

A Importância da Curva de Queima em Fornos Cerâmicos

Vicente de Paulo Nicolau^{a*}

^aDepartamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC,
CP 476, CEP 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil

*e-mail: vicente@emc.ufsc.br

Resumo: Neste artigo são discutidos alguns aspectos relativos às curvas de queima obtidas em fornos túneis e intermitentes. Embora não representem diretamente a temperatura das peças, essas curvas podem fornecer muitas informações sobre o processamento do material durante o processo de queima como um todo. As curvas apresentadas foram obtidas em situações reais e mostram a diversidade de situações em que estão aplicadas.

Palavras-chave: curva de queima, forno túnel, forno intermitente, produto cerâmico.

1. Introdução

Nos processos de queima de produtos cerâmicos em fornos diversos, a distribuição de temperatura imposta aos produtos ao longo do tempo desempenha um papel muito importante na qualidade final esperada. Esta importância é ressaltada no caso de fornos túneis, uma vez que o ciclo de queima passa a ser regular, com pouca possibilidade de variação na velocidade de avanço dos carros no forno. Geralmente possuem um ciclo mais curto do que os fornos intermitentes, que funcionam por batelada.

Em um forno intermitente cada queima pode ter um resultado diferente, permitindo à empresa buscar uma curva de queima que se adapte ao produto do momento e cada forno em particular. Isto pode ser conseguido alterando-se a duração da queima e da secagem final que ocorre no interior do próprio forno. Cada etapa pode ser alterada, tendo como resultado geral um ciclo mais longo. Ainda, se temperaturas elevadas demais ocorrem em determinada posição do forno, o problema pode ser contornado com o uso de um produto diferente naquela posição, ou mesmo se pode deixar aquele espaço vazio. Por tentativas se busca também melhorar a qualidade.

Diferenças à parte, cabe ao pessoal técnico e aos operadores dos fornos túneis ou intermitentes usar os conhecimentos disponíveis, já acumulados com o tempo de experiência para conseguir uma boa regulação e fazer com que os equipamentos funcionem a contento. Os aspectos apresentados na discussão seguinte têm como objetivo ajudar a melhor interpretar o que se passa no interior dos fornos e a buscar essa boa regulação.

Vale ressaltar que o termo “curva de queima” se refere à distribuição de temperatura dos gases, medidas por termopares ao longo do comprimento em fornos túneis e ao longo do tempo em fornos intermitentes. Tomada às vezes como a temperatura das peças, não é exatamente esta, mas se comporta de forma muito similar, podendo ser usada nas análises. Para medição de temperaturas na carga as dificuldades são bem maiores, pois a mesma está em deslocamento. Pode-se passar termopares ao longo do forno, sendo levados por um dos carros, mantendo a ligação física com a aquisição externa, ou se pode colocar um sistema de aquisição especial junto à própria carga. Mas estas aplicações são bastante específicas, aplicáveis apenas no caso de pesquisas e não no dia a dia das empresas. Pode-se também usar a simulação numérica, para estimativas das distribuições de temperaturas assumidas pela carga e elementos do forno. Destas simulações se sabe que a carga apresenta sempre uma inércia em relação aos gases. A carga está em geral mais fria do que os gases na região de aquecimento e mais quente na região de resfriamento. Assim, observando as temperaturas dos gases, se busca inferir o que acontece com as temperaturas da carga.

2. Aspectos Gerais

O processo que no forno intermitente toma lugar no tempo, de certa forma no forno túnel acontece ao longo do espaço ou do comprimento do forno. Ou seja, após a construção do forno, os tempos de processamento já estão pré-determinados. Ao menos a relação entre esses tempos já está definida. Se o ciclo de queima for estabelecido para 20 horas, os tempos de aquecimento, queima e de resfriamento, vão depender das distâncias respectivas no interior do forno. Por exemplo, se a região de aquecimento tiver um comprimento de 40% do forno, a de queima e a de resfriamento tiverem 30% cada uma, os tempos de aquecimento, de queima e de resfriamento, serão, respectivamente, de 8, 6 e 6 horas. Para aumentar um destes tempos, deve-se aumentar a duração do ciclo como um todo, tendo como consequência uma redução na produção.

