

OTIMIZAÇÃO DOS CICLOS DE TRATAMENTO TÉRMICO, NITRETAÇÃO E REVESTIMENTO PVD PARA ATINGIR O MELHOR DESEMPENHO DO AÇO FERRAMENTA AISI D2¹

Carlos Eduardo Pinedo²

Resumo

A vida dos aços ferramenta para trabalho a frio depende de sua resistência ao carregamento mecânico, à fratura e ao desgaste abrasivo e adesivo. Neste contexto, o aço ferramenta tipo AISI D2 exige um projeto microestrutural criterioso para atingir propriedades ótimas e que conduzirão ao desempenho desejado pelos usuários. Um projeto microestrutural para satisfazer estas necessidades não depende apenas de um condicionamento do substrato, corpo da ferramenta, por tratamento térmico, mas também por uma adequação da microestrutura superficial por meio de tratamento de nitretação e/ou revestimento PVD. Ainda, é preciso que estes processos sejam pensados em conjunto de forma a conseguir uma perfeita sincronia entre todas estas etapas. Este trabalho apresenta uma rota de tratamento térmico, superficial por plasma e de revestimento PVD que otimiza as propriedades de ferramentas para trabalho a frio e deve conduzir a um desempenho ótimo.

Palavras-chave: Tratamento térmico; Nitretação; Revestimento.

OPTIMIZATION OF HEAT TREATMENT, NITRIDING AND PVD COATING CYCLES TO ACHIEVE THE BEST PERFORMANCE TOOL STEEL AISI D2

Abstract

The life of tool steels for cold work tool steel depends on their mechanical, fracture and abrasive/adhesive wear resistance. In this context, the tool steel AISI D2 requires a careful microstructural design to achieve optimum properties in order to achieve the desired performance by end users. A microstructural design to meet these needs not only depend on the conditioning of the substrate by heat treatment, but also an adjustment of the microstructure by surface nitriding treatment combined or not with PVD coating. In addition, it is necessary that these processes are thought together in order to achieve a perfect synchrony between all these steps. This paper presents a route for heat treatment, plasma nitriding and PVD coating that optimizes the properties of tools for cold work and should lead to best performance.

Keywords: Heat treatment; Nitriding; Coating.

¹ Contribuição técnica ao 11º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 14 e 15 de agosto de 2013, São Paulo, SP.

² Engenheiro metalurgista. Diretor Técnico da Heat Tech Tecnologia em Tratamento Térmico e Engenharia de Superfície Ltda e de HTS Tecnologia em Revestimentos Ltda. Mogi das Cruzes, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O setor metal-mecânico é um grande consumidor de aços ferramenta utilizados em operações de corte e conformação de metais, polímeros e cerâmicas. Estes aços possuem uma combinação única entre resistência mecânica e resistência ao desgaste. Dentre os principais aços desta família dos aços para trabalho a frio destaca-se a série AISI D, na qual o aço Tipo D2 é o mais utilizado quando se deseja combinar suas propriedades de resistência com a resistência à fratura. Deve se considerar que a resistência à fratura do aço AISI D2 depende da qualidade microestrutural da matéria prima, no que se refere à distribuição, forma e tamanho dos carbonetos eutéticos tipo M_7C_3 .^(1,2) Entretanto, este parâmetro não será abordado neste trabalho.

Dentre os aços para trabalho a frio o AISI D2 também possui a vantagem de possuir temperabilidade suficiente para a têmpera sob vácuo, o que preserva a integridade superficial quanto à oxidação e descarbonetação, minimiza a distorção e melhora a reprodutibilidade. As ferramentas confeccionadas em aço AISI D2 são em sua grande maioria especificadas para uso em uma faixa de dureza entre 58 – 60 HRC, atingida após têmpera e revenimento. Para esta dureza existem métodos diferentes de tratamento térmico, mas dentre eles uma rota é a melhor não apenas por conduzir a maior resistência à fratura, mas por permitir o uso seguro de tratamentos superficiais após a têmpera e o revenimento. Considerando a aplicação da ferramenta e indispensável o uso posterior da nitretação e/ou dos revestimentos PVD.

Nesta linha, este trabalho pretende mostra a influência dos principais parâmetros envolvidos no ciclo completo de processamento microestrutural do aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2, denominado se *Full Service*, envolvendo o tratamento térmico, a nitretação sob plasma, o revestimento PVD e o tratamento superficial Dúplex como forma de otimizar as propriedades da ferramenta para obter um melhor desempenho dos ferramentais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material destes estudos corresponde ao aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2, com amostras obtidas a partir de barras redondas e recozidas. Os tratamentos térmicos foram realizados em fornos de mufla com sistema de retorta de vácuo para eliminar os efeitos de oxidação e descarbonetação superficial, garantindo assim, a integridade das amostras. As temperaturas de tratamento foram sempre aferidas por termopar externo (Tipo K) ligado a um indicador digital de temperaturas Yokogawa, com junta fria eletrônica. O conjunto de curvas de revenimento levantadas para temperaturas entre 100 e 600°C foram obtidas para temperaturas de austenitização entre 900 e 1080°C.

