada formada – com, ou sem camada branca – conforme a aplicação. Para os componentes mecânicos, em função da versatilidade da nitretação iônica, os tipos de nitretos podem ser selecionados também em função da aplicação, conforme mostrado na Figura 6. E nesse caso, um exemplo que se poderia citar é o componente mecânico “*mola de válvulas*”, aço construção mecânica Cr-Si, nitretado para

sem camada branca, ou com camada branca de nitreto tipo  $\gamma'$  de espessura até 2  $\mu\text{m}$ , e camada de difusão entre 0,080 a 0,120 mm [9].

A nitretação iônica, também em função da versatilidade em produzir superfícies nitretadas sem camada branca, tem encontrado grande e crescente aplicação em ferramentas que devem receber o revestimento duro tipo PVD (“*physical vapor deposition*”) aplicado por processos a plasma. Nesses casos a camada nitretada sem camada branca – com durezas variando de 700 a 1300 Vickers, dependendo do tipo de aço - serve como *boa ancoragem* para a adesão do nitreto de titânio (TiN) - dureza da ordem de 2000 a 2500 Vickers - sendo essas duplas técnicas conhecidas comercialmente como “**processo duplex**”.

A seguir, algumas aplicações típicas da nitretação iônica:

Componentes automotivos:

- Engrenagens – aço SAE 8620
- Eixo Comando – aço fundido; ferro fundido cinzento
- Válvulas – aços válvulas (Cr-Si; Cr-V; Cr-Mo-V)
- Anéis de pistão – inoxidável martensítico

Ferramentas e Matrizes

- Matriz para extrusão de alumínio – aço AISI H13
- Moldes para injeção de alumínio – aços AISI H13 e AISI H11
- Matriz para injeção de plástico – aços AISI H13 e AISI P20
- Matriz para conformação a frio – aços AISI D2
- Moldes para forjamento a quente – aço AISI H13
- Ferramentas de corte – aços rápidos
- Punções – aço AISI H13

A seguir, fotos de algumas peças e ferramentas nitretadas ionicamente no equipamento Plateg®.

[Digite texto]

	<p>Molde para injeção de plástico.</p> <p>Material: DIN 1.2312 ( 40CrMnMoS 8 6)</p> <p>Dureza de Superfície: 820 HV0.3 Profundidade de camada: 0.35 mm</p> <p>Objetivo: facilitar ejeção da peça injetada / + resistência a corrosão / + resistência a desgaste</p>
	<p>Haste Mola a Gás</p> <p>Material: DIN 1.0503 (C45) – SAE 1045</p> <p>Camada branca: &gt; 10µm Camada oxidada: ~ 1µm</p> <p>Objetivo: Incrementar a resistência ao desgaste e a corrosão</p>
	<p>Punções</p> <p>Material: Aço Rápido (DIN 1.3343)</p> <p>Dureza de núcleo: 700 HV Dureza de superfície: 1359 HV</p> <p>Objetivo: reduzir atrito / incremento vida útil</p>
	<p>Ferramenta forjamento a quente</p> <p>Material: DIN 1.2312 (40 CrMnMoS 8 6)</p> <p>Dureza de superfície: 750 HV</p> <p>Camada nitretada: 0,50 mm</p> <p>Objetivo: incrementar resistência ao desgaste</p>
	<p>Engrenagens</p> <p>Material: 42CrMo4</p> <p>Camada branca: 10 µm Camada de difusão: 0,50 mm</p> <p>Dureza superfície: 700 HV</p> <p>Objetivo: incrementar resistência a desgaste</p>

[Digite texto]

	<p>Conformação a frio</p> <p>Material: DIN 1.2312 (40CrMnMoS 8 6)</p> <p>Camada branca: 7 µm</p> <p>Camada nitretada: 0,40 mm</p> <p>Dureza de superfície: 950 HV</p> <p>Objetivo: incrementar a Resistência ao desgaste</p>
	<p>Cilindro espiral para transporte de madeira</p> <p>Material: 20MnV6</p> <p>Camada nitretada: 0,350 mm</p> <p>Dureza de superfície: 750 HV</p> <p>Objetivo: incrementar a resistência ao desgaste</p>

A Tabela 1 apresenta os resultados de camada e dureza de superfícies para alguns dos principais aços utilizados na indústria.