Assim, ao iniciar a operação de um forno túnel, se adota baixas velocidades de produção, aumentando progressivamente, na medida em que o forno vai sendo adaptado, com mudanças de regulagens na combustão, tiragem, ventilações de resfriamento, que são as regulagens disponíveis. A matéria-prima também deve ser testada previamente em laboratório, verificando-se qual o seu ciclo ideal de processamento, e evitando-se jogá-la diretamente em produção. Alterações na matéria-prima podem ser necessárias para correção de possíveis problemas de secagem e queima.

Com o forno em operação, o processo é controlado pelos operadores, que normalmente recolhem os valores das temperaturas dos gases circulantes em diversos pontos, conforme os termopares instalados. Estes valores são colocados em tabelas e acompanhados seguidamente pelos operadores e supervisores. Embora as tabelas sejam cômodas para uso no local de operação, não representam a forma mais recomendada para uma análise mais criteriosa do processo. Pode-se observar como estão as temperaturas em vários pontos do forno, mas não fornecem uma idéia clara dos tempos de permanência em uma região, nem das velocidades de aquecimento e de resfriamento.

3. Análise de Casos Diversos

Como exemplo pode ser citada a Tabela 1, que indica as temperaturas medidas em um forno túnel em operação, aqui denominado de forno 1, com 136 m de comprimento. Indica também a posição de cada termopar em relação à entrada do forno. Note-se que se tem uma idéia geral da distribuição de temperatura, os valores relativos a cada região do forno, mas essa percepção é bastante limitada. A partir desta tabela foi construído o gráfico da Figura 1, usando uma curva de espaçamento uniforme, da mesma forma que se pode usar um gráfico de barras. A curva de espaçamento uniforme,

Tabela 1. Temperaturas dos gases ao longo de um forno túnel – forno 1.

| | Aquecimento | | | | | | | | Queima | | |
|------------------|-------------|-----|------|------|------|------|------|------|--------|------|------|
| Pontos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Distância [m] | 0 | 3,2 | 13,4 | 22,4 | 30,4 | 35,8 | 41,6 | 46,6 | 52,0 | 55,5 | 59,6 |
| Temperatura [°C] | 81 | 67 | 190 | 350 | 476 | 493 | 605 | 716 | 799 | 850 | 918 |

| | Queima | | | | Resfriamento | | | | | | | |
|------------------|--------|------|------|------|--------------|------|------|------|-----|-----|-----|--|
| Pontos | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | |
| Distância [m] | 63,5 | 67,6 | 69,9 | 73,6 | 79,0 | 85,5 | 91,1 | 96,6 | 102 | 107 | 130 | |
| Temperatura [°C] | 947 | 1002 | 1006 | 955 | 781 | 612 | 546 | 484 | 436 | 358 | 214 | |