A resistência à fratura foi estudada após duas séries de tratamentos térmicos. Na Série 1, a temperatura de austenitização para a têmpera foi de 1080°C, com resfriamento em óleo e revenimentos duplos, de duas horas cada, nas temperaturas de 200 e 540°C. Na Série 2, a temperatura de austenitização para a têmpera foi variada entre 1020 e 1080°C com resfriamento em óleo. Os revenimentos foram duplos, de duas horas na temperatura de 540°C. Estes tratamentos foram utilizados procurando atingir uma dureza entre 58-60 HRC. A tenacidade foi avaliada pelo ensaio de flexão em 4 pontos por metodologia descrita anteriormente.⁽³⁾

Os tratamentos de nitretação sob plasma foram realizados em um reator de plasma pulsado-DC com parede quente, marca Eltropuls. A temperatura de nitretação foi de 520°C e a composição gasosa utilizou as proporções: 3N₂:1H₂ e 1N₂:9H₂, nos dois casos o tempo foi de 6 horas. A temperatura foi controlada por dois termopares inseridos diretamente nas amostras. Os tratamentos de revestimento foram realizados pelo processo PVD (Physical Vapor Deposition) gerando camadas de TiN e de HTS-V10®.

Para caracterização microestrutural a preparação metalográfica seguiu os procedimentos normais de corte, lixamento e polimento. As amostras foram atacadas com reagente de Nital 4%. As observações foram realizadas em banco metalográfico Olympus com sistema captura digital de imagem. A dureza após tratamento térmico foi medida em Rockwell C, média de cinco determinações. Após os tratamentos superficiais o endurecimento foi determinado por microdureza Vickers. A adesão do revestimento PVD foi estudada pelo método de indentação Rockwell.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resposta à Têmpera e Revenimento

A Figura 1 apresenta resposta ao revenimento para o aço ferramenta AISI D2 para temperaturas de austenitização entre 900 e 1080°C. Para a melhor definição do ciclo de tratamento térmico é importante verificar as condições em que a combinação entre a temperatura de austenitização e a temperatura de revenimento conduz a dureza especificada entre 58 – 60 HRC. A Figura 1 mostra que o aço AISI D2 possui resposta ao revenimento particularmente interessante. A dureza de trabalho é conseguida por dois ciclos de tratamento térmico. O primeiro deve usar baixa temperatura de austenitização, em torno de 1000°C e baixa temperatura de revenimento, em torno de 200°C, sendo este ciclo semelhante ao do AISI D6 e ainda amplamente utilizado nos dias de hoje. Entretanto, existe a possibilidade de atingir a mesma dureza de trabalho utilizando temperatura de austenitização superior a 1000°C e revenimentos em temperatura elevada, superiores a 520°C, sendo este um procedimento de tratamento térmico mais moderno, seguro, com melhores propriedades, fornecendo uma microestrutura preparada para receber tratamentos superficiais de nitretação e revestimentos posteriores.

Em termos da relação microestrutura/propriedade a dureza de trabalho, entre 58 – 60 HRC é atingida quando:

- Na primeira combinação de tratamento térmico, utilizando baixas temperaturas de austenitização e de revenimento, a microestrutura é composta pela presença de martensita revenida em elevado estado de tensão, promovido pela supersaturação em carbono, com presença de austenita retida não revertida.
- Na segunda combinação de tratamento térmico, utilizando altas temperaturas de austenitização e de revenimento, a microestrutura é composta de martensita revenida com precipitação fina e homogênea de carbonetos de liga no endurecimento secundário, fato que alivia a tensão na martensita revenida. Ainda, ocorre a reversão da austenita retida com os revenimentos múltiplos em elevada temperatura.

É necessário entender quais destes ciclos conduz à melhor combinação de propriedades, tendo sempre em mente que a dureza “nunca” deve ser o único parâmetro de especificação de propriedade.

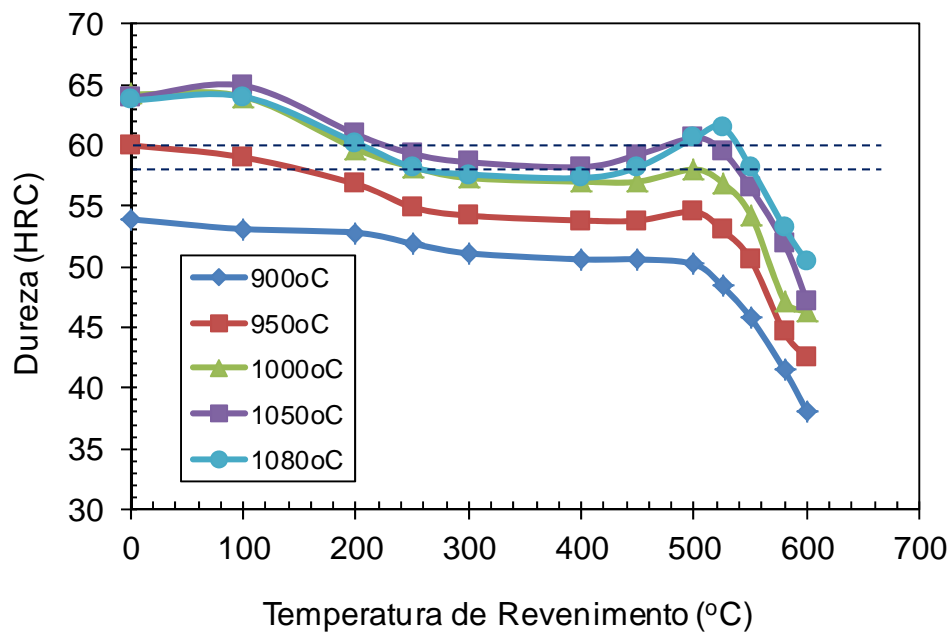


Figura 1 . Resposta ao tratamento térmico de têmpera e revenimento.

3.2 Influência da Temperatura de Revenimento na Tenacidade

Para entender a na relação microestrutura/propriedade com a influência da temperatura de revenimento sobre a resistência à fratura, tenacidade, os tratamentos de têmpera e revenimento realizados pela Série 1, objetivando dureza final entre 58 – 60 HRC foram testados em amostras submetidas a ensaio de fratura por flexão 4 pontos. Os resultados de tenacidade obtidos nos ensaios de flexão são apresentados na Tabela 1. Verifica-se que a tenacidade do aço é superior quando o revenimento é realizado na temperatura de 540°C. Na temperatura de revenimento de 200°C a tenacidade é substancialmente menor.