Tabela 1 – Resultados de camada nitretada para alguns dos principais aços utilizados na indústria. Fonte Plateg®.

Material	DIN	Dureza de Núcleo (HB - HRC)	Temperatura de Tratamento [°C]	Tempo de Tratamento [h]	Dureza de Superfície [HV1]	Camada Nitretada [mm]	Camada Branca Espessura [µm]	Camada Branca Tipo
<b>1. Aço Carbono</b>								
St 50	10.052	160 - 180 HB	550 - 580	4 a 12	200 - 400	0,3 - 0,8	04 a 10	ε + γ
<b>2. Ferro Fundido</b>								
GG 25	---	240 - 250	510 - 560	4 a 20	350 - 500	0,1 - 0,2	05 a 10	ε; ε + γ
GGG 60	---	290 - 300	510 - 560	4 a 20	400 - 600	0,1 - 0,3	05 a 10	ε; ε

[Digite texto]

		HB						+ $\gamma$
<b>3. Aços para Insetos</b>								
CK 15	11.141	130 - 150 HB	540 - 580	4 a 120	300 - 400	0,2 - 0,6	04 a 10	$\epsilon$ ; $\epsilon$ + $\gamma$
16 MnCr 5	17.131	190 - 200 HB	500 - 550	10 a 20	600 - 700	0,3 - 0,7	04 a 08	$\epsilon$ ; $\epsilon$ + $\gamma$
<b>4. Aços para Beneficiamento</b>								
34 CrNiMo 6	1.6582	250 - 350 HB	500 - 550	2 a 24	550 - 700	0,2 - 0,5	04 a 08	$\epsilon$ ; $\epsilon$ + $\gamma$
42 CrMo 4	17.225	250 - 350 HB	450 - 570	2 a 24	550 - 750	0,2 - 0,6	04 a 08	$\gamma$ ; $\epsilon$ + $\gamma$
<b>5. Aço para Nitretação</b>								
31 CrMo 12	1.8515	300 - 350 HB	500 - 550	10 a 70	750 - 900	0,2 - 0,5	03 a 08	$\gamma$ ; $\epsilon$ + $\gamma$
31 CrMoV 9	1.8519	300 - 350 HB	---	10 a 70	750 - 900	0,3 - 0,6	03 a 08	$\gamma$ ; $\epsilon$ + $\gamma$
34 CrAlNi 7	1.8550	260 - 330 HB	---	10 a 70	900 - 1100	0,3 - 0,8	03 a 10	$\gamma$ ; $\epsilon$ + $\gamma$
<b>6. Aço Trabalho a Frio</b>								
X 155 CrVMo 12 1	1.2379	53 - 60 HRC	400 - 520	ago/24	1000 - 1200	0,1 - 0,2	---	---
X 165 CrMoV 12	1.2601	56 - 58 HRC	400 - 480	ago/40	1000 - 1300	0,1 - 0,2	---	---
<b>7. Aço Trabalho a Quente</b>								
X 38 CrMoV 5 1	1.2343	35 - 55 HRC	500 - 560	8 a 24	900 - 1100	0,1 - 0,3	02 a 06	$\gamma$ ; $\epsilon$ + $\gamma$
X 32 CrMoV 3 3	1.2365	35 - 51 HRC	500 - 560	4 a 24	900 - 1100	0,1 - 0,3	02 a 06	$\gamma$ ; $\epsilon$ + $\gamma$
<b>8. Aço Rápido</b>								
S 6-5-2	1.3343	63 - 66 HRC	500 - 530	0,3 - 2	1000 - 1300	0,02 - 0,05	---	---
<b>9. Aço Inoxidável Martensítico</b>								
X 2 NiCoMoTi 18 12	1.6356	52 - 55 HRC	480	15 - 20	850 - 1000	0,1 - 0,2	02 a 04	$\gamma$
X 2 NiCoMo 18 8	1.6359	52 - 55 HRC	480	15 - 20	850 - 1000	0,1 - 0,2	02 a 06	$\gamma$
<b>10. Aço Inoxidável Austenítico</b>								
X 35 CrMo 17	1.4122	190 - 200 HB	520 - 570	10 a 20	950 - 1200	0,1 - 0,2	---	---