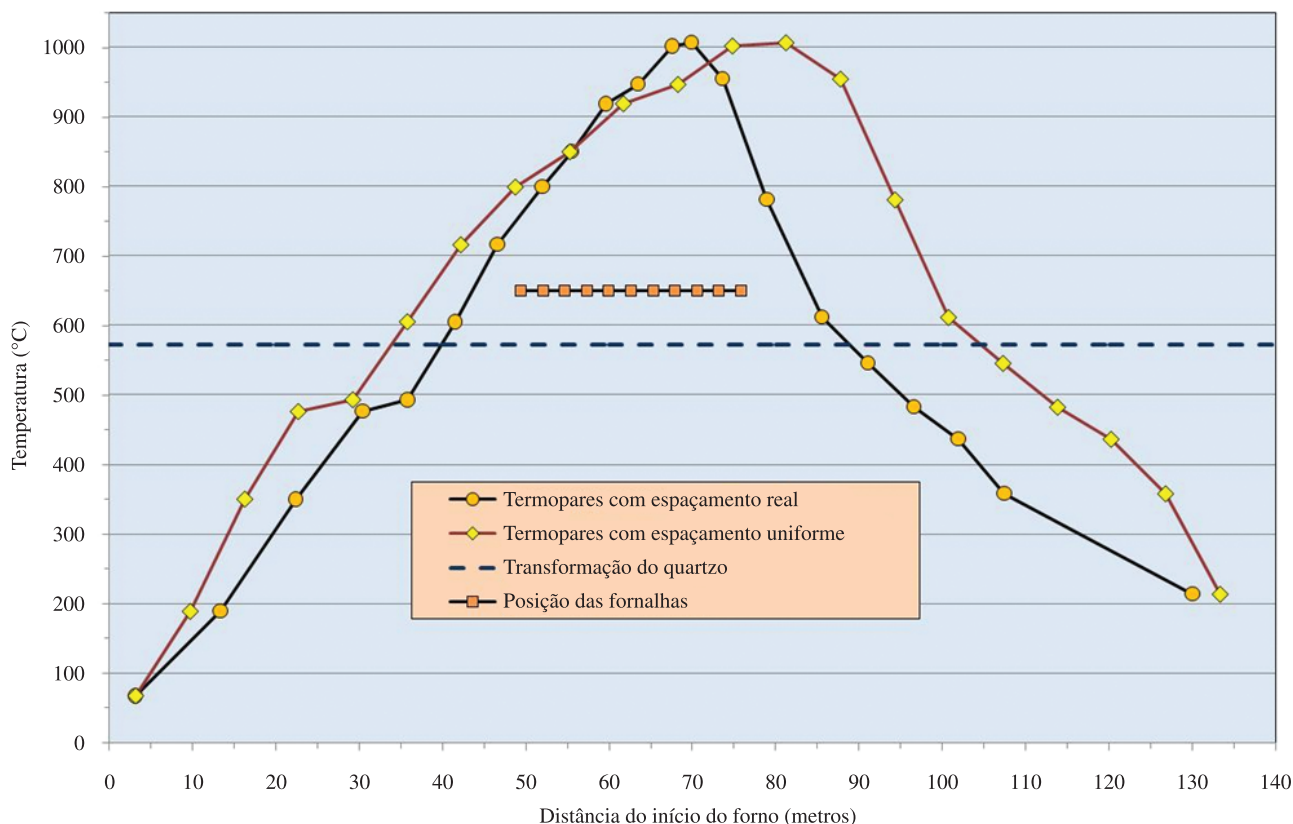


Figura 1. Temperaturas dos gases conforme o posicionamento dos pontos, forno 1.

conforme adotada pela empresa, mostra uma maior velocidade de subida inicial da temperatura e também uma maior velocidade de resfriamento. Com isto se tem a impressão de que por cerca de 30 m a temperatura dos gases ultrapassa os 900 °C. De certo modo a região de queima parece ter-se alargado, alargando a curva nesta região.

Colocando-se os pontos conforme a posição real ocupada pelos termopares, se percebe que de fato a curva é mais íngreme e estreita, mostrando um pico acentuado mais para o final da posição das fornalhas. Assim, por cerca de 17 m apenas, os gases se situam acima dos 900 °C. A inclinação da curva no resfriamento rápido, logo após as fornalhas não se alterou muito. Tampouco se alterou o resfriamento lento em torno dos 573 °C. No final a curva real mostra um trajeto de resfriamento mais longo, embora faltem termopares no local para defini-la melhor. No exemplo os termopares e os valores de temperatura são sempre os mesmos, conforme a Tabela 1, mudando apenas a forma de representação e de interpretação.