Tabela 1 – Resistência à flexão nas diferentes condições de tratamento térmico

	Resistência à Flexão (MPa)	
	RV: 200°C	RV: 540°C
Média:	2.396,9	3.760,2
Desvio Padrão:	220,9	179,3

Os resultados mostram que a tenacidade do aço AISI D2 é fortemente controlada pela sua microestrutura após tratamento térmico. Verifica-se que a variável microestrutural mais importante no revenimento é a etapa de alívio de tensões da estrutura martensítica que ocorre de forma diferente de acordo com a temperatura de tratamento. Quando o revenimento é realizado a 200°C, a dureza do aço ainda é resultado da dureza da matriz martensítica imediatamente após a têmpera. Neste caso, a baixa temperatura não é suficiente para aliviar as tensões geradas na transformação martensítica e mantém a microestrutura em caráter frágil.

Quando o revenimento é realizado a 540°C o efeito da temperatura de tratamento na elevação da tenacidade é nítido, tendo em vista que a elevada dureza atingida neste revenimento de alta temperatura é decorrente do fenômeno de endurecimento secundário presente no sistema Fe-C-Cr, como o AISI D2: Fe-1,5%C-11,5%Cr⁽⁴⁾ e não é mais causada exclusivamente pela dureza da martensita supersaturada. A precipitação de carbonetos de liga e a permanência em alta temperatura promove um efeito conjunto de alívio de tensões na martensita revenida o que eleva a tenacidade.

3.3 Influência da Temperatura de Austenitização na Tenacidade

Não apenas a temperatura de revenimento é uma variável importante, mas também a temperatura de austenitização deve ser controlada. Uma vez verificado que a temperatura de revenimento elevada conduz a uma maior resistência à fratura, é necessário determinar qual é a melhor temperatura de austenitização que leva a uma condição ótima para o desempenho do aço AISI D2. Após os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento com variação da temperatura de austenitização e revenimento fixo em 540°C, Série 2, verifica-se que a microestrutura é composta basicamente de martensita revenida, carbonetos eutéticos não dissolvidos na austenitização e austenita retida (Figura 2).

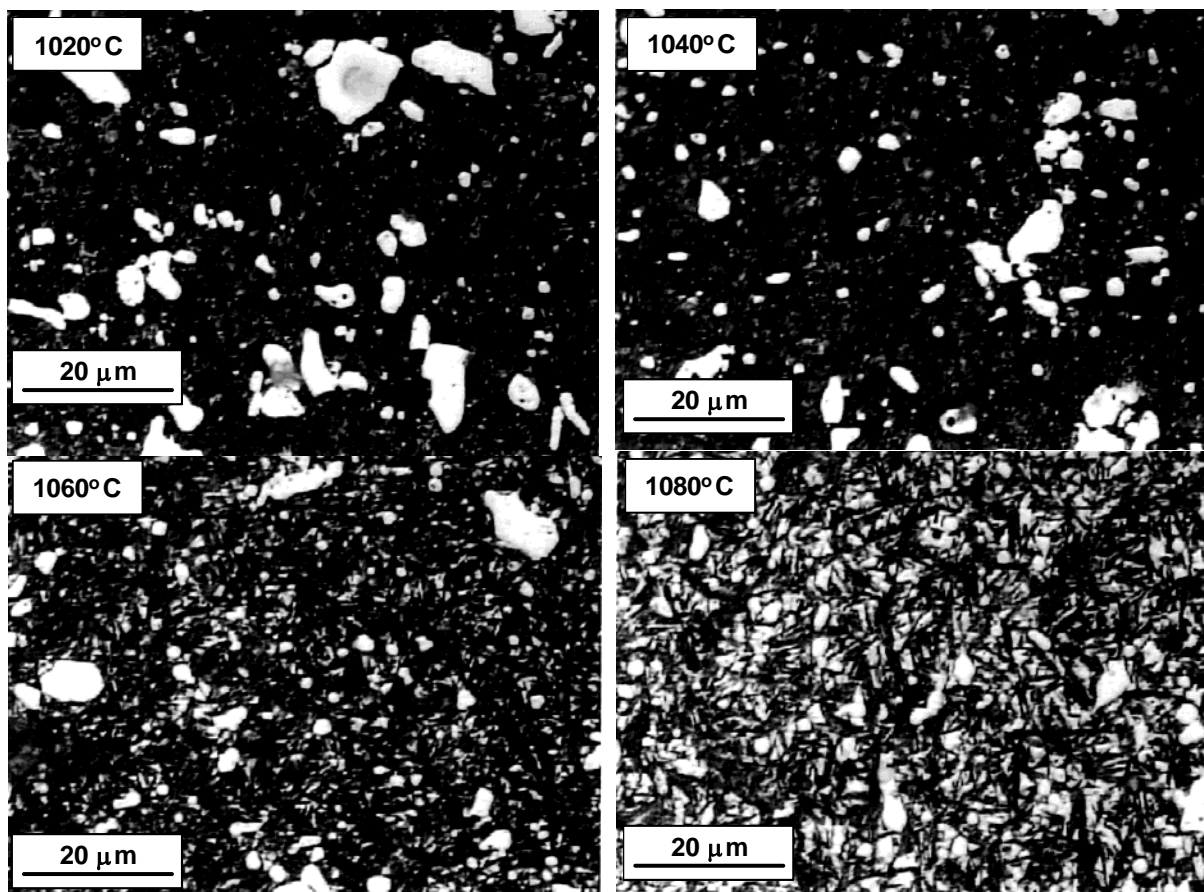


Figura 2. Microestruturas após tratamento térmico de têmpera e revenimento. Nital 4%.

