

# ANÁLISE COMPARATIVA DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DE DIFERENTES FORNOS A VÁCUO NA TÊMPERA DO AÇO PARA TRABALHO A QUENTE AISI H13 <sup>1</sup>

Carlos Humberto Sartori <sup>2</sup>

Cassiano Martins de Miranda Horta <sup>3</sup>

Piter Alves Sousa <sup>4</sup>

## Resumo

Os equipamentos a vácuo com resfriamento por gás em alta pressão representam certamente o meio de têmpera mais indicado para a obtenção das propriedades mecânicas necessárias, microestruturas adequadas e mínimas distorções em ferramentas. O objetivo deste trabalho é demonstrar que, além da pressão de resfriamento ou tipo de gás utilizado na têmpera de aços em fornos a vácuo, os detalhes construtivos do equipamento também influenciam no resultado final do processo. Três modelos de fornos com diferentes tamanhos e aspectos construtivos foram utilizados para a têmpera de corpos de prova padrões em aço AISI H13, tratados termicamente utilizando-se ciclos devidamente customizados para o aspecto construtivo de cada tipo de equipamento, para a mesma especificação de dureza. O atendimento às propriedades especificadas foi verificado através de análises de dureza, análises metalográficas e ensaios de impacto, sendo que os ciclos utilizados e os ensaios realizados seguiram padrões e recomendações da norma NADCA#207-2006. Aspectos construtivos do equipamento como tamanho e formato da câmara, material do revestimento, modelo e potência do rotor e localização da entrada de gás de resfriamento devem ser analisados com cuidado na definição do processo de têmpera, onde a análise dos resultados mostra que o conhecimento técnico dos detalhes construtivos do equipamento a vácuo é essencial para a obtenção de resultados finais idênticos em corpos de prova padrão tratados em fornos distintos.

**Palavras-chave:** Fornos a vácuo; Tratamentos térmicos; Tenacidade; Aços para trabalho a quente.

## A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE DESIGN OF DIFFERENT VACUUM FURNACES ON THE HARDENING OF THE HOT WORK TOOL STEEL AISI H13

### Abstract

High pressure quenching vacuum furnaces represent certainly the best option for the hardening of tool steels, achieving the necessary mechanical properties, correct microstructure and low distortion in tools and dies. The purpose of this paper is to demonstrate that beyond the quenching pressure or the type of inert gas utilized, the constructive details of the equipment have great influence on the final results of the thermal process. Three different vacuum furnaces (size and design) carried out the hardening process of standard samples. These test samples were heat treated by customized thermal cycles based on the design of each equipment. The processes successes were analyzed through hardness tests, metallographic examination and impact tests. The heat treatment operations and the tests followed the NADCA#207-2006 recommendations. Constructive aspects of the equipment such as: its size, hot zone material, blower power and gas entrance localization must be considered during the hardness cycle definition. The results showed that the technical knowledge of the furnaces designs was essential to obtain identical results in samples heat treated in different furnaces.

**Key words:** Vacuum furnaces; Heat treatments; Toughness; Hot work tool steels.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 7º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 15 e 16 de julho de 2009, São Paulo, SP.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia de Metalurgia e Materiais, Coordenador da Célula Ferramentas da Bodycote Brasimet Processamento Térmico – São Paulo - SP.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, Supervisor de Manutenção de Fornos a Vácuo da Bodycote Brasimet Processamento Térmico – São Paulo - SP.

<sup>4</sup> Tecnólogo em Processos Metalúrgicos, Engenharia de Aplicação da Bodycote Brasimet Processamento Térmico – São Leopoldo - RS.

## 1 INTRODUÇÃO

A prática do tratamento térmico de ferramentas fabricadas em aço para trabalho a quente, como o AISI H13, em fornos a vácuo, requer um bom conhecimento do equipamento e das transformações de fase durante aquecimento e resfriamento da peça. Os ciclos de tratamento devem buscar a obtenção de microestruturas martensíticas, logicamente com presença muitas vezes inevitável de bainita, em toda a dimensão da ferramenta, evitando ao mesmo tempo, o excesso de tensões oriundas desta transformação.

Os parâmetros mais críticos do tratamento térmico de ferramentas em aço para trabalho a quente AISI H13 são: temperatura de austenitização e taxa de resfriamento a partir da temperatura de austenitização. A norma NADCA#207-2006 reconhece que existem diversos métodos para tratamento térmico de ferramentas em aço AISI H13, como banhos de sais e fornos com resfriamento em óleo sendo que, no entanto, a norma busca incentivar e definir parâmetros para o tratamento desse material em fornos a vácuo. <sup>(1,2)</sup>

Dentre os principais requisitos da norma NADCA podemos destacar:

- Equipamento: o tratamento deve ser realizado em fornos a vácuo com capacidade mínima de resfriamento com 5 bar de pressão de nitrogênio e controlador programável ligado a termopares que acompanham a carga, além de uma capacidade suficiente para resfriar a superfície da ferramenta a partir de 1030°C com uma taxa mínima de 28°C/min. <sup>(1,2)</sup>

O equipamento também deve ser capaz de realizar patamares isotérmicos a partir de informações dos termopares da superfície e núcleo, quando processos de têmpera interrompida forem solicitados.

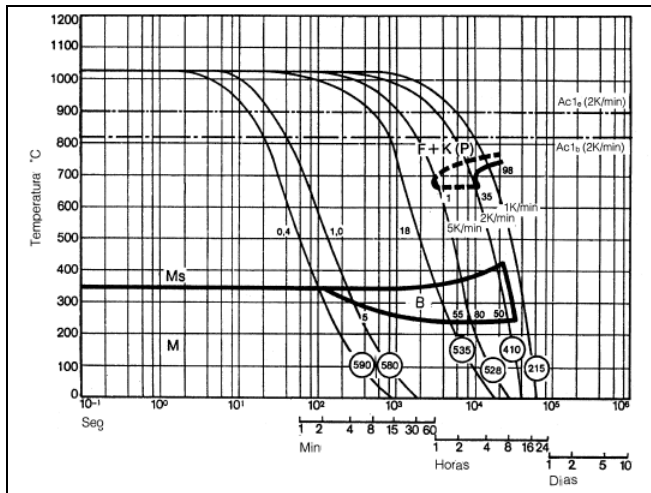
- Pré-aquecimentos: a norma recomenda velocidades de aquecimento inferiores a 220°C/hora e patamares próximos a 650°C e 845°C antes da temperatura de austenitização definida.

- Austenitização: deve ser realizada a 1.030°C (+/- 5°C) por um período de 30 minutos.

- Resfriamento: deve ser o mais rápido possível até 150°C, controlado pelo termopar do núcleo do corpo de prova, o qual simula a espessura média das peças dentro da carga.

A taxa mínima de resfriamento deve ser de 28°C/min entre a temperatura de austenitização e 540°C, controlada pelo termopar da superfície, isto é, a temperatura da superfície deve atingir 540°C em menos de 18 minutos, conforme Figura 1.

Esse resfriamento rápido visa evitar a formação de perlita e impedir a precipitação de carbonetos pró-eutetóides em contornos de grão. <sup>(1,2)</sup>

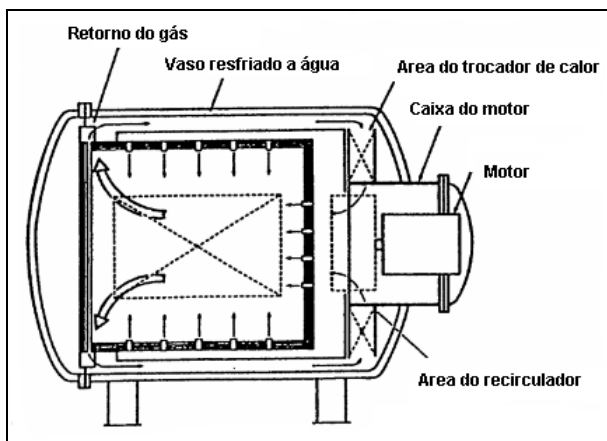


**Figura 1.** Diagrama CCT para o aço AISI H13.

Uma recomendação muito utilizada e de grande importância na redução de tensões internas de transformação é a interrupção da têmpera quando a temperatura da superfície encontra-se entre 455°C e 400°C. Essa interrupção se mantém durante 30 minutos ou enquanto a diferença entre a temperatura de superfície e a temperatura do núcleo for superior a 100°C. Após essa interrupção o resfriamento com gás pressurizado continua.

A norma ainda apresenta outras recomendações ligadas à montagem de carga, posicionamento de termopares e revenimentos que não serão abordados nesse texto.

Para o atendimento de todas essas importantes e sérias exigências de processo, o conhecimento básico da construção e funcionamento dos fornos a vácuo é essencial. Estes são capazes de produzir rápidas taxas de resfriamento pela injeção de gases inertes. A Figura 2 mostra o esquema típico de um forno a vácuo com resfriamento sob pressão.



**Figura 2.** Esquema construtivo típico de um forno a vácuo com resfriamento sob pressão.

Sabemos que nos processos em fornos a vácuo conduzidos acima de 850°C, o aquecimento utilizado é sob vácuo. O calor é transferido das resistências até a superfície da peça através de radiação, da superfície para o núcleo da peça a transferência ocorre por condução. Fazendo uma analogia, a transferência de calor por radiação ocorre através da luz, ou seja, podemos comparar as resistências de aquecimento com lâmpadas e as “paredes” da câmara quente com espelhos. Dessa forma fica clara a observação de que se alguma peça estiver à sombra de outra, essa não receberá a mesma quantidade de energia térmica da primeira. <sup>(3)</sup>

A temperatura do gás durante o resfriamento é controlada pela geometria do trocador de calor e pela distribuição do fluxo de gás ao redor dos componentes. O coeficiente de transferência de calor “h” para um determinado gás está relacionado à velocidade do gás “V” e sua pressão “P” através da equação:

$$h=C.(V.P)^m$$

Sendo “m” e “C” constantes dependentes do forno, tamanho da peça e configuração da carga.

Pela equação podemos verificar que o aumento de “P” ou de “V” provoca o mesmo efeito em “h”. No entanto, pelo ponto de vista técnico, aumentar a velocidade do gás exigirá muito mais do projeto do recirculador do que simplesmente efetuar o aumento da pressão. Para dobrar a velocidade do gás, a potência do recirculador deve ser multiplicada por oito, enquanto que para dobrar a pressão de resfriamento, a potência do recirculador deve ser multiplicada por dois. <sup>(4)</sup>

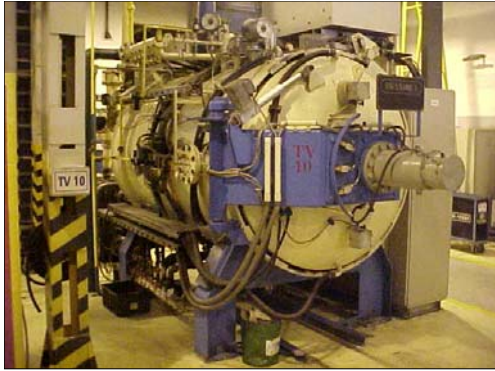
A transferência de calor também é função das propriedades do gás inerte utilizado. O baixo custo do nitrogênio faz com que ele seja escolhido no lugar de gases mais eficientes, como hidrogênio e hélio, na maioria das aplicações de têmpera a gás.

Outro ponto importante é a montagem de carga observando as possibilidades de fluxo do gás entre os componentes. Nos fornos com bicos injetores distribuídos, deve-se evitar que o perímetro da carga seja formado por placas que possam desviar o fluxo do nitrogênio, impedindo que este atinja diretamente as peças da região central e, nos fornos quadrados com sistema de comportas, evita-se colocar placas paralelas às comportas muito próximas a elas, pelo mesmo motivo já citado.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização desse trabalho, três fornos a vácuo de têmpera distintos foram escolhidos para simular o tratamento térmico de ferramentas em aço AISI H13:

- ♥ Forno ALD VKNQ 60/60/90, o qual possui dimensões de carga útil de 600x600x900mm, capacidade 600 kg, zona quente quadrada com 12 resistências cilíndricas longitudinais e espessura do revestimento de 48 mm. A potência de aquecimento é de 120 kW e a pressão de resfriamento de até 10 bar com recirculador de 200 kW de potência.



**Figura 3.** Forno a vácuo ALD VKNQ.

O resfriamento é executado através de basculamento e abertura de comportas na parte inferior e superior do cesto, de modo que o fluxo de nitrogênio hora é de baixo para cima e hora é de cima para baixo.

- ♥ Forno Degussa VKUQgr 60/60/90, o qual possui dimensões de carga útil 600x600x900 mm, capacidade 500 kg, zona quente redonda com 24 resistências cilíndricas distribuídas em 12 linhas longitudinais e espessura do revestimento de 40 mm. Potência de aquecimento de 130 kW, pressão de resfriamento de até 5 bar com recirculador de 110 kW de potência. O resfriamento é executado através da recirculação do nitrogênio que é retirado da câmara quente pelo centro das tampas frontal e traseira e, após passar pelo trocador de calor, impelido novamente contra a carga através de 64 bicos injetores.



**Figura 4.** Forno a vácuo Degussa VKUQgr.

- ♥ Forno Ipsen Turbotreater H54/48 - possui dimensões de carga útil 920x760x1220 mm, capacidade 2.000 kg, zona quente redonda com 36 resistências em forma de placa com 100 mm de largura distribuídas em 6 arcos circulares por toda a extensão da câmara e espessura do revestimento de 50 mm. Potência de aquecimento de 200 kW, pressão de resfriamento de até 10 bar com recirculador de 230 kW de potência. O resfriamento é executado através da recirculação do nitrogênio que é retirado da câmara quente pelo perímetro da tampa frontal e, após passar pelo trocador de calor, impelido novamente contra a carga através de 74 bicos injetores fixados em mufla de distribuição de gases por toda a parte cilíndrica da câmara e na tampa traseira.



**Figura 5.** Forno a vácuo Ipsen Turbotreater.

Para realização do experimento, foram utilizados corpos de prova de aço AISI H13 nas dimensões  $\downarrow$  100 x 15 mm com acabamento retificado, retirados da mesma barra com a composição química descrita na tabela 1 abaixo:

**Tabela 1.** Composições químicas dos aços utilizados no estudo

Elementos	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
%	0,38	0,92	0,32	5,10	1,48	0,86

Os corpos de prova acima descritos foram montados entre dois cilindros de dimensões  $\downarrow$  100 x 100 mm fabricados em aço SAE 1045 para assim simular uma peça com dimensões  $\downarrow$  100 x 215 mm.

O controle de temperatura entre a superfície e núcleo do conjunto foi realizado através da inserção de termopares, conforme Figura 6.



**Figura 6.** Detalhe do corpo de prova e montagem do conjunto com termopares na superfície e núcleo.

Os corpos de prova foram carregados no centro da carga de cada um dos fornos a vácuo e submetido aos seguintes ciclos de tratamento térmico descritos abaixo, objetivando-se faixa de dureza de 44 HRC a 46 HRC.

**Tabela 2.** Ciclo utilizado no Forno ALD VKNQ 60/60/90

SEG Nº	GRAD °C/H	RAMPA	DESVIO TOLERÂNCIA	TEMPO PATAMAR		PRESSÃO DE RESFRIAMENTO
				HORAS	MINUTOS	
1	600	600	50	0	15	-
2	500	850	30	0	15	
3	200	980	20	0	15	
4	200	1030	10	0	45	4 bar
<i>Revenimento 540°C – 3 horas</i>						
<i>Revenimento 600°C – 3 horas</i>						
<i>Revenimento 580°C – 3 horas</i>						

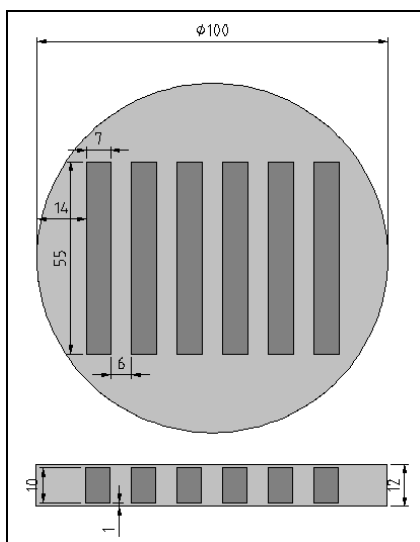
**Tabela 3.** Ciclo utilizado no Forno Degussa VKUQgr 60/60/90

SEG Nº	GRAD °C/H	RAMPA	DESVIO TOLERÂNCIA	TEMPO PATAMAR		PRESSÃO DE RESFRIAMENTO
				HORAS	MINUTOS	
1	600	600	50	0	15	-
2	500	850	30	0	15	
3	200	980	20	0	15	
4	200	1030	10	0	45	5 bar
<i>Revenimento 540°C – 3 horas</i>						
<i>Revenimento 600°C – 3 horas</i>						
<i>Revenimento 580°C – 3 horas</i>						

**Tabela 4.** Ciclo utilizado no Forno Ipsen Turbotreater H54/48

SEG Nº	GRAD °C/H	RAMPA	DESVIO TOLERÂNCIA	TEMPO PATAMAR		PRESSÃO DE RESFRIAMENTO
				HORAS	MINUTOS	
1	600	600	50	0	15	-
2	500	850	30	0	15	
3	200	980	20	0	15	
4	200	1030	10	0	45	3,6 bar
<i>Revenimento 540°C – 3 horas</i>						
<i>Revenimento 600°C – 3 horas</i>						
<i>Revenimento 580°C – 3 horas</i>						

A tenacidade foi avaliada em corpos de prova sem entalhe, com seção 7x10x55 mm, conforme norma NADCA. Foram removidos seis corpos de prova de impacto de cada amostra tratada no conjunto definido. A escolha de corpos de prova de 7x10x55 mm e a metodologia de retirada das amostras foram realizadas com base na norma NADCA#207-97, conforme Figura 7.



**Figura 7.** Detalhe da remoção dos corpos de prova de impacto da amostra tratada.

### 3 RESULTADOS OBTIDOS

#### 3.1 Taxas de Resfriamento

As taxas de resfriamento entre a temperatura de austenitização (1.030°C) e 540°C foram determinadas através da análise dos gráficos de processo gerados pelos registradores dos equipamentos:

**Tabela 5.** Resultados obtidos no processo de resfriamento

Equipamento	Tempo de resfriamento entre 1030°C e 540°C (min)	Pressão de nitrogênio utilizada (bar)	Taxa de resfriamento (°C/min)
Forno ALD VKNQ 60/60/90	12	4	38
Forno Degussa VKUQgr 60/60/90	15	5	32
Forno Ipsen Turbotreater H54/48	10	3,6	42

*Obs: Informações obtidas do termopar da superfície*

#### 3.2 Dureza Superficial

A dureza foi verificada no topo dos corpos de prova de impacto. Os valores apresentados abaixo representam a média de três pontos:

**Tabela 6.** Resultados de dureza HRC nos corpos de prova de impacto

Equipamento	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Forno ALD VKNQ60/60/90	45,2	45,6	45,0	44,9	45,0	45,7
Forno Degussa VKUQgr 60/60/90	45,1	45,0	44,6	44,4	44,9	45,4
Forno Ipsen Turbotreater H54/48	45,9	45,8	45,6	45,6	45,8	45,2



### 3.3 Tenacidade

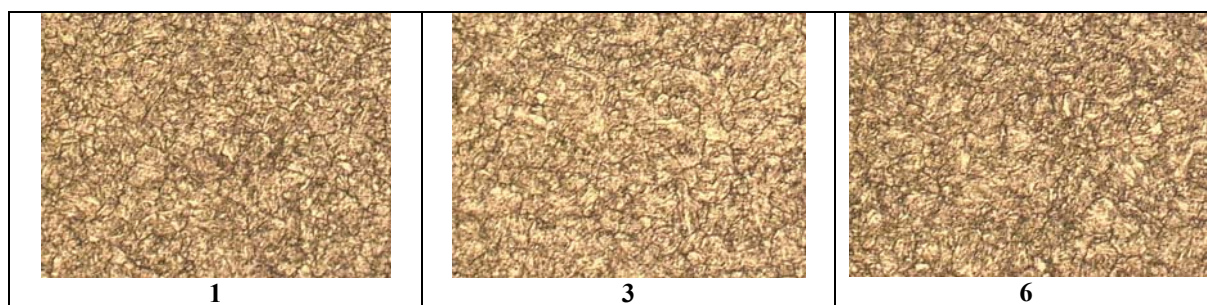
A Tabela 7 apresenta os resultados de impacto sem entalhe segundo NADCA#207-97 para cada um dos corpos de prova removidos das amostras tratadas nos três fornos a vácuo escolhidos para esse trabalho:

**Tabela 7.** Resultados de impacto em Joules nos corpos de prova de impacto

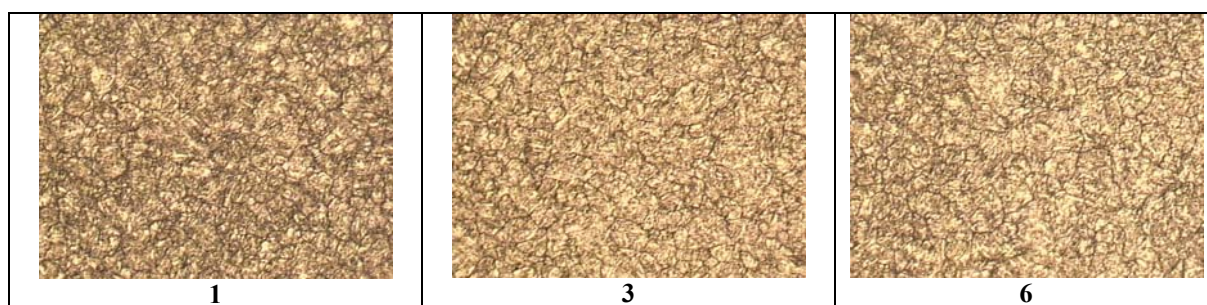
Equipamento	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Média	Desvio padrão
Forno ALD VKNQ 60/60/90	340	350	359	356	320	348	346	14,1
Forno Degussa VKUQgr 60/60/90	327	320	315	317	325	312	319	5,8
Forno Ipsen Turbotreater H54/48	357	352	365	365	352	351	357	6,5

### 3.4 Micrografias (Nital 3% - 200x)

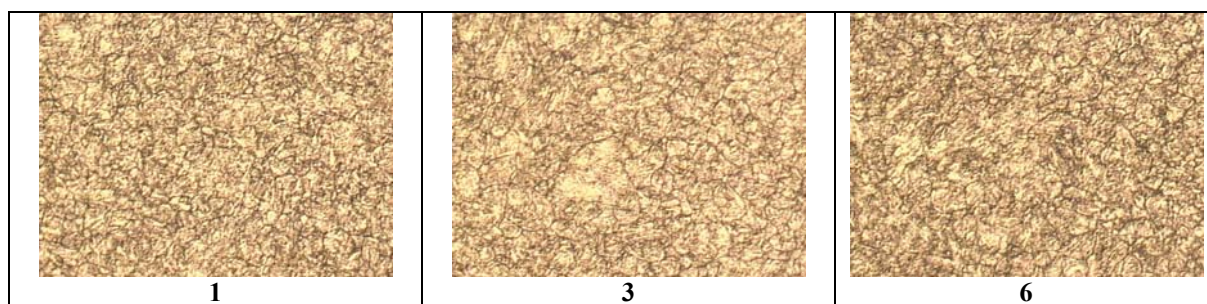
Para o ensaio metalográfico foram escolhidas amostras retiradas dos pontos 1, 3 e 6 (borda, meio e borda) do corpo de prova padrão. As micrografias estão apresentadas nas Figuras de 8, 9 e 10.



**Figura 8.** Forno ALD VKNQ 60/60/90 - Micrografias constituídas de martensita revenida



**Figura 9.** Degussa VKUQgr 60/60/90 - Micrografias constituídas de martensita revenida



**Figura 10.** Forno Ipsen Turbotreater H54/48 - Micrografias constituídas de martensita revenida

## 4 DISCUSSÃO

A tenacidade do aço ferramenta AISI H13 é uma propriedade chave para aplicações como forjamento e fundição sob pressão, onde a obtenção de microestruturas mais tenazes irá promover ganhos em relação à fadiga térmica e evitarão ocorrência de trincas frágeis em uso.

Para que a tenacidade do aço AISI H13 seja otimizada, as recomendações fornecidas principalmente em normas como a NADCA devem ser seguidas. A taxa de resfriamento é sem dúvida o ponto de maior atenção, onde o diagrama de resfriamento contínuo do aço AISI H13 indica que a precipitação de carbonetos pró-eutetóides começa aproximadamente a 787°C, após cerca de 1 minuto após o início do resfriamento. A curva de início da formação de bainita começa a partir de 15 minutos a 20 minutos, portanto qualquer descuido pode gerar microestruturas ou precipitações indesejáveis.<sup>(5)</sup>

A taxa de resfriamento de 28°C/min foi obedecida em todos os ciclos desenvolvidos para cada um dos equipamentos avaliados nesse trabalho e os resultados de tenacidade ao impacto avaliados com o uso de corpos de prova sem entalhe demonstram que os processos de têmpera desenvolvidos para os três equipamentos distintos foram adequados para obtenção de valores recomendados pela NADCA#207-97 em toda a extensão das amostras.

As microestruturas verificadas estão de acordo com o especificado pela NADCA, apresentando martensita revenida e ausência de bainita (que é permitida), perlita, austenita retida e precipitação excessiva. As durezas obtidas para as amostras ficaram propositalmente na mesma faixa de 45 HRC para comparação dos resultados de impacto e microestrutura.

Para o equipamento de maior dimensão, o Ipsen Turbotreater H54/48 cujo recirculador possui 230 kW de potência, a utilização de 3,6 bar de pressão de resfriamento de nitrogênio foi suficiente para gerar uma taxa de resfriamento de 42°C/min.

Já para o equipamento ALD VKNQ com recirculador de 200 kW de potência, a pressão de resfriamento de 4 bar promoveu uma taxa de 38°C/min.

O equipamento Degussa VKUQgr com recirculador menos potente (110 kW) obteve uma taxa de resfriamento de 32°C/min.

Verifica-se que para a carga em questão (igual para todos os fornos) não somente a pressão de resfriamento foi considerada no desenvolvimento do processo de têmpera. A potência do recirculador que promove o transporte do gás aquecido para o trocador de calor e o retorno desse gás (resfriado) de volta para a carga é uma variável muito importante.

## 5 CONCLUSÕES

Após a realização das análises do resultados obtidos, conclui-se que a utilização de pressões de 3,6 bar a 5,0 bar foi suficientes para obtenção de valores de tenacidade e microestrutura recomendadas pela NADCA em amostras padrão (∩ 100x215 mm) do aço AISI H13.

A definição da pressão a ser utilizada depende do bom conhecimento do equipamento, principalmente da potência do recirculador. Um processo desenvolvido em um dos equipamentos não pode ser simplesmente transferido para outro usando como parâmetro somente temperatura e pressão de resfriamento.

Embora não seja tema desse trabalho, a utilização de têmpera interrompida consiste no método mais seguro de tratamento térmico de ferramentas de grande porte, onde pode-se acelerar ao máximo o resfriamento até temperaturas acima do início da transformação martensítica para evitar precipitações indesejáveis, e manter posteriormente um patamar isotérmico para evitar excessivas tensões de transformação.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 NADCA Die Materials Committee. NADCA's Recommended Procedures for H-13 Tool Steels. Part II – Vacuum Heat Treatment of H-13 Tool Steel, 1997.
- 2 NADCA Die Materials Committee. Special Quality Die Steel & Heat Treatment Acceptance Criteria for Die Casting Dies, 2006.
- 3 Abar Ipsen. Abar Ipsen 'U' Training Manual. Vacuum Furnace Terminology and Units of Measure, p9-10, 2001.
- 4 Ruffle, T.W. e Byrnes Jr, E.R. Quenching in Vacuum Furnaces. Heat Treatment of Metals, p.81-87, 1979.
- 5 Wallace, J.F e Schwan, D. Improved Life of Die-Casting Dies of H-13 Steel by Attaining Improved Mechanical Properties and Distortion Control During Heat Treatment. Internal Report US Department of Energy, p.3.1-3.17, 1998.