

INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PAUSA NO PROCESSO DE NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DO AÇO FERRAMENTA ABNT H13

Sinval Pedroso da Silva, sinvalpedroso@yahoo.com.br¹
Alexandre Mendes Abrão, abrao@demec.ufmg.br¹
Anderson Junior dos Santos, ndersonsantos@hotmail.com¹
Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com²
Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC-UFGM), Av. Antônio Carlos, 6627, Campus Universitário, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270-901

²Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30480-000

Resumo: Os característicos fundamentais dos aços para ferramentas e matrizes de maior importância são: resistência ao desgaste, tenacidade e dureza a quente. Dureza a quente é fundamental para aplicações de aços rápidos e aços para matrizes para trabalho a quente, pois, além da alta dureza a temperaturas elevadas, é desejável alta resistência ao desgaste a essas temperaturas, ao mesmo tempo em que é imprescindível que sejam mantidas a forma e dimensões das ferramentas e matrizes. O processo de eletroerosão (EDM - Electrical Discharge Machining) é amplamente utilizado na usinagem de metais de geometrias complexas e de alta dureza como matrizes para fundição de ligas leves e de conformação mecânica. A nitretação é um tratamento termoquímico que possibilita melhora de propriedades mecânicas, como dureza, resistência à fadiga e desgaste, devido a tensões compressivas induzidas na superfície. O processo de Nitretação por Descargas Elétricas (NDE) surgiu como alternativa de tratar termoquimicamente e usinar simultaneamente. O objetivo principal deste trabalho foi nitretar por descargas elétricas o aço ferramenta para trabalho a quente ABNT H13 variando o tempo de pausa. Foi utilizada solução aquosa de ureia em água deionizada na concentração de 30 g/l, e eletrodo de cobre eletrolítico. Para caracterizar o material ABNT H13 e investigar as modificações superficiais resultantes após o processo NDE, foi utilizado técnicas de microscopia óptica, difração de raios X (DR-X) e ensaios de microdureza. Os resultados evidenciaram aumento de dureza na superfície e subsuperfície do aço ABNT H13 nitretado por NDE, em comparação ao substrato H13, que pode ser atribuído à presença de nitretos.

Palavras-chave: Aço ferramenta ABNT H13, DR-X, Microdureza, Nitretação por Descargas Elétricas (NDE), Tempo de pausa (T_{OFF}).

1. INTRODUÇÃO

Conforme Chiaverini (2015), os aços para trabalho a quente se dividem em cinco grupos: ao cromo; ao cromo-molibdênio; ao cromo-tungstênio; ao tungstênio; ao molibdênio. O grupo ao cromo-molibdênio apresenta baixo teor de carbono, de modo que se caracterizam por elevada tenacidade (portanto, excelente resistência ao choque) e baixa resistência ao desgaste. Os aços da classe 520 (tipos 520-H11, 521-H13 e 522-H12) são os mais empregados dentre os aços para matrizes em trabalho a quente.

Existem dois fatores fundamentais que possibilitam o atendimento das exigências de qualidade dos aços para ferramentas e matrizes: composição química e tratamento térmico. Os elementos de liga permitem a obtenção de maiores dureza e resistência a temperaturas elevadas, devido ao coalescimento dos carbonetos de liga quando sujeitos às condições de serviço das ferramentas (Chiaverini, 2015).

De acordo com Chang (2010) *apud* Wang *et al.* (2017), o H13 é um dos aços para trabalho a quente mais utilizado, principalmente em moldes de fundição, de forjamento e extrusão a quente. Este aço tem várias vantagens excepcionais, como alta temperabilidade, resistência à abrasão e tenacidade.

O aço ferramenta ABNT H13 é um aço ligado ao cromo-molibdênio-vanádio (% em peso: C 0,35; Mn 0,30; Si 1,00; Cr 5,00; V 1,00; Mo 1,50), de alta tenacidade, alta temperabilidade e dureza a quente. Apresenta boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas e ao choque térmico e, ótima usinabilidade. Segundo Kalpakjian e Schmid (2009) e Chiaverini (2015), o aço ABNT H13 é aplicado geralmente na fabricação de matrizes para fundição sob pressão,

matrizes de forjamento, punções, perfuratrizes e mandris para trabalho a quente, ferramental de extrusão a quente, lâminas de tesoura para corte a quente e demais aplicações de trabalho a quente sob condições de choque.

A nitretação ou formação de nitretos, conforme Chiaverini (2015) é um tratamento termoquímico de endurecimento superficial em que se introduz superficialmente no aço, até certa profundidade, nitrogênio, sob a ação de ambiente nitrogenoso, sob determinada temperatura. Os objetivos principais de realizar a nitretação são: obtenção de elevada dureza superficial; aumento da resistência ao desgaste e à abrasão; aumento da resistência à fadiga; melhorar a resistência à corrosão. De acordo com Callister Jr. e Rethwisch (2012) a camada superficial endurecida possui profundidade da ordem de um (1) mm e, é mais dura que o núcleo do material.

