



O FORNO A VÁCUO – TIPOS E TENDÊNCIA ¹

João Carmo Vendramim ²

Marco Antonio Manz ³

Thomas Heiliger ⁴

RESUMO

O tratamento térmico de ligas ferrosas de média e alta liga já utiliza há muitos anos a tecnologia de aquecimento em vácuo e resfriamento com gás nitrogênio sob determinada pressão. Essa utilização crescente se deve a excelente performance no endurecimento dessas ligas devido ao uniforme aquecimento e resfriamento. O forno a vácuo vem sofrendo melhorias tecnológicas para, por exemplo, o tipo de revestimento, seção da câmara de aquecimento / resfriamento, sistema de resfriamento e periféricos como suportes, controles automáticos, interface com a “web”, sempre perseguindo o objetivo de conferir o melhor resultado metalúrgico.

O presente trabalho faz uma breve discussão das versões de fornos com essa tecnologia de aquecimento para o tratamento térmico de aços-ferramenta e para o tratamento térmico de aços baixa liga e alta resistência mecânica do grupo HSLA (high strength low alloy).

-
- (1) – Contribuição Técnica para o Seminário “Temas de Tratamento Térmico” - 2006
 - (2) – Engenheiro Metalurgista, MSc – Sócio-Gerente da Isoflama Ind.Com.Equips.Ltda
 - (3) – Engenheiro Mecânico – Sócio-Gerente da Isoflama Ind.Com.Equips.Ltda.
 - (4) – Administrador – Sócio-Gerente da Isoflama Ind.Com.Equips.Ltda.



1. Introdução

Fornos a vácuo são utilizados na indústria de ferramentas, aeronáutica, energia, eletrônica, e outras envolvidas com o tratamento térmico de aços. Os fornos a vácuo são largamente utilizados em função da excelente performance no endurecimento de aços de alta, média e baixa liga, assegurando rápido e uniforme aquecimento e resfriamento. Um outro aspecto importante da tecnologia do forno vácuo é permitir automatização, padronização de processos, repetibilidade de resultados e a não agressão ambiental.

Os fabricantes de fornos a vácuo disponibilizam dois tipos de fornos às indústrias: forno horizontal e vertical, sendo que o forno do tipo horizontal pode ser encontrado em duas versões: forno de retorta retangular; e forno de retorta cilíndrica.

O presente trabalho faz uma breve discussão das versões de fornos com essa tecnologia de aquecimento para o tratamento térmico de aços-ferramenta e para o tratamento térmico de aços baixa liga e alta resistência mecânica do grupo HSLA (high strength low alloy).

2. Fornos a vácuo de câmara de aquecimento retangular

A Figura 1 apresenta um forno de câmara retangular. A introdução do gás nitrogênio de resfriamento ocorre a uma pressão de 1 MPa (10bar) através de uma portinhola acima, ou abaixo, da carga, sendo que a direção é alterada a cada 20, ou 30, segundos. Esse tipo de resfriamento é conhecido como reversível.



Figura 1 – Forno a vácuo com câmara de seção retangular. Foto SW

A introdução do gás nitrogênio ocorre por toda a seção transversal, a qual é comparável com a superfície horizontal da seção da carga, conforme mostra a Figura 2a.

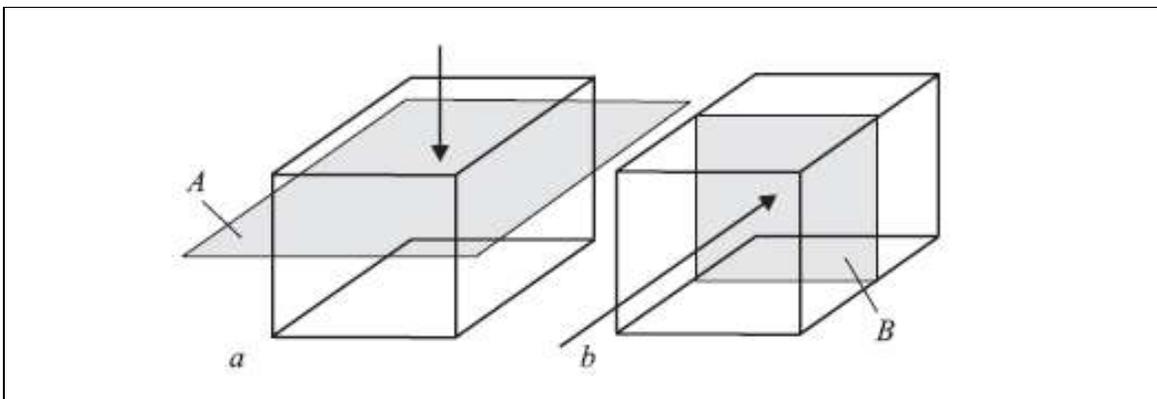


Figura 2 – Direção da circulação do gás de resfriamento: a) forno com câmara de seção retangular; b) forno com seção cilíndrica.

Em princípio é impossível assegurar velocidade linear uniforme do gás de circulação através da seção transversal da carga. Para melhorar a circulação no forno a vácuo, uma cortina ou outros elementos estruturais são construídos para quebrar o fluxo de gás na entrada e saída da portinhola. Essa solução em combinação com a introdução reversível do gás na carga



(primeiro pelo topo e depois pela base) melhora em certo grau a uniformidade do gás introduzido e o resfriamento da carga, embora o princípio da reversibilidade (a intervalos de 20s) cause alguma não uniformidade por si só. Quando o gás é introduzido a baixa velocidade, uma considerável parte dele passa através do espaço entre a carga e a parede da câmara de aquecimento, contornando a carga, prevenindo a criação de uma significativa taxa de gás circulante no volume inteiro da carga. Denso assentamento da carga promove uniformidade de circulação da massa de gás através da carga. Se a carga não for densa, por exemplo, consiste de peça individual, as condições de circulação uniforme são pioradas.

Alguns fabricantes tentam melhorar a velocidade linear equipando os fornos com circulador de gás com elevado volume de eficiência na fase crítica do ciclo de resfriamento. Entretanto essa solução não é simples porque exige uma máquina poderosa para o circulador, além de criar problemas com a fonte de energia e incrementar os custos do sistema.

Qual é a velocidade linear do gás de circulação para as possibilidades do forno a vácuo? É conhecido que o coeficiente de transferência de calor α [$V/m^2 - K$] responsável pela taxa de resfriamento da carga depende da velocidade linear do gás w [m/s] e da pressão do gás de resfriamento p [bar], de acordo com a equação:

$$\alpha = C \cdot w^{0,7} \cdot p^{0,7} \cdot \eta^{-0,39} \cdot C_p^{0,31} \cdot \lambda^{0,69}, \quad [1]$$

onde η é a condutividade térmica, C_p é a capacidade de calor específico e λ é a densidade. Esses parâmetros caracterizam o tipo de gás de resfriamento.

O incremento da velocidade linear, por exemplo, de 6 para 10m/s causa o mesmo efeito dentro dos contornos da carga que o crescimento da pressão do gás de resfriamento de 6 para 10 bar.



Fornos com câmara retangular de aquecimento satisfazem as exigências de tratamento térmico dos aços-ferramenta de baixa e média liga. A produção dos fornos de câmara retangular exige menos tempo e menor custo que os fornos de câmara cilíndrica.

3. Fornos a vácuo de câmara de aquecimento cilíndrica

O sistema de aquecimento convectivo desenvolvido pela Seco-Warwick tem sido utilizado há dez (10) anos nos fornos a vácuo. Os fornos com câmara cilíndrica, conforme Figura 3, e bocal para alimentação do gás de resfriamento para a região da carga são caracterizadas pela introdução uniforme deste gás para superfície das peças da carga. A velocidade linear do gás deixando o bocal é reduzida no espaço de trabalho da carga e então o gás passa através da carga sobre o seu eixo isto é, através da seção B, conforme ilustra a Figura 2b. Essa seção é muito menor que a mostrada pelo plano A da Figura 2a do forno de câmara com seção retangular. Esse “truque” assegura maior velocidade linear na região da carga que permite desenvolver elevadas taxas de resfriamento. O gás é introduzido através de bocais arranjados em torno da carga e na parede frontal da câmara de aquecimento. O gás quente alcança a parede de trás do forno. A uniformidade de resfriamento afeta os parâmetros da zona de saída dos gases quentes na câmara.

Uma solução simples de engenharia para os fornos de câmara com seção retangular consiste no arranjo da zona de saída dos gases quentes sobre o perímetro da superfície de contato da câmara de aquecimento e a parede do forno, conforme mostra a Figura 4a.



Figura 3 – Forno a vácuo (com porta aberta) de câmara cilíndrica.

Nesse caso, a circulação do fluxo de gás sobre o eixo da carga não alcança o fim do comprimento. Isso incrementa os parâmetros de circulação do gás através da carga, mas cria certa não uniformidade de circulação a qual é mais considerável do que no melhor forno com câmara de seção retangular.

Nos fornos com câmara cilíndrica a zona de aspiração do gás é posicionada no centro do eixo da carga, a qual torna possível manter a circulação do fluxo de gás na região da carga sobre o comprimento inteiro. Essa aproximação tem resultado na criação de fornos cilíndricos com máxima e uniforme taxa de resfriamento. A Figura apresenta os resultados de testes de resfriamento em uma carga consistindo de barras de aço sob resfriamento de nitrogênio sob a pressão de 10bar. O teste foi desenvolvido numa câmara 600x600x900 mm de tamanho. A carga considerada foi de 220 barras de diâmetro 25 mm por 300 mm com peso líquido de 340 kg. Para tais condições de carga o coeficiente λ mostrou ser de 0,6!

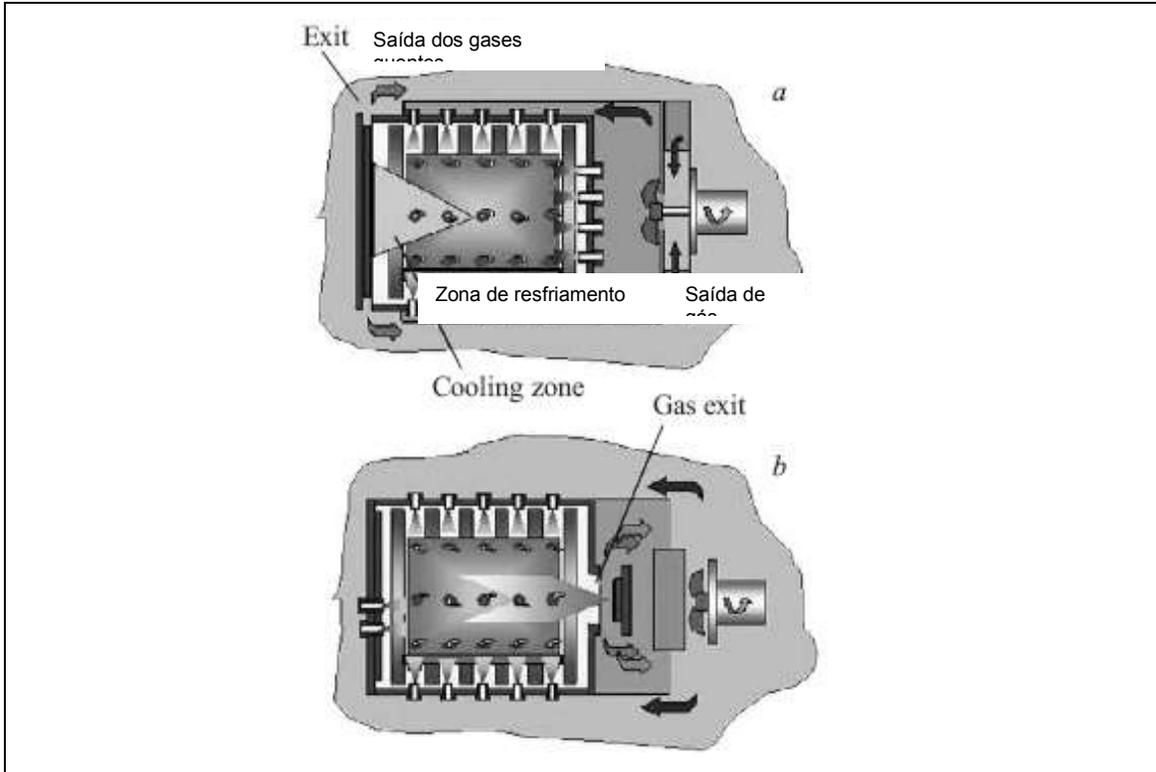


Figura 4 – Diagrama do fluxo de gás na câmara a) convencional; e b) câmara de projeto SW

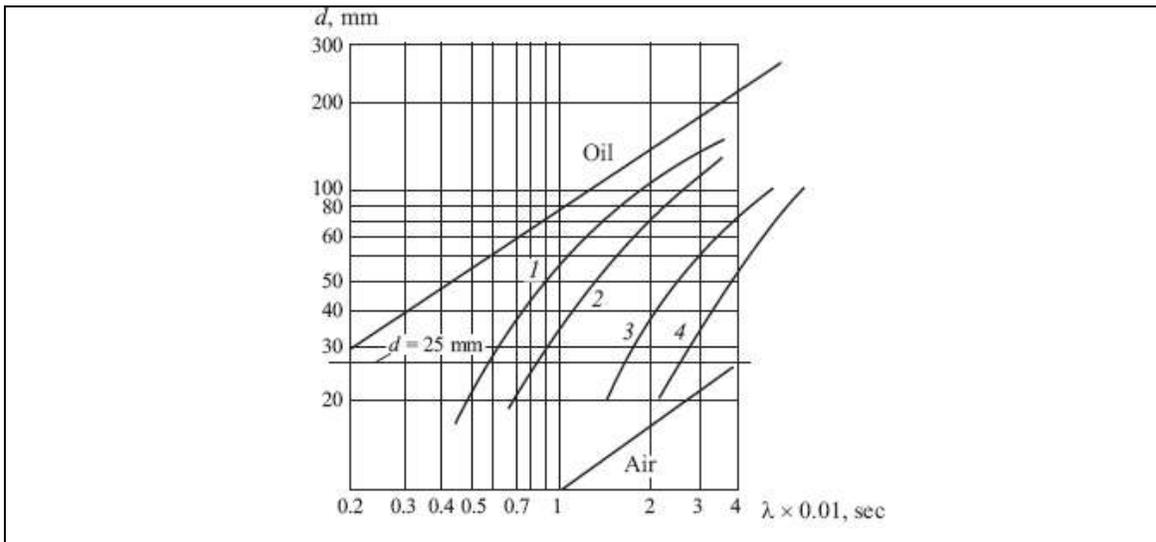


Figura 5 – Condições de resfriamento da carga (barras de aço de diâmetro d) em óleo, ar e nitrogênio sob pressão de 10 bar, forno de câmara cilíndrica (1, 3); forno com seção retangular (2, 4); λ 1, 2 para resfriamento de 800 a 500°C; λ 3 e 4 para resfriamento de 1000 a 200°C



É natural associar o resfriamento com certa não uniformidade. Para o teste em questão isso é apresentado na Figura 6. Por comparação, pode-se afirmar que o melhor projeto com tipo reversível de resfriamento é para $\lambda = 0,8$ (Figura 5). Nesse caso a carga também consiste de peças com diâmetros de 20, 50, 75 e 100 mm, às quais foram dados valores de λ (no meio da peça) na Figura 5.

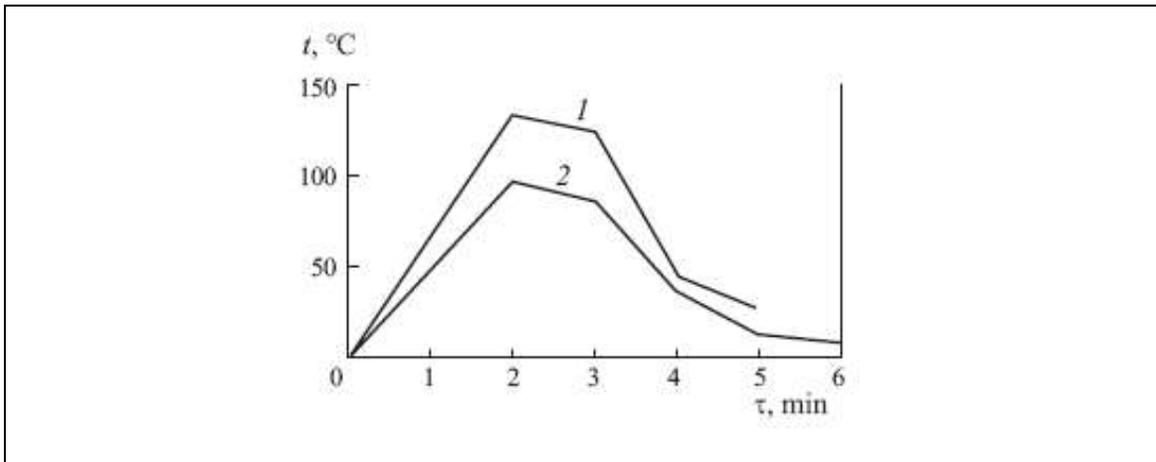


Figura 6 – Uniformidade da distribuição de temperatura no processo de resfriamento da carga de 340 kg em barras de 25x300 mm. Câmeras de dimensões 600x600x900 mm com seções (1,2) retangular e cilíndrica, respectivamente

Os fornos da SW possuem a mais elevada taxa possível de resfriamento e um máximo de uniformidade no volume total de uma carga densa ou porosa. Uma grande faixa de tamanhos padronizados permite escolher o forno com requisitos de saída específica para modos de tratamento térmico.

4. APLICAÇÃO DE FORNOS A VÁCUO COM CÂMERA DE SEÇÃO CILÍNDRICA

4.1 – Tratamento térmico de moldes e matrizes de aços em alta temperatura



Forno a vácuo com seção cilíndrica de aquecimento são especialmente vantajosos para endurecimento de moldes e matrizes. Matriz em aço H13, dimensão 406x406 mm, diâmetro 400 mm, peso 530 kg aquecida em um forno com câmara de seção útil 600x600x900 mm e 9 bar de gás de resfriamento consegue uma taxa de resfriamento de 80 K/min; e essa mesma matriz numa câmara de seção 900x800x1200m, a taxa de resfriamento com 9 bar de pressão é de 50 K/min.

O tratamento térmico de aços-ferramentas sempre requer uma transformação isotérmica uniforme. Isto é assegurado pelo rápido resfriamento a uma temperatura acima da transformação martensítica e manter a temperatura até o momento em que as temperaturas de superfície e núcleo se nivelem. Em seguida a carga é resfriada passando pela zona de transformação martensítica, ou então mantida nessa zona para transformação bainita completa. Esse processo resulta em ótima tenacidade, microestrutura e mínima tensão residual. O processo de endurecimento isotérmico pode ser controlado automaticamente.

4.2 – Tratamento térmico de ferramentas

Na presente data o tratamento térmico de ferramentas é desenvolvido em fornos a vácuo com gás de resfriamento sob pressão de 10 bar. Até recentemente o processo era desenvolvido em fornos com gás de pressão de resfriamento 6 bar, ou mesmo até recentemente com 2 bar. Os fornos com pressão de resfriamento de 10 bar atendem as exigências da indústria de ferramentas.

4.3 – Tratamento térmico de peças em aço HSLA

No tratamento térmico de ferramentas de aço-ferramenta a taxa de resfriamento obtida do gás de resfriamento de 10 (12) bar é muito



importante só para faixas de temperaturas superiores. Para aços do tipo HSLA (veja Tabela 1), essa taxa tem de ser preservada até 200°C (Figura 5). Isso é conseguido na têmpera de aços 300M e 4340M na pressão de resfriamento de 6 bar e mais alta. Por exemplo, o corpo de distribuidores hidráulicos 220x140x65 mm de tamanho de aço 4340 com uma massa de uma parte sobre 8 kg são tratados termicamente em nitrogênio sob pressão de 9 bar. O peso líquido da carga é 400 kg. Depois da têmpera a dureza de superfície é de 52 – 54 HRC e após revenimento a 450°C é de 42 – 44 HRC.

Tabela 1 – Dureza de aços após têmpera e revenimento

Tipo de aço (AISI)	Dureza HRC
4130	26 – 28
4135	37 – 40
4140	46 – 48
4340M	55 – 57
300M	59 - 61

Nota: Os resultados de dureza foram obtidos em peça com 40 mm de diâmetro depois de NITRETAÇÃO (?) a 5 atm.

5. FORNOS ESPECIAIS

São fornos especiais da SW com câmara de aquecimento de diâmetro 1500 por comprimento 1500 mm e carga máxima de 2000 kg. Esses fornos são utilizados para o tratamento térmico de moldes e matrizes de grandes dimensões (seções da ordem de 150 mm e diâmetro superior a 1.500 mm) construídas em aço tipo DN 1.4034 e a SAE 4340 e utilizadas em prensa de granulados para animais e outros processos industriais. Esses fornos são caracterizados pela grande uniformidade de aquecimento devido a utilização de largos elementos planos de aquecimento arranjados a 360° em torno da carga, soleira e no teto da câmara. Aquecimento por convecção



é utilizado a baixa temperatura e para assegurar uniforme aquecimento no ciclo isotérmico o projeto envolve rotação da soleira com a carga durante resfriamento. Tratamento térmico nesses fornos consegue mínima deformação e dureza final para um nível não inferior do que 54 – 56 HRC para aço 1.4034; 50 HRC para aço AFNOR 36NCD1'6 e 48 HRC para aço 1.4021. A SW produziu, em anos recentes, seis (6) fornos desse tipo para vários países.

6. FORNOS COM AQUECIMENTO CONVECTIVO

É importante utilizar aquecimento convectivo para cargas aquecidas em faixa de baixa temperatura. A SW possui um sistema desenvolvido para aquecimento convectivo de fornos com Kon Flap® de câmara com seção cilíndrica. A combinação do sistema convectivo de aquecimento com os elementos planos de aquecimento com grande superfície e carga de superfície específica arranjada em torno da carga em um forno é uma tecnologia SW que assegura rápida e uniforme aquecimento da carga. A Figura 7 apresenta curvas de aquecimento comparativas para uma carga em vácuo e sobre condições de aquecimento convectivo.

Um forno a vácuo equipado com um sistema para aquecimento convectivo tem melhorado o desempenho devido ao acelerado aquecimento da carga (especialmente cargas densas) na faixa de 750 – 800°C e combina endurecimento e temperaturas repetidas das ferramentas em um processo de projeto (+-5°C) e igualar acurada distribuição da temperatura.

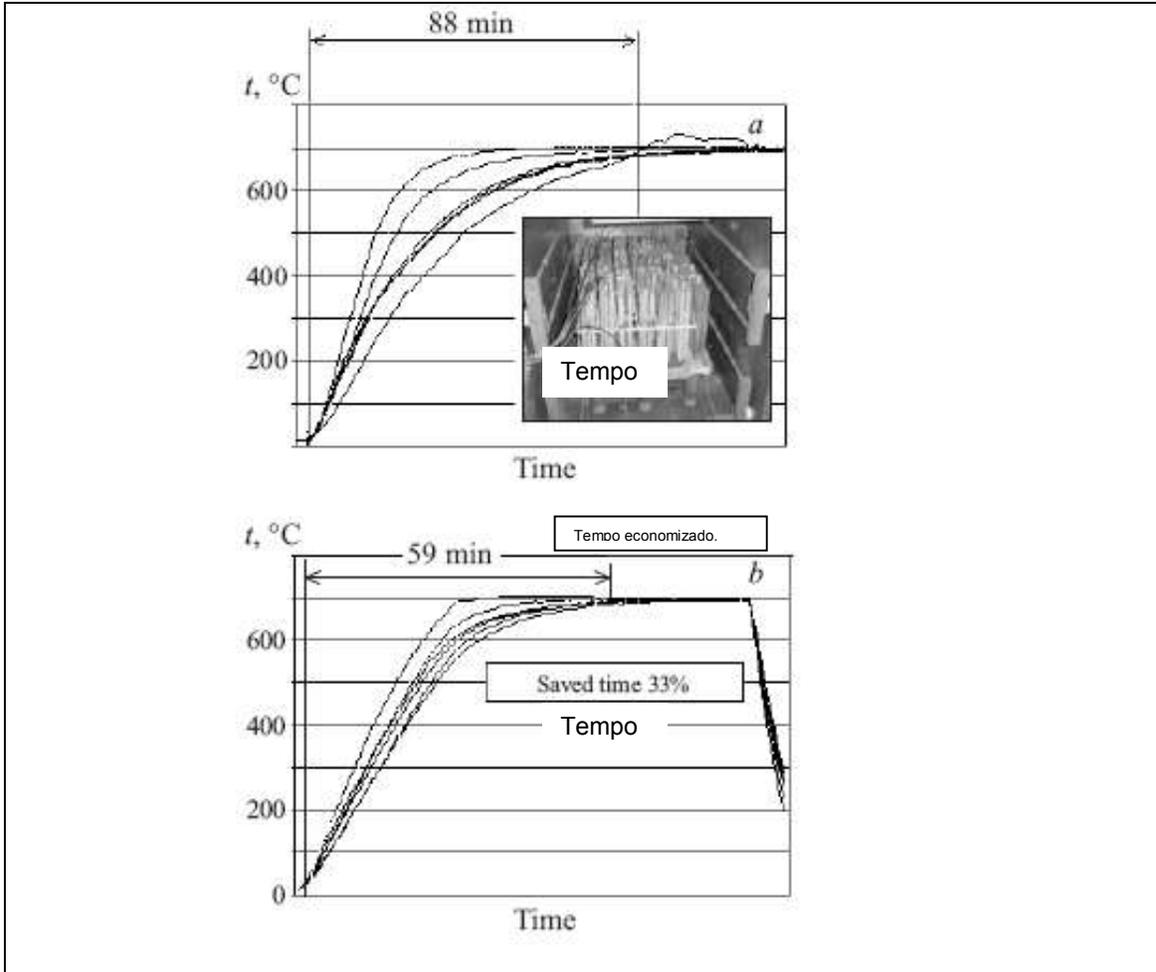


Figura 7 – Curvas de aquecimento para uma carga em vácuo (a) e sob condições de aquecimento convectivo (b) marcado para leituras de oito termopares montados em diferentes lugares da carga

O meio da carga de trabalho permite endurecimento no mesmo forno. Na produção com alta carga de trabalho o forno a vácuo (processos de tratamento térmico em alta temperatura) pode ser desenvolvido e maneira menos onerosa num forno a vácuo especial. Para esses propósitos a SW produz fornos de retorta horizontal com vácuo conduzido até uma temperatura máxima de 700°C. Os fornos operam de 150 a 700°C com distribuição uniforme de temperatura inferior a $\pm 5^\circ\text{C}$.

A Figura 8 apresenta dois fornos com retortas do tipo VTR (600x900x600 mm) e máximo peso de carga de 600 kg.



Figura 8 – Fornos tipo VTR para tratamento de cargas acima de 600 kg

7. PANORAMA

Tem-se mencionado que a taxa de resfriamento da carga é e será o mais importante para o desenvolvimento de fornos de tratamento a vácuo. Em razão disso, novos meios de resfriamento consistindo da mistura de gases, por exemplo, nitrogênio e hélio, foram desenvolvidos e estão em uso industrial. Meio de resfriamento mais eficiente e a realização de processos termoquímicos (cementação / carbonitreção) mostram tendência para expandir devido produzir peças limpas e melhor controle de processo.

A questão ambiental, em termos de processos limpos, e tecnologicamente confiáveis são elementos importantes que apontam para tendência do processo de têmpera a vácuo se tornar cada vez mais utilizado.