A Figura 2 apresenta, para um outro forno túnel, forno 2, algumas distribuições de temperatura, para diferentes dias de medição. Na região de aquecimento se observa que em duas curvas (em temperaturas mais baixas), o sistema de recirculação de gases (reciclo), não foi muito efetivo, o que causou diferenças de

temperatura nos gases nos primeiros 25 m do forno, em valores que se aproximam de 100 °C, o que certamente deixou de ser repassado à carga. A alteração pode não ter sido provocada diretamente pelos ventiladores; a causa mais provável pode ser uma alteração de regulagens na região que precisaria ser melhor investigada. Já na zona de queima algumas flutuações podem ser observadas, com alterações na forma das curvas para diferentes dias. O termopar central, a 60 m, está indicando valores um pouco menores do que os vizinhos. Neste caso se torna necessária uma verificação do seu próprio posicionamento. Pode estar escondido dentro da abóbada, um pouco mais do que os outros.

Variações mais importantes são observadas no resfriamento lento, com temperaturas finais dos gases superiores a 100 °C. Todas as curvas indicam temperaturas do ar de resfriamento superiores ao valor da transformação do quartzo – a carga neste caso estará ainda mais aquecida, aumentando o risco de quebras nos produtos. Como o comportamento das curvas não segue uma seqüência cronológica, as variações observadas não são resultados de alterações em regulagens do forno, mas possivelmente em imprecisão nos controles, seja na queima, seja nas condições de alimentação – fluxo variável, umidade residual da carga variável, ou forno com deficiência nas vedações.