A fração de austenita retida aumenta nitidamente com o aumento da temperatura de austenitização, sendo claramente visível para as temperaturas de 1.060°C e 1080°C com relação às demais. É importante salientar que as amostras foram preparadas e

atacadas simultaneamente, no mesmo baquelite, e esta diferença de resposta ao ataque com Nital 10% deve ser consequência exclusivamente da diferença microestrutural. Quando o teor de austenita retida e martensita virgem são elevados, os aços ferramenta são mais resistentes ao ataque com Nital.

Os resultados de resistência à fratura obtidos nos ensaios de flexão 4 pontos são apresentados na Tabela 2 e mostrados na Figura 3. Verifica-se que a tenacidade do aço AISI D2 é muito sensível à variação na temperatura de austenitização.⁽⁶⁾ A tenacidade é máxima para a temperatura de austenitização de 1040°C e diminui à medida que a temperatura aumenta. Considerando o desvio padrão obtido, verifica-se que desvio percentual das medidas situa-se na ordem de 5% com relação à média o que é um excelente resultado para este tipo ensaio. A interpenetração observada nos intervalos de confiança não deve ser considerada decisiva para alterar o comportamento das médias. A dureza média dos corpos de prova ensaiados foi de 669,1 ± 11,8 HV1 (58,8 HRC convertida) o que é relevante para não considerar esta variável como fundamental na variação da tenacidade.

Tabela 2. Resistência à flexão nas diferentes condições de tratamento térmico

	Temperatura de Austenitização, °C			
	1020	1040	1060	1080
Tensão de Ruptura, MPa	4134,7	4674,0	3877,1	3552,6
Desvio Padrão	177,76	119,85	163,12	185,40

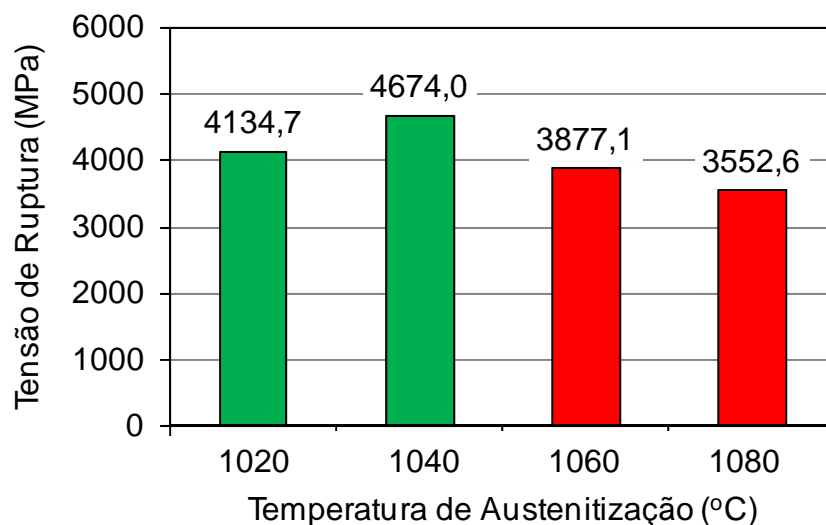


Figura 3. Variação da tensão máxima de ruptura sob flexão 4 pontos.

Também é importante se considerar as variações dimensionais associadas aos diferentes ciclos de tempera e revenimento utilizados no aço AISI D2. Berns⁽⁵⁾ mostrou claramente que os ciclos que utilizam a combinação de altas temperaturas de austenitização e de revenimento são aqueles que também conduzem a menor variação dimensional. A Figura 4 mostra uma comparação entre a variação dimensional após a têmpera e revenimento utilizando ciclos de baixa e alta temperatura, sendo possível observar que após tratamentos de baixa temperatura existe uma expansão remanescente e que após ciclos de alta temperatura a variação dimensional é próxima de zero. Estas considerações dimensionais são importantes porque este aço deve sofrer tratamentos superficiais posteriores e deve

estar com sua microestrutura estabilizada com relação à variação dimensional. Estas variações dimensionais pós-tratamento térmico originadas por; reações de precipitação, alívio de tensão na martensita e decomposição da austenita retida principalmente, ocorrem em temperaturas próximas às da nitretação e PVD.