Segundo McGeough (1988), as principais propriedades que influenciam o desempenho dos materiais para eletrodo ferramenta são o ponto de fusão elevado (grafita) e alta condutividade elétrica (cobre). O autor afirma que o EDM é definido como o bombardeamento de íons e elétrons contra a superfície da peça que promove a retirada de material por sublimação, deixando uma cavidade com o formato do negativo do eletrodo ferramenta. Esse processo, considerado como processo não convencional de usinagem, tem se destacado como um dos mais utilizados na fabricação de matrizes e moldes metálicos, devido à complexidade geométrica e de fabricação desses moldes e matrizes.

Fredriksson e Hogmark (1995) pesquisaram a influência da temperatura do dielétrico em usinagem por descargas elétricas de aço ferramenta para trabalho a quente H13. Os dielétricos investigados foram o óleo de silicone, com base em um hidrocarboneto líquido e nitrogênio líquido; foram utilizados eletrodos de cobre e grafite. Os autores concluíram que nenhuma diferença significativa foi encontrada na espessura das camadas afetadas quando variando a temperatura, o dielétrico ou o material do eletrodo ferramenta.

Gill e Kumar (2015) pesquisaram sobre o efeito de parâmetros de usinagem por descargas elétricas na microdureza usando eletrodo ferramenta de cobre-cromo-níquel, fabricado pelo processo da metalurgia do pó. Os autores observaram que a polaridade do eletrodo ferramenta afeta a microdureza, sendo que polaridade negativa resulta em baixa microdureza. O resultado é bem compreendido pelo fato de que, quando a polaridade da ferramenta for negativa, a densidade de energia na ferramenta é maior do que na peça de trabalho. Uma ferramenta de alta densidade de energia resulta em alto desgaste da ferramenta, em maior porção de material do eletrodo ferramenta em relação à peça de trabalho. Mas a baixa densidade de energia na superfície da peça (anodo) produz uma zona fundida superficial que resolidifica rapidamente. Portanto, grande quantidade de material da ferramenta não pode efetivamente misturar com a superfície da peça para formar a liga de camada refundida. A polaridade positiva da ferramenta resulta em camada mais uniforme. Os autores concluíram que, nas condições definidas naquela pesquisa e utilizando o projeto de experimentos (DOE) pelo método Taguchi, o conjunto de parâmetros (polaridade positiva do eletrodo ferramenta, pico de corrente de 15 A, T_{ON} de 200 μs , ciclo de trabalho (DT) de 64% de pulso e tensão de descarga de 50 V), resultou em maior microdureza da superfície (139,7% maior que o substrato). Aumento este de dureza atribuído à formação de carbonetos contendo cromo na camada refundida.

De acordo com Chounde e Pawar (2014) no evento de descarga elétrica, há um fluxo de corrente através da distância entre o eletrodo ferramenta e a peça de trabalho. O conteúdo energético de uma única descarga elétrica (faísca) pode ser expresso como produto de $T_{ON} \times I_p$ (pico de corrente). A energia contida em uma pequena descarga elétrica remove uma fração do material da peça, deixando uma pequena cratera na superfície da peça. O aumento do valor de I_p aumentará a energia de descarga de pulso, o que, por sua vez, pode melhorar a taxa de remoção de material. Quanto maior o valor de I_p , a condição da distância entre o eletrodo ferramenta e a peça pode tornar-se instável com uma combinação imprópria de T_{ON} e o ciclo de trabalho. Ciclo de trabalho (DT) é a relação entre o tempo de pulso (T_{ON}) e o tempo total ($T_{ON} + T_{OFF}$). Como e quando a condição de descarga torna-se instável, é preciso reduzir o valor de I_p .

Conforme Klocke *et al.* (2016), a energia de descarga em EDM pode ser dividida em pulso de corrente e pulso de tempo, assumindo tensão de descarga constante. Determinando assim, o efeito principal sobre a profundidade de penetração ou espessuras das camadas zona refundida (ZR) e zona afetada pelo calor (ZAC). A relação entre espessura ZAC e tempo de pulso é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior o tempo de pulso, maior a espessura da ZAC.

Yan, Tsai, Huang (2005) e Camargo, Costa, Raslan (2009) investigaram o uso de EDM com solução de água deionizada e ureia como fluido dielétrico para avaliar as modificações superficiais ocorridas durante a usinagem de titânio. Seus resultados evidenciaram a formação de nitreto de titânio (TiN), com modificações superficiais nos corpos de prova, refletidas, principalmente, na melhoria da resistência ao desgaste, atrito e aumento de microdureza superficial e subsuperficial. O TiN foi formado na superfície usinada pelas reações químicas que envolviam elementos obtidos da peça de trabalho e do fluido dielétrico (solução de ureia) durante o processo EDM, concluíram os autores.

O processo de Nitretação por Descargas Elétricas (NDE) surgiu como alternativa de tratar termoquimicamente, por meio do enriquecimento superficial por nitrogênio disponível no fluido dielétrico, e de usinar simultaneamente através das descargas elétricas geradas no processo EDM.

Esta técnica de enriquecer superfícies com nitretos por meio de descargas elétricas foi pesquisada também por Raslan, Santos e Silva (2012); Silva (2012); Santos (2013), Raslan (2015), Pedroso *et al.* (2016), Pedroso (2016), Pedroso *et al.* (2017) onde se destaca a relevância tecnológica da pesquisa, pelo pedido de depósito de patente feito por Raslan, Santos e Silva (2012).

O objetivo principal deste trabalho foi nitretar por descargas elétricas o aço ferramenta para trabalho a quente ABNT H13 com valor TS (Transistor *Standard*) de quinze (15), que corresponde à corrente elétrica de 51,45 Amperes, e variando o tempo de pausa da máquina de eletroerosão (100, 150, 203 e 500 μs), com o intuito de investigar a configuração de parâmetro que resulta em melhor uniformidade de camadas (refundida e nitretada), maior espessura de camada nitretada e microdureza. Utilizou-se solução aquosa de ureia em água deionizada na concentração de 30 g/l, e

eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico. Para caracterizar o aço ABNT H13 e investigar as modificações superficiais resultantes após o processo NDE, foi utilizada técnica de microscopia óptica, difração de raios X e ensaios de microdureza.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Usinagem e Automação da Universidade Federal de Minas Gerais, Laboratório de Usinagem e Ajustagem do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e Laboratório de Materiais da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (campus Contagem).

2.1. Preparação de amostras para testes NDE, análise química, microscopia óptica e microdureza.

O material selecionado para eletrodo ferramenta foi o cobre eletrolítico, em função de sua alta condutividade térmica, elétrica e ampla aplicação no processo EDM. Para eletrodo peça foi selecionado o aço ferramenta para trabalho a quente ABNT H13.

Inicialmente foi realizado corte primário de uma barra cilíndrica de aço ABNT H13 (VH13ISO, Villares), estado de recebimento laminado a quente e recozido, material com seção transversal circular de 25,4 mm (1"). Corte realizado por meio de máquina serra de fita horizontal Timemaster SM200M, obtendo amostras com espessura de 13 mm, as quais foram faceadas nas extremidades com o uso de torno universal, resultando em amostras com 12 mm de espessura e diâmetro 25,4 mm.

Os eletrodos ferramenta foram definidos a partir de barra de cobre eletrolítico com seção transversal circular diâmetro 31,75 mm (1 1/4"), material conforme recebido. Inicialmente foi retirado, por meio de corte com máquina serra de fita horizontal Timemaster SM200M, amostras com comprimento de 42 mm. Por meio da operação de torneamento convencional, foi realizado a usinagem e esquadreamento das faces de cada amostra, resultando em comprimento final de 40 mm e diâmetro de 31,75 mm.

A análise química destes materiais (eletrodo ferramenta e eletrodo peça) foi realizada por meio de espectrometria de emissão óptica no Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais – LAMAT, SENAI FIEMG Itaúna.

2.2. Testes de usinagem e Nitretação por Descargas Elétricas

Os testes de usinagem e nitretação por descargas elétricas foram realizados em máquina EDM convencional por penetração, modelo ENGEMAQ EDM 200 NC série L, corrente elétrica nominal máxima de 60 Amperes. Este equipamento possui bandeja de trabalho, denominada de cuba principal, com aberturas lateral e frontal. Foi utilizado uma cuba auxiliar de aço inoxidável austenítico ABNT 304 adaptada no equipamento EDM 200 NC série L, com bomba de recirculação Asten série BK 120-60 com motor elétrico trifásico 60 Hz, 220 Vca, potência de 120 Watts (0,16 cv), vazão máxima de 62 l/min, rotação 3100 RPM, pressão máxima 7,0 m.c.a. (metros de coluna de água), altura de imersão 220 mm. O processo de limpeza empregado foi por jato lateral, do mesmo fluido dielétrico (solução de água deionizada e ureia 30 g/l), direcionado na região entre o eletrodo ferramenta e a peça, garantindo assim uma abrangência da superfície de trabalho. A ureia utilizada nesta pesquisa é do tipo P.A. (padrão analítico) para uso em laboratórios ou em indústrias e foi adquirida no mercado nacional. Eletrodo ferramenta com polaridade positiva (anodo) de cobre eletrolítico e eletrodo peça com polaridade negativa (catodo) de aço ABNT H13.

A Tabela 1 apresenta os dados principais e parâmetros operacionais selecionados no painel de controle da EDM 200 NC série L, os quais foram utilizados nesta pesquisa.

Tabela 1. Dados principais e parâmetros operacionais utilizados no processo NDE.

Parâmetro	Seleção
Concentração de ureia	30 [g/L]
Tempo de teste (cada amostra)	10 [min.]
Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva [+]
Tensão de trabalho, "erodindo"	~50 [V]
Corrente nominal de trabalho @ TS=15	51,45 [A]
Controle da distância entre eletrodo ferramenta e a peça	1,5*
Sensibilidade do servomecanismo	1,5*
TH (Transistor Hipuls)	1
Tempo de erosão	0,8 s
Tempo de afastamento periódico da ferramenta	2 s
Tempo de duração do pulso (fiscamento), T _{ON}	100, 500 [µs]
Tempo de pausa (intervalo do pulso), T _{OFF}	100, 150, 203, 500 [µs]

* Esses parâmetros foram ajustados diretamente no painel de controle da ENGEMAQ 200 NC.

2.3. Caracterização das amostras de aço ABNT H13

Para a caracterização inicial do aço ABNT H13, material conforme recebido, foram realizadas medições de dureza no substrato e análise química.

Após a produção das superfícies usinadas e nitretadas por NDE, as amostras foram embutidas e preparadas por técnicas metalográficas, sendo utilizado embutimento a quente por meio de embutidora Arotec PRE-40 automática, utilizando resina epóxi termo-endurecível carregada com minerais, de baixa contração e boa aderência tipo DuroFast Struers. Os ensaios de microdureza no aço ABNT H13 foram realizados por meio de microdurômetro automático Shimadzu modelo HMV-2T E, com software Easy Test HMV-AD versão 3.10 para obtenção de imagens capturadas por meio de câmera digital incorporada ao microdurômetro. Carga de 10 gf (98,07 mN) e tempo de 20 segundos foram utilizados para obtenção da impressão de dureza.

A presença de nitretos foi verificada por difração de raios x convencional, Bragg-Brentano ou θ -2 θ , em amostras de aço ABNT H13 (conforme recebido) e nitretadas por NDE, tendo como fluido dielétrico solução de água deionizada e ureia na concentração de 30 g/l. Efetuou-se a medição por difração de raios-X, perpendicularmente à superfície dessas amostras.

As especificações técnicas do difratômetro e os parâmetros de varredura utilizados estão descritos na Tab. 2.

Tabela 2. Especificações técnicas e parâmetros usados na DR-X θ -2 θ .

Parâmetro		Unidade
Radiação	CuK α	
Voltagem do tubo	40	kV
Corrente	30	mA
Modo de varredura	Tempo fixo	
Espaçamento	0,02°; 0,03°; 0,05°	
Velocidade de varredura	2,00	graus/minuto
Tempo de varredura por ponto	5	s
Ângulo inicial (2 θ)	30°	
Ângulo final (2 θ)	110°	

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise química realizada em amostras do aço ABNT H13 e eletrodo ferramenta em cobre eletrolítico estão apresentados na Tab. 3 e Tab. 4.

Tabela 3. Análise química (% em peso) por espectrometria óptica do aço ABNT H13.

Elemento químico	Concentração (%)	Incerteza +/- U 95%	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V _{eff})
Ferro (Fe)	91,1451			
Cromo (Cr)	4,7381	0,0051	2,23	12,014
Molibdênio (Mo)	1,2257	0,0101	2,25	11,678
Carbono (C)	0,3796	0,0090	2,11	25,379
Silício (Si)	0,9347	0,0128	2,00	infinito
Manganês (Mn)	0,3669	0,0023	2,00	infinito
Vanádio (V)	0,8016	0,0025	2,16	17,034
Cobre (Cu)	0,0583	0,0041	2,05	58,736
Outros	0,3500			

Observa-se que para a análise química foi utilizado fator de abrangência k, proporcionando um nível de confiança de aproximadamente 95%.

Nota-se a presença de elementos químicos como Cr, Mo os quais favorecem a nitretação. Os resultados apresentados na Tab. 2 corroboram com dados do fabricante Villares Metals: C 0,40; Si 1,00; Mn 0,35; Cr 5,20; Mo 1,5; V 0,90 (Silva, 2006).

Tabela 4. Análise química (% em peso) por espectrometria óptica do cobre eletrolítico

Elemento químico	Concentração (%)
Cobre	99,9024
Zinco	0,0222
Telúrio	0,0203
Cobalto	0,0141
Alumínio	0,0042
Níquel	0,0055
Carbono	0,0051
Outros	0,0264

Para caracterizar as camadas refundida (ZR) e nitretada (CN) foram realizadas microscopia óptica e medição de microdureza.

A Figura 1 apresenta os valores de microdureza Vickers de sete indentações realizadas nas camadas refundidas (ZR) e nitretadas (CN) de amostras ABNT H13 nitretadas por NDE com tempos de pausa (T_{OFF}) indicados, além de mostrar também o resultado de treze indentações de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) realizadas em substratos de amostras ABNT H13 indicou valor médio de $HV_{0,01} = 340,3 \pm 15,0$.

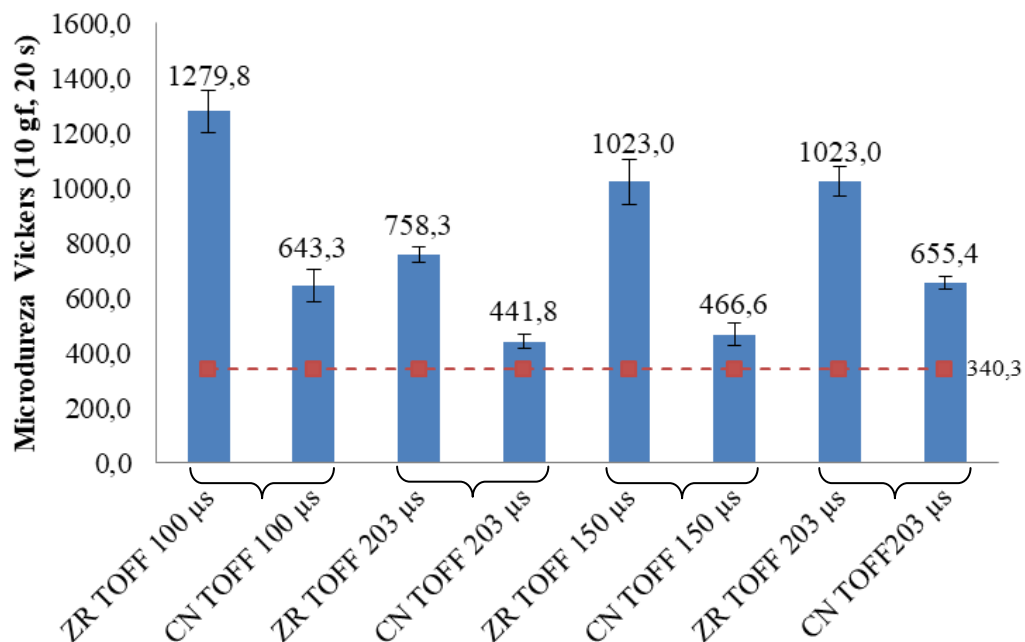


Figura 1. Microdureza Vickers média (10 gf, 20 s) das camadas refundidas (ZR), camadas nitretadas por NDE (CN) e substrato de amostras ABNT H13.

A Figura 2 apresenta seção transversal de amostra ABNT H13, nitretada por descargas elétricas com eletrodo de cobre eletrolítico e tempos de pausa (T_{OFF}) indicados, com indentações e perfil de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) realizados na superfície em direção ao núcleo das amostras. Ataque químico com reagente Nital 2%.

Observa-se maiores camadas refundida (ZR) e nitretada (CN) para amostra ABNT H13 nitretada por descargas elétricas utilizando parâmetros T_{ON} de 500 μs e tempo de pausa (T_{OFF}) 500 μs.

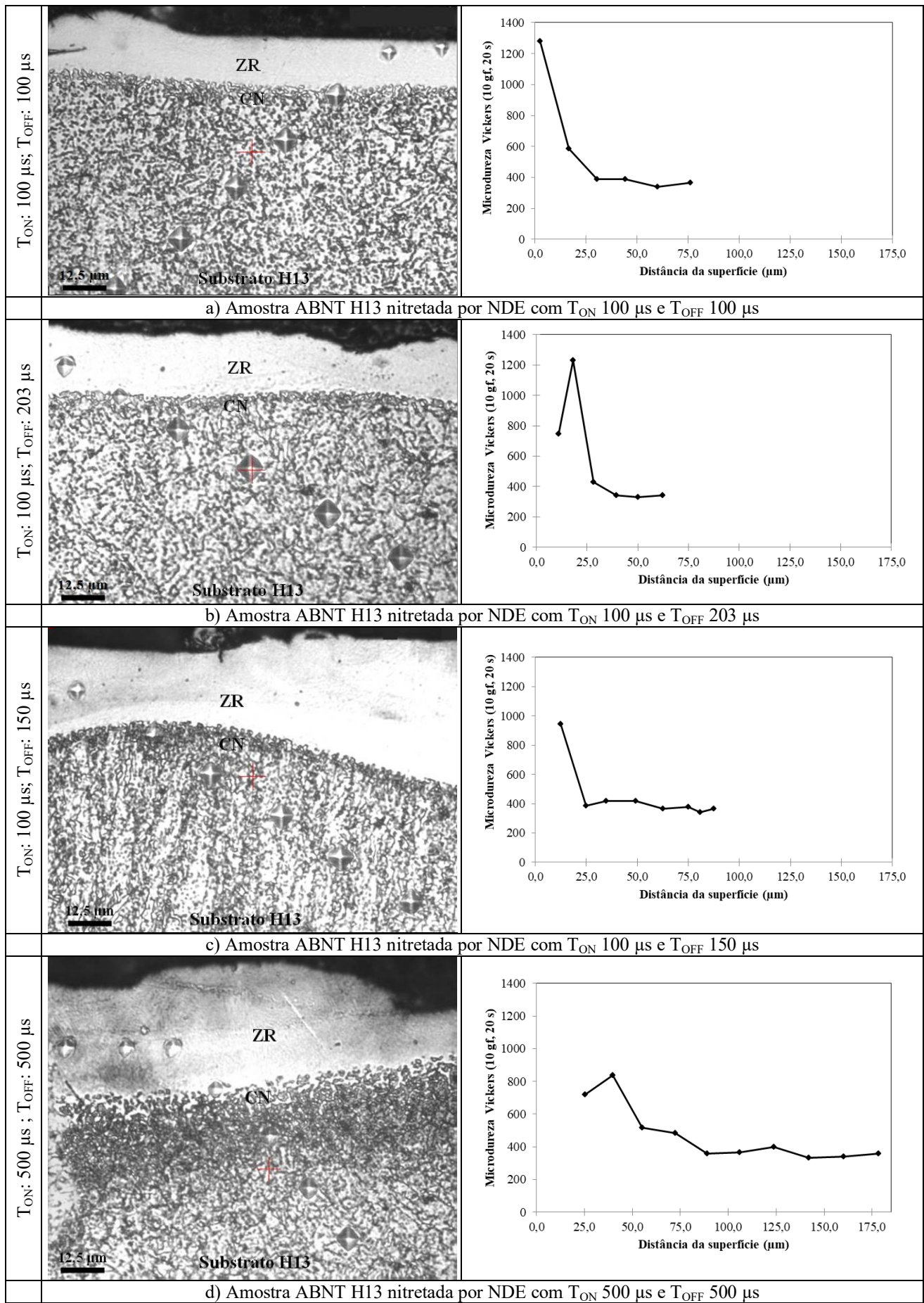


Figura 2. Perfil de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) realizado da superfície para o substrato de amostras ABNT H13 nitretadas por NDE com tempo de pausa (T_{OFF}) indicados.

A Figura 3 apresenta micrografias de amostras nitretadas por descargas elétricas com diferentes tempos de pausa (T_{OFF}). Ataque químico com reagente Nital 2%.

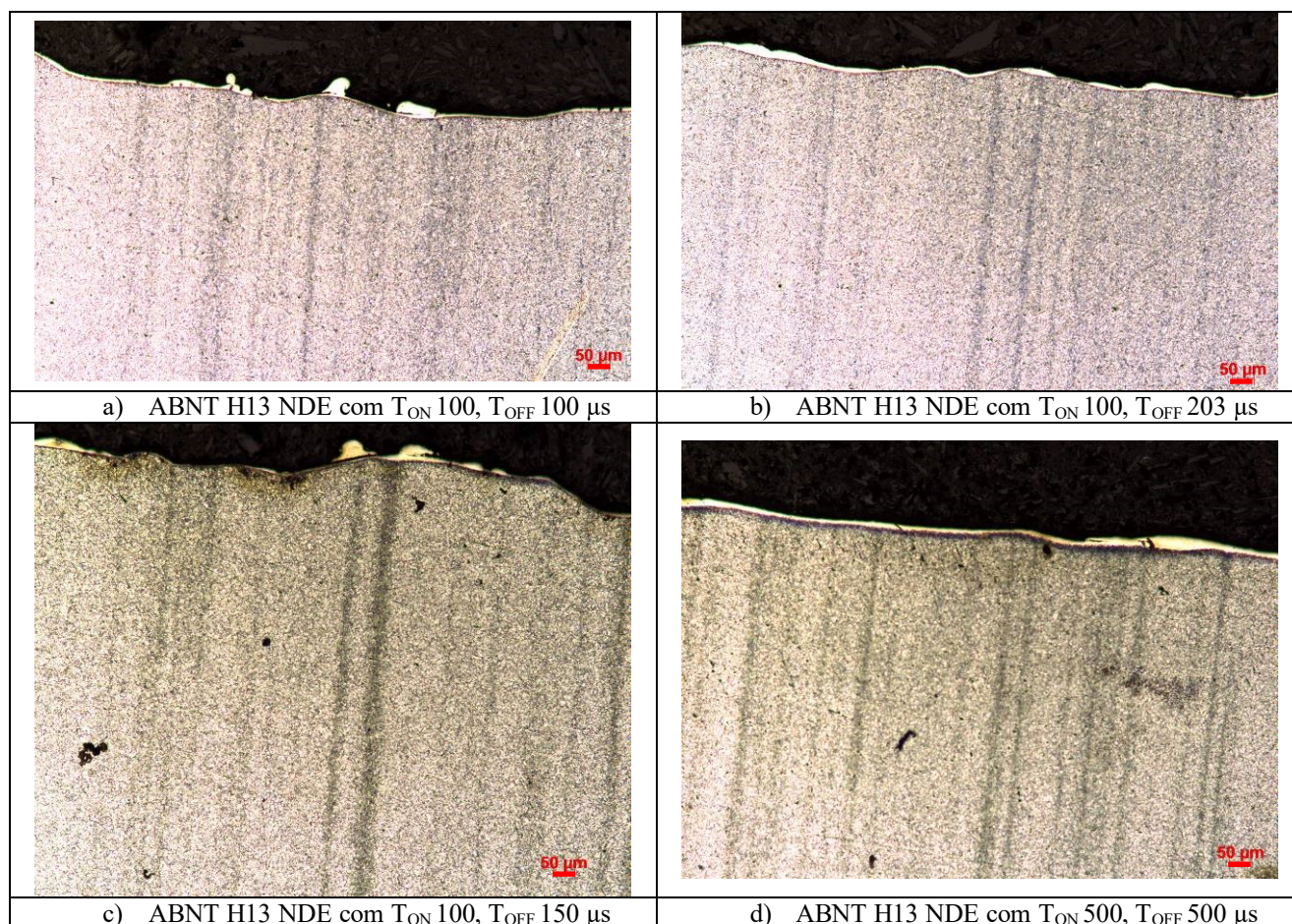


Figura 3. Micrografia de amostras nitretadas por descargas elétricas com diferentes tempos de pausa (T_{OFF}).

Observa-se camadas mais uniformes quando utilizado tempo de pausa maiores, evidenciados na Fig. 3b) e especialmente na Fig. 3d).

A Figura 4 apresenta difratograma de raios x, configuração θ -2 θ , realizado em substrato ABNT H13 e na camada refundida de amostras H13 nitretadas por descargas elétricas com diferentes tempos de pausa (T_{OFF}).

Nota-se o surgimento de alguns picos com θ -2 θ entre aproximadamente 50°, 75° e 90° para as amostras nitretadas por descargas elétricas com eletrodo de cobre eletrolítico, assim como mudança de picos com θ -2 θ entre 43°, 65°, 82,5° e 98°.

Observou-se durante os testes NDE que com os parâmetros utilizados a condição de distância entre eletrodo e a peça de trabalho tornou-se instável para valores de tempo de pausa (T_{OFF}) superiores a 100 μs , corroborando com Chounde e Pawar (2014) que afirmam que quanto maior o valor de pico de corrente (I_p), a condição de distância eletrodo e a peça pode tornar-se instável com uma combinação imprópria de T_{ON} e ciclo de trabalho (DT). Como e quando a condição de descarga elétrica torna-se instável, é preciso reduzir o valor de I_p .

A corrente elétrica definida no painel de controle da máquina EDM 200 NC foi de 51,45 Amperes (TS=15) e mantido este ajuste para todos os testes realizados nesta pesquisa.

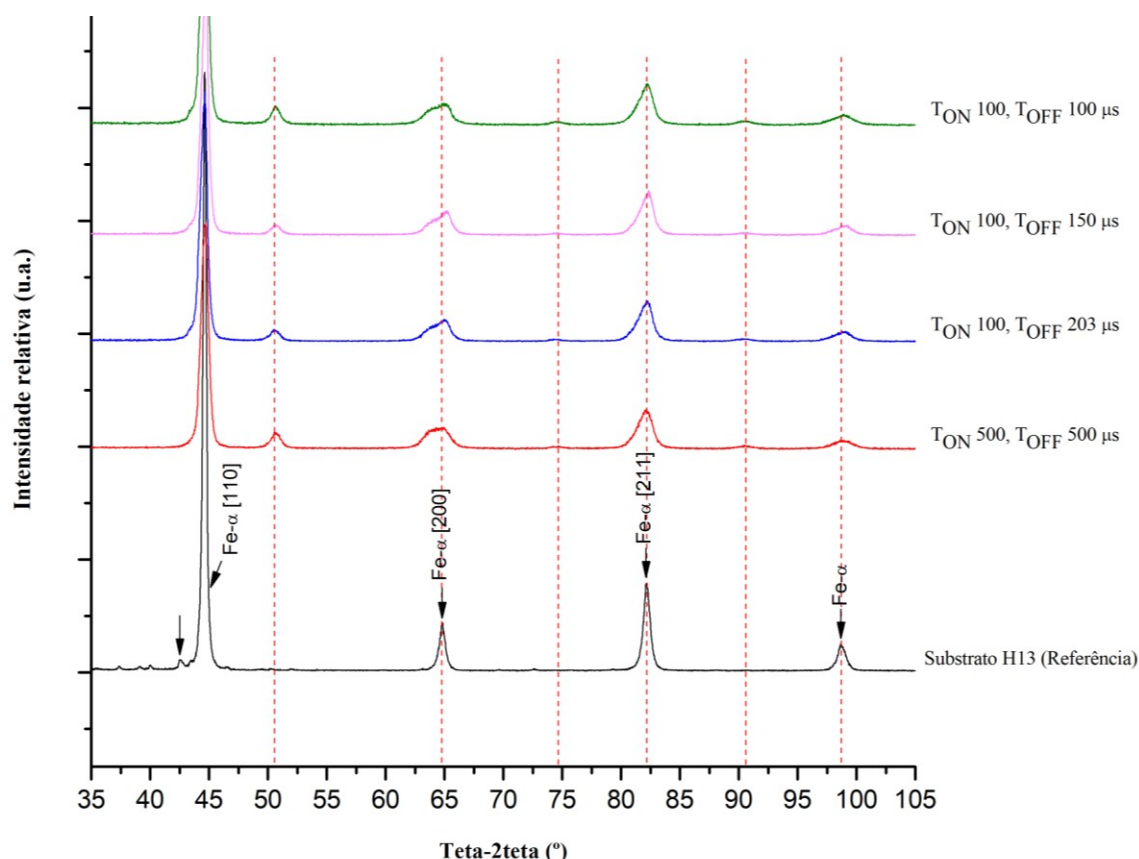


Figura 4. Difratoograma de raios x, configuração 0-20, realizado em substrato ABNT H13 e na camada refundida de amostras ABNT H13 nitretadas por descargas elétricas com diferentes tempos de pausa (T_{OFF}).

4. CONCLUSÕES

Os ensaios de microdureza evidenciaram ganho nos valores de dureza das camadas refundida (ZR) e nitretada (CN) em relação ao substrato ABNT H13, que pode ser atribuído à presença de nitretos.

Foi evidenciado por meio da técnica de difração de raios x, diferença de fases nas amostras ABNT H13 nitretadas por descargas elétricas na concentração de 30 g/l e com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico, em relação ao substrato.

Os resultados indicaram que o tempo de pausa exerce influência no processo NDE, com alteração de espessura e uniformidade das camadas refundidas (ZR) e nitretadas (CN).

A configuração de testes mais favorável para camadas mais uniformes foram: T_{ON} 100, T_{OFF} 203 µs e T_{ON} 500, T_{OFF} 500 µs, sendo este último apresentou maior espessura de camada (profundidade) e maiores valores de microdureza Vickers.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, pelo uso dos Laboratórios de Caldeiraria e Ajustagem. Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, pela permissão de uso do Microdurômetro Vickers. Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG pela disponibilização do laboratório de Usinagem para realização dos testes NDE.

6. REFERÊNCIAS

- Callister, W. D., Rethwisch, D.G., 2012, Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8. ed., Rio de Janeiro, LTC.
- Camargo, B. C., Costa, H. L. and Raslan, A. A., 2009, Endurecimento superficial de uma liga Ti6Al4V por meio de usinagem por descargas elétricas. Proceedings of the 5th Brazilian Congress of Manufacturing Engineering, Belo Horizonte, Brazil.
- Chounde, A. B., Pawar, M. M., 2014, Study of pulsed DC power supply parameters for Micro-EDM, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (An ISO 3297: 2007 Certified Organization) Vol. 3, Issue 10, ISSN (Print) pp. 2320–3765.

- Chiaverini, V., 2015, Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7.ed. ampliada e revista. - São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), 599 p.
- Fredriksson, G., Hogmark, S., 1995, Influence of dielectric temperature in electrical discharge machining of hot work tool steel, Surf. Eng. 11 (4), pp.324–330.
- Gill, A.S., Kumar, S., 2015, Surface alloying by powder metallurgy tool electrode using EDM process, Materials Today: proceedings 2, pp. 1723–1730.
- Kalpajian, S. and Schmid, S. R., 2009, Manufacturing engineering and technology, 6.ed., Pearson.
- Klocke, F.; Schneider, S; Ehle, L; Meyer, H; Hensgen, L; Klink, A., 2016. Investigations on surface integrity of heat treated 42CrMo4 (AISI 4140) processed by sinking EDM. Science Direct. In: 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII). Procedia CIRP 42. p. 580–585.
- McGeough, J. A., 1988, Advanced methods of machining, London: Chapman and Hall, pp. 128-152.
- Pedroso, S., 2016, Avaliação da resistência à fadiga axial do aço ABNT 4140 nitretado por descargas elétricas, Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET, Belo Horizonte, MG.
- Pedroso, S. , Câmara, M. A., Silva, E. R., 2017, Caracterização tribológica do aço ABNT 4340 nitretado por descargas elétricas.
- Pedroso, S., Freitas Filho, A., Santos, C.E., Nicesio, I.C., Santos, I.B., Carneiro, J.R.G. and Silva, E.R., Nitretação por descargas elétricas de corpo de prova para ensaio de fadiga em aço ABNT 4140 com matriz de cobre, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM, Fortaleza, CE, Brasil, 2016.
- Raslan, A. A., 2015, “Implantação iônica em meio aquoso por EDM: resistência ao desgaste de aço AISI 4140”. In: COBEF Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 8, Salvador, BA.
- Raslan, A. A., Santos, R. F. and Silva, E. R., 2012, Método de Nitretação através da usinagem com descargas - NDE. BR 10 2012 030523-2. Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG). Universidade Federal de Uberlândia (UFU).
- Santos, R. F., 2013, “Nitretação por EDM do aço AISI 4140”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 108 p.
- Silva, A.L.C. and Mei, P.R., 2006, Aços e Ligas Especiais. São Paulo: Edgard Blucher.
- Silva, E. R., 2012, “Otimização e Avaliação dos Parâmetros de Influência do Processo AJEDM”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 112 f.
- Wang, H., Li, J., Shi, C.-B., Li, J. e He, B., 2017, Evolution of Carbides in H13 Steel in Heat Treatment Process, Materials Transactions, Vol. 58, Nr. 2, pp. 152-156.
- Yan, B. H., Tsai, H. C. and Huang, F. Y., 2005, “The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, pp. 194-200.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

INFLUENCE OF THE PAUSE TIME IN THE NITRETATION PROCESS BY ELECTRIC DISCHARGES OF ABNT H13 TOOL STEEL

Sinval Pedroso da Silva, sinvalpedroso@yahoo.com.br¹

Alexandre Mendes Abrão, abrao@demec.ufmg.br¹

Anderson Junior dos Santos, ndersonsantos@hotmail.com¹

Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com²

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC-UFMG), Av. Antônio Carlos, 6627, Campus Universitário, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270-901

²Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30480-000

Abstract: *The fundamental characteristics of tool steels and dies of major importance are: wear resistance, toughness and hot hardness. Hot hardness is critical for High Speed Steel (HSS) applications and hot work tool steels because, in addition to high hardness at high temperatures, high wear resistance at these temperatures is desirable, while maintaining shape and dimensions of tools and matrices. The Electrical Discharge Machining (EDM) process is widely used in the machining of complex geometries and high hardness as matrices for light alloy casting and mechanical forming. Nitriding is a thermochemical treatment that allows the improvement of mechanical properties, such as hardness, fatigue resistance and wear due to compressive strength induced on the surface. The Electrical Discharge Nitriding (EDN) process emerged as an alternative to thermo-chemically treating and machining simultaneously. The main objective of this work was to nitrate the ABNT H13 hot work tool steel by electric discharges by varying the pause time (T_{OFF}) parameter and using aqueous solution of urea in 30 g / l deionized water and electrolytic copper electrode. To characterize the ABNT H13 material and to investigate the resulting surface modifications after the EDN process, optical microscopy, XRD techniques and microhardness tests were used. The results evidenced an increase in hardness at the surface and subsurface of the H13 steel nitrided by EDN that can be attributed to the presence of nitrites.*

Keywords: *ABNT H13 tool steel, x-ray diffraction (XRD), Microhardness, Electrical Discharge Nitriding (EDN), Pause time (T_{OFF}).*