[Digite texto]

X 35 CrNi 18 8	1.4301	240 - 250 HB	520 - 580	10 a 20	950 - 1200	0,05 - 0,1	---	---
----------------	--------	-----------------	-----------	---------	------------	------------	-----	-----

A Tabela 2 apresenta, sucintamente, um comparativo dos principais processos de nitretação utilizados na indústria.

Tabela 2 – Comparativo das principais características dos processos de nitretação [9]

Características	TIPOS DE PROCESSOS DE NITRETAÇÃO		
	Gás (NH <sub>3</sub> ) convencional	Banho de Sal	Iônica
Controle do Potencial de Nitrogênio	Sem controle	Sem controle	Com controle
Controlar tipos de Nitretos (Épsilon e Gama Linha)	Não	Não	Sim
Nitretação sem Camada Branca	Limitado	Não	Sim
Temperatura de Nitretação [°C]	450 - 550	540 - 570	150 - 600
Tempo para se obter a mesma espessura de camada nitretada (à mesma temperatura)	Maior tempo de nitretação	Limitado (depende da profundidade de camada)	Menor tempo de nitretação
Rugosidade	Altera ~ 100%	Altera ~ 500%	Altera ~ 50%
Porosidade da camada	Fina	Grosseira	Muito fina, ou ausente
Limpeza (condição da superfície para nitretação)	Limpa	Limpa	Muito bem limpa
Ferro sinterizado	Depende da densidade (só para > 7,0 g/cm <sup>3</sup> )	Não aplicável	Aplicável e independe da densidade
Operação do equipamento	Simples	Simples	Não Simples
Montagem da carga para peças de diferentes geometrias	Simples	Simples	Simples, ou complexo, depende da peça
Montagem da carga para peças de mesma geometria	Simples	Simples	Simples (depende de dispositivos especiais)
Ocupação do Forno	Máxima	Máxima	70 – 90%
Aço Inoxidável	Não nitreta	Nitreta	Nitreta
Meio-ambiente	Gera resíduo	Gera resíduo	Não gera resíduo
Deformação	Mínima	Mínima	Mínima, ou nenhuma (depende da temperatura)

[Digite texto]

## Bibliografia

- [1] Alves, Clodomiro Jr. tese doutorado “Nitretação em plasma pulsado” 1995
- [2] Grun, R; Gunther, H-J “Plasma nitriding in industry – problems, new solutions and limits”. Materials Science and Engineering, v A140, p435- 1989
- [3] Pye, D. “Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing”. ASM. The Materials Information Society. 2003
- [4] Figueroa, C.A “Nitretação de metais a plasma: princípios, comparações com as técnicas convencionais e aplicações” – UCS-RGS, 2006
- [5] Edenhofer, B. “Physical and metallurgical aspects of ionitriding”. Heat Treatment of Metals, v.1, part 1, p.23-8, 1974
- [6] Matzke, Hj. “Applicattion of ion beam techniques to solid state physics and technology of nuclear materials”. Journal of Nuclear Materials, v.135, p.143-53, july, 1985
- [7] Ruset, C. “The influence of pressure on temperature uniformity in the plasma nitriding process”. Heat Treatment of Metals, v.3, p.81-4, 1991
- [8] Schwirzke, F.R. “Vacuum breakdon on metal surfaces”. IEEE Transactions on Plasma Science, v.19, n5, p.690-6, 1991
- [9] Vendramim, J.C. “Influência da nitretação na resistência a fadiga por flexão rotativa de molas para válvulas automotivas”. Faculdade de Engenharia Mecanica Unicamp. Dissertação de mestrado, 2002