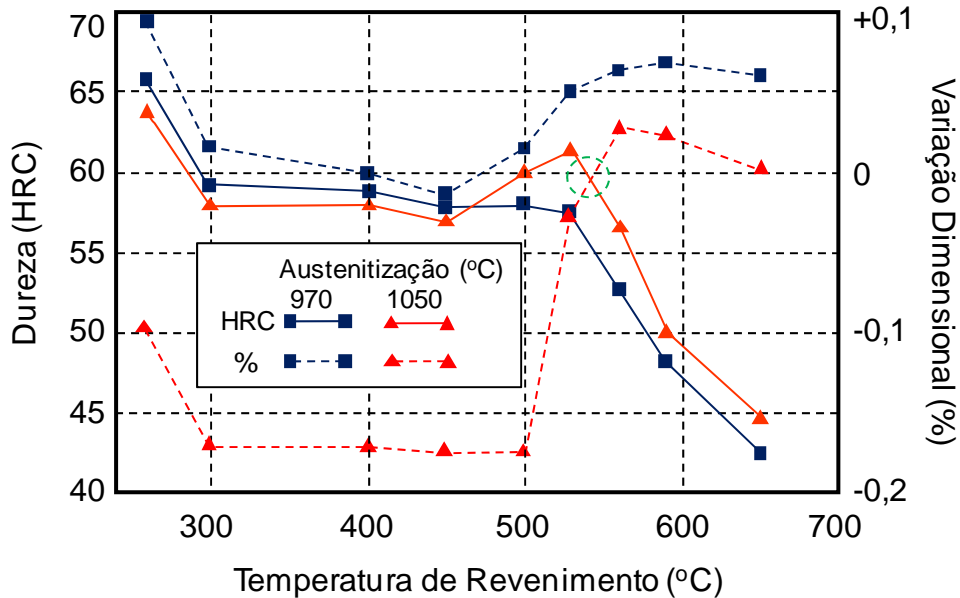


Figura 4. Variação de dureza e de dimensão para o aço AISI D2 após diferentes ciclos de têmpera e revenimento.⁽⁵⁾

3.4 Tratamento Superficial de Nitretação sob Plasma

Quando se pretende realizar tratamentos superficiais é indispensável que as condições de tratamento térmico prévias tenham sido projetadas considerando as temperaturas em que os tratamentos superficiais serão realizados. Como os tratamentos superficiais utilizam temperaturas que atingem valores superiores a 400°C é mandatório que a temperatura de revenimento seja superior à temperatura de tratamento superficial. , A Têmpera com austenitização entre 1020 – 1040°C e o revenimento acima de 500°C são mandatórios. Os tratamentos de nitretação sob plasma utilizando potenciais de nitrogênio de 75% e 10%, permitiram obter diferentes microestruturas superficiais, com e sem a presença da Camada Branca, ou Camada de Compostos (Figura 5). A Figura 5(a) mostra que em potencial de nitrogênio elevado a microestrutura da superfície nitretada contém não apenas a camada branca, mas uma intensa precipitação de nitretos em contornos de grão na zona de difusão. Esta precipitação intensa é consequência da elevada afinidade do cromo pelo nitrogênio, formando nitretos de cromo e ocorre porque este aço possui um teor de cromo elevado, 11,5%. Esta superfície nitretada com camada branca e rede de nitretos em contornos de grão eleva a dureza superficial, mas deteriora bruscamente a resistência à fratura na superfície e causa a micro fraturas localizadas sob condições de adesão e falhas prematuras de serviço. Isto ocorre porque ferramentas de trabalho a frio são sujeitas a cargas de deformação extremamente altas e isso causa “esboroamento” na superfície de trabalho. No caso de ferramentas de corte a frio ocorre o lascamento intenso das arestas cortantes.⁽⁶⁾

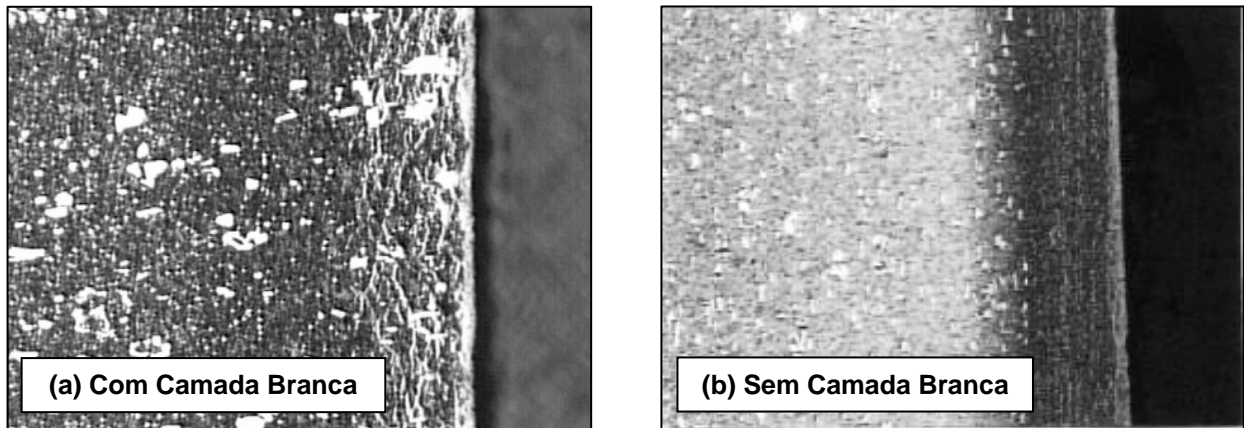


Figura 5. Microestruturas do aço ferramenta AISI D2 após a nitretação sob plasma em potenciais de nitrogênio (a) elevado e (b) reduzido. Nital 4%.

Por estas características microestruturais este aço deve sempre ser nitretado sob um potencial baixo de nitrogênio sem a presença da camada branca, Figura 5(b), formando uma zona de difusão é homogênea sem formação de nitreto de cromo nos contornos de grão. A precipitação sub microscópica de nitretos complexos de ferro e cromo promove um elevado endurecimento superficial sem deteriorar a capacidade de suportar cargas. A Figura 6 mostra o perfil de endurecimento do aço D2 onde o máximo de endurecimento atinge um valor da ordem de 1.400HV.

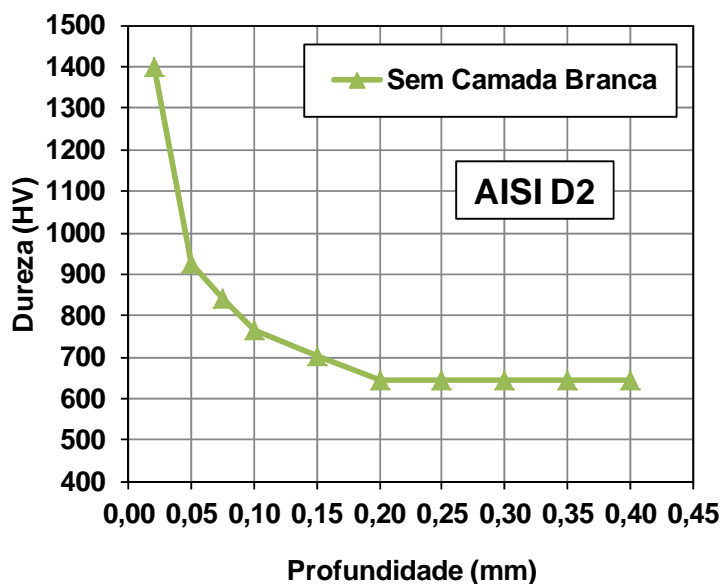


Figura 6. Perfil de endurecimento transversal para o aço ferramenta AISI D2 após a nitretação sob plasma em potenciais de nitrogênio reduzido, sem camada branca.

3.5 Revestimento PVD

O aço para trabalho a frio AISI D2 somente poderá ser revestidos nas condições usuais dos processos PVD considerando que o tratamento térmico anterior ocorreu em condições de temperaturas elevadas. Os critérios necessários para a nitretação também estão presentes no revestimento PVD. Os revestimentos em sua maioria são compostos cerâmicos depositados como uma fina camada sobre a superfície das ferramentas. As camadas usuais possuem entre 2 μm e 5 μm

de espessura. Os tipos de revestimentos mais comuns com sua dureza e coeficiente de atrito são apresentados na Tabela 3. Verifica-se que os revestimentos possuem dureza muito superior a dos aços ferramenta temperados e revenidos, para trabalho a frio, em torno de 600 HV – 700 HV, o que lhes confere uma maior resistência ao desgaste. Em conjunto, possuem baixo coeficiente de atrito diminuindo a força de atrito (FA) que age no sistema em deslizamento e com isso diminuindo a ação do desgaste.

Tabela 3. Principais características de revestimentos PVD

Revestimento:	TiN	CrN	TiCN	TiAlN	HTS-V10®
Dureza (HV):	2200	1900	2800	3000	2500
Coeficiente de Atrito:	0,4	0,3 – 0,5	0,4	0,3 – 0,4	0,1

® Propriedade de HTS Tecnologia em Revestimentos Ltda.

O revestimento mais tradicional em trabalho a frio tem sido o nitreto de Titânio, TiN, entretanto novas composições têm sido desenvolvidas de modo a oferecer um melhor conjunto de propriedades. O revestimento HTS-V10® é desenvolvido especificamente para ferramentas de trabalho a frio e a combinação de seu caráter nanoestruturado, sua dureza elevada e mais baixo coeficiente de atrito representam vantagens importantes frente ao TiN. Como exemplo, um conjunto de ferramentas da empresa Keiper do Brasil Ltda foi testado quanto ao desempenho em serviço utilizando revestimento HTS-V10®. Uma comparação de desempenho com relação a condição sem tratamento e ao revestimento anterior é apresentada na Figura 7.⁽⁷⁾

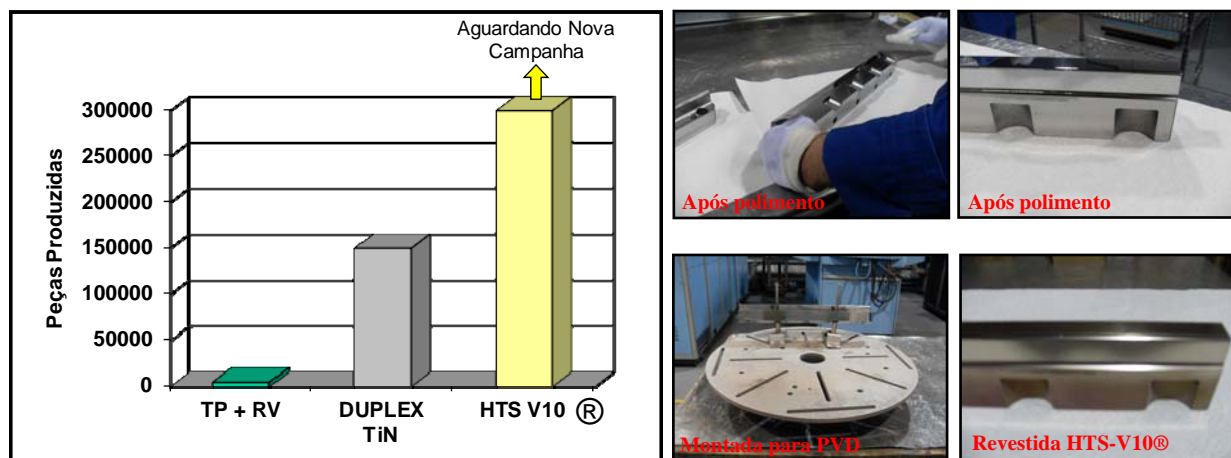


Figura 7. Resultado de desempenho de ferramenta da Keiper do Brasil Ltda.

Os resultados obtidos em serviço mostraram que o revestimento HTS-V10® elevou a vida da ferramenta em níveis muito superiores ao obtido com a mesma ferramenta sem revestimento. Ainda, comparando a vida após revestimento HTS-V10® com uma ferramenta anteriormente tratada com processo Dúplex (fornecido por outra empresa), nitretação seguido de revestimento TiN, a vida do revestimento HTS-V10® é o dobro do atingido anteriormente. É importante informar que a ferramenta revestida em HTS-V10® ainda se encontra em estado de uso aguardando nova campanha da peça fabricada.

3.6 Superfícies com Tecnologia Dúplex

A adesão dos revestimentos aos substratos de aço ferramenta é dependente da diferença de dureza existente entre estes. No caso do aço AISI D2 o substrato é temperado e revenido para cerca de 60 HRC, ou aproximadamente 700 HV, e o revestimento, por exemplo de PVD-TiN, possui dureza de aproximadamente 2.200 HV. Nestas condições a adesão do revestimento fica comprometida, pois a propriedade mecânica do aço é muito inferior a do revestimento e a interface substrato/revestimento é instável sob elevadas cargas provocando o deslocamento antecipado do revestimento e com isso uma diminuição na vida da ferramenta.

Uma opção para otimizar a adesão do revestimento na ferramenta é o uso do tratamento de nitretação sob plasma antes do revestimento PVD ^(8,10). Com a pré-nitretação é gerada uma camada que suporta as cargas impostas à superfície, minimiza o trincamento do revestimento, e eleva a adesão, minimizando o deslocamento ou delaminação. É importante salientar que a camada nitretada deve obrigatoriamente ser isenta de Camada de Compostos, Camada Branca, o que é conseguido pelo controle do potencial e temperatura de nitretação no processo de plasma pulsado como descrito anteriormente.

A nitretação é importante não apenas por causa do aumento na dureza superficial. O fato relevante é que com a nitretação é possível aproximar as propriedades de resistência e de elasticidade entre o aço e o revestimento. Quando comparamos a relação entre resistência em termos de dureza (H) com o Módulo de Elasticidade (E), relação "H/E", do aço AISI D2, sem nitretação e nitretado com o revestimento de TiN, Figura 8, verificamos que sem a nitretação a relação H/E do aço apenas temperado e revenido é a metade da do revestimento. Entretanto, com a nitretação é possível aproximar a relação H/E entre aço e revestimento. Isso permite obter uma condição de interface com propriedades similares entre o aço e o revestimento o que é indispensável para elevar a adesão do revestimento ao substrato nitretado. O conjunto formado pelo revestimento com elevada dureza e baixo coeficiente de atrito trabalhando sobre a camada nitretada também com elevada dureza em maior profundidade aumenta a vida de ferramentas de conformação de chapas e são importantes na deformação de chapas de aço de alta resistência e baixa liga, por exemplo.

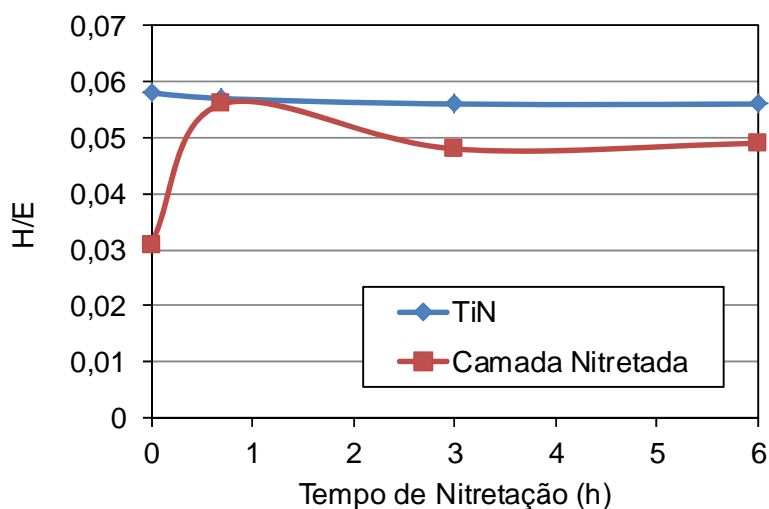


Figura 8. Propriedades superficiais do aço AISI D2 após nitretação sob plasma e do revestimento TiN em termos da relação H/E.

O reflexo do ajuste nas propriedades mecânicas do aço AISI D2 pelo tratamento superficial de nitretação sob plasma, pela elevação localizada da relação “H/E” é mostrado na Figura 9, que descreve o desempenho frente à adesão do revestimento de TiN sobre uma superfície sem e com nitretação. Verifica-se que os valores das cargas críticas de falha ($Lc1$) carga necessária para o trincamento e ($Lc2$) carga para o deslocamento do revestimento, em ensaio de indentação tipo Rockwell C, são superiores após a nitretação, sendo importante mencionar que 250 kgf é a carga máxima de ensaio e não necessariamente o valor máximo de $Lc2$.

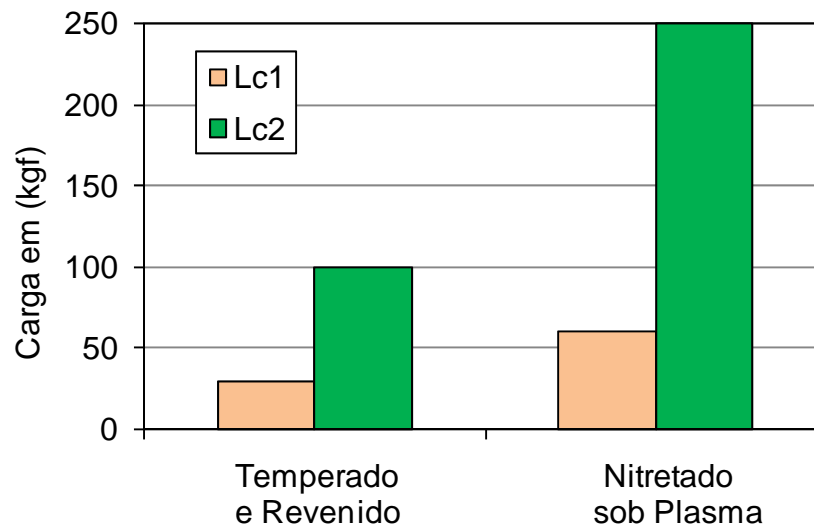


Figura 9. Cargas críticas de trincamento ($Lc1$) e de deslocamento ($Lc2$) para o TiN sobre a superfície do aço AISI D2 sem e com nitretação sob plasma prévia.

Estes resultados mostram que a combinação entre os tratamentos superficiais de nitretação sob plasma, obtendo uma superfície nitretada sem camada branca com o revestimento PVD, gerando uma Superfície Dúplex, é uma combinação de processos de tratamentos superficiais importante para a elevação da adesão do revestimento, com um aumento no seu tempo de residência e com isso com um aumento na vida do ferramental em serviço.

4 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no trabalho permitem concluir que o roteiro de processamento térmico do aço ferramenta para trabalho a frio tipo AISI D2 tem características importantes que devem ser seguidas para permitir um maior rendimento dos ferramentais, a saber:

- Utilizando a mesma temperatura de austenitização, 1080°C a resistência à fratura, tenacidade, do material revenido a 540°C é superior á encontrada após o revenimento a 200°C. Este comportamento é resultado do grau de alívio de tensão da martensita revenida, maior quanto maior a temperatura de revenimento. Assim, revenimentos a alta temperatura devem ser utilizados.
- A tenacidade varia de acordo com a temperatura de austenitização. A melhor tenacidade é obtida para a temperatura de austenitização de 1.040°C. A fração de austenita retida e o efeito do endurecimento secundário são os fatores microestruturais que controlam a tenacidade. Assim, não deve utilizar temperaturas de austenitização superiores a 1040°C.

- Os tratamentos superficiais utilizam temperaturas de processo superiores a 200°C chegando a valores superiores a 500°C. Neste caso, deve-se adequar a temperatura de revenimento à temperatura de tratamento superficial, o que faz mandatório que o ciclo de têmpera e utilize temperatura de austenitização entre 1.020°C – 1.040°C e que a temperatura de revenimento seja superior a 500°C. Este ciclo também fornece maior estabilidade dimensional.
- A Nitretação sob Plasma é capaz de controlar a microestrutura da superfície nitretada. A diminuição do potencial de nitrogênio na atmosfera nitretante elimina a Camada Branca e a precipitação de nitretos em contornos de grão. A Zona de Difusão formada é homogênea e endurecida para um valor máximo de aproximadamente 1400HV. Uma superfície nitretada sem a formação da camada branca é obrigatória em superfícies dúplex.
- A utilização de revestimentos PVD aumenta a vida de ferramentas em serviço. O aumento da vida se deve às suas características nanoestruturais, a elevada dureza e ao baixo coeficiente de atrito.
- A Nitretação sob Plasma condiciona as propriedades mecânicas da superfície, tornando-as próximas às do revestimento PVD, indicado pela relação H/E. Isto eleva a adesão do revestimento ao substrato. Nos tratamentos dúplex de nitretação seguida de PVD a carga (L_{C1}) para trincamento e (L_{C2}) para deslocamento do revestimento diminuem sensivelmente.

REFERÊNCIAS

- 1 Mendanha, A., Estudo da Resistência À Fratura do Aço Ferramenta Para Trabalho a Frio AISI D2, Dissertação de Mestrado, EPUSP, 151p., 2004.
- 2 Mendanha, A., Goldenstein, H., Pinedo C.E., Influence of the Start Microstructure and Heat Treatment on the Toughness of the Cold Work Tool Steel AISI D2, In 7th International Tooling Conference, 2-5 May Torino/Italy, 2006, p. 813-819.
- 3 Mendanha, A. & Pinedo, C.E. – “Estudo da Tenacidade do Aço Ferramenta para Trabalho a Frio AISI D2 em Diferentes Condições de Microestrutura e Tratamento Térmico”, 2º Conferência Internacional de Forjamento, 19-22 de outubro, Porto Alegre - RS, 1998, p. 122 – 135.
- 4 Honeycombe, R.W.K., Structure and Strength of Alloy Steels, Ed. Climax Molybdenum Co Ltd, 36 p. 1973.
- 5 Berns, H.B., Distortion and Crack Formation By Heat Treatment of Tools”, Radex-Rundschau, Heft 1, pp. 40-57, 1989.
- 6 Pinedo, C.E., Nitretação sob Plasma - Fundamentos e Aplicações Parte IV - Nitretação sob Plasma Pulsado de Aços Ferramenta, Industrial Heating - Brasil, v. 5, p. 53-56, 2013.
- 7 Tovbin, R., Pinedo, C.E., Utilização De Revestimentos Tribológicos em Ferramentas para Trabalho A Frio, Anais do 7º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, São Paulo, ABM, 15-16 Julho, 2009, p. 50 – 59.
- 8 Franco Jr, A.R., Pinedo, C.E., Vencovsky, P.K., Tschiptschin, A.P., Efeito do Acabamento Superficial de Substratos de Aço-Ferramenta AISI D2 na Aderência De Revestimentos de TiN Depositados por PVD, Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, São Pedro – SP, 2000, p. 4401 – 44512.
- 9 Franco Jr., A.R., Obtenção de Revestimentos Dúplex por Nitretação sob Plasma e PVD-TiN em Aços Ferramenta AISI D2 e AISI H13, Tese de Doutorado, EPUSP, 178p., 2003.
- 10 Franco Jr, A.R., Pinedo, C.E., Tschiptschin, A.P.; Utilização da Nitretação sob Plasma como Pré-Tratamento ao Revestimento TiN-PVD na Geração de Superfícies Dúplex no Aço AISI H13, Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v. 5, p. 179-185, 2009.