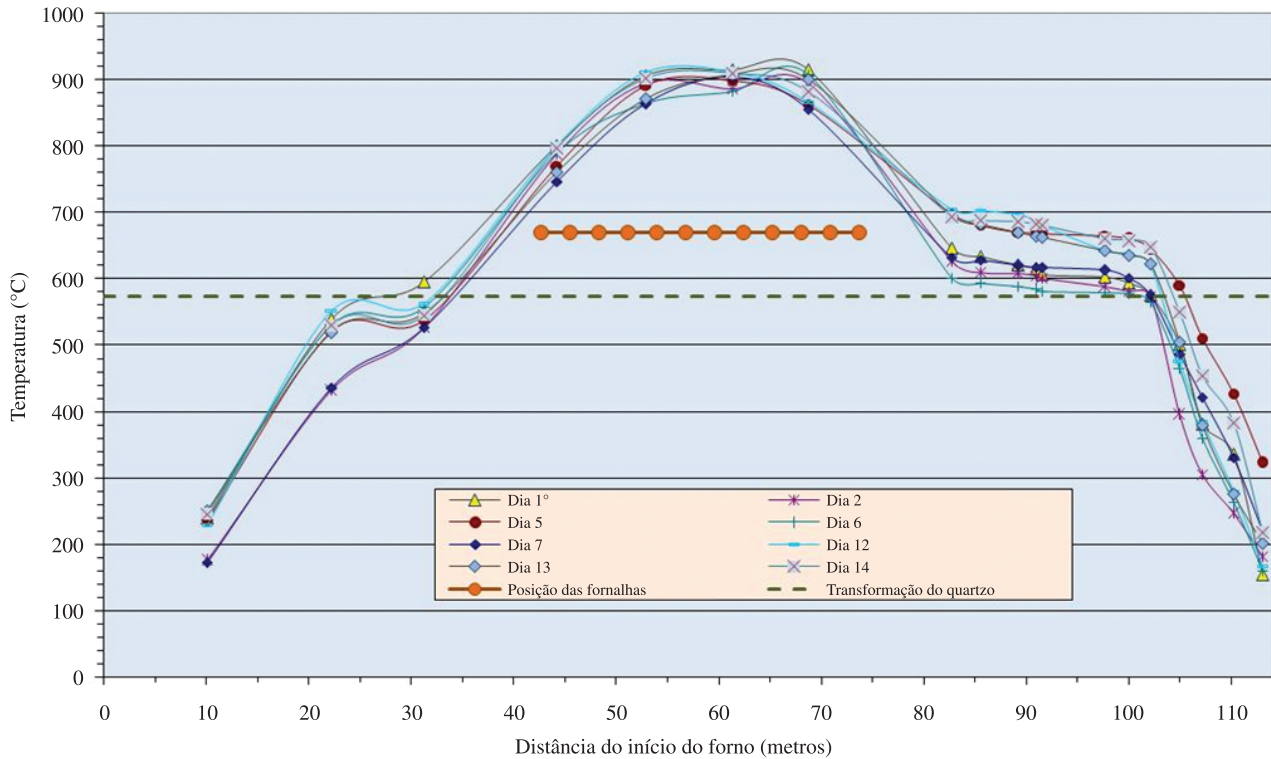


Figura 2. Distribuição de temperatura dos gases para diferentes dias de medição, forno 2.

Na Figura 3, para o forno 3, se observa que a distribuição de temperatura dos gases indica uma zona de queima mais curta, com subida mais íngreme a partir de 700 °C. O mesmo ocorre com a descida do resfriamento rápido até o resfriamento lento. O menor comprimento da zona de queima pode influenciar na sinterização da matéria-prima, que deve ser observada no produto de saída, pela cor, resistência mecânica e também pela absorção de água. O resfriamento lento ocorre ainda em temperaturas elevadas, uma vez que praticamente no seu final se atinge a temperatura de transformação do quartzo. Como no caso do forno 2, o termopar intermediário no topo da curva precisa ser investigado, para certificação de que mede a temperatura dos gases, ou simplesmente se está recuado para o interior da abóbada.

A curva relativa ao forno 4, Figura 4, demonstra a existência de uma zona de queima um pouco mais longa que a do forno 3, mas mais curta que a do forno 2. Alguns termopares adicionais poderiam ser instalados na zona de queima, pois se tem um comprimento, superior a 20 m, sem informações. Os gases de combustão permitem uma curva suave ao final do aquecimento, preparando a carga para a entrada na zona de queima. Um trecho de resfriamento rápido pode ser observado, como mostra a curva, e também um resfriamento lento, embora se encontre bem acima da linha de transformação do quartzo. Assim, se pode concluir que o resfriamento rápido é pouco eficiente, ou em uma distância curta, pois no início do resfriamento lento a temperatura do ar é ainda muito elevada.

No forno como um todo se observa que a zona de aquecimento é longa, enquanto que a zona de resfriamento ficou mais curta. O efeito do reciclo é observado no início do forno. No geral se pode acrescentar que uma análise mais precisa necessitaria da colocação de termopares adicionais, de forma a melhor definir o formato da curva de temperatura dos gases.

Na Figura 5 um forno mais curto é abastecido com gás natural e serragem ou com gás natural apenas. As regulagens em cada caso são diferentes. Mantendo-se a mesma temperatura máxima, o uso da serragem acarreta um aumento no volume de gases na combustão

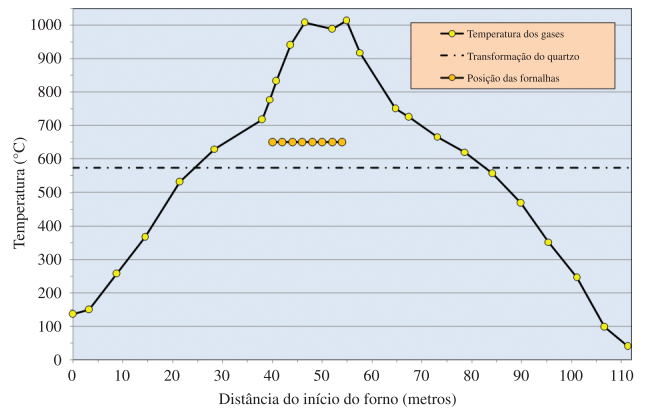


Figura 3. Distribuição de temperatura dos gases ao longo do comprimento, forno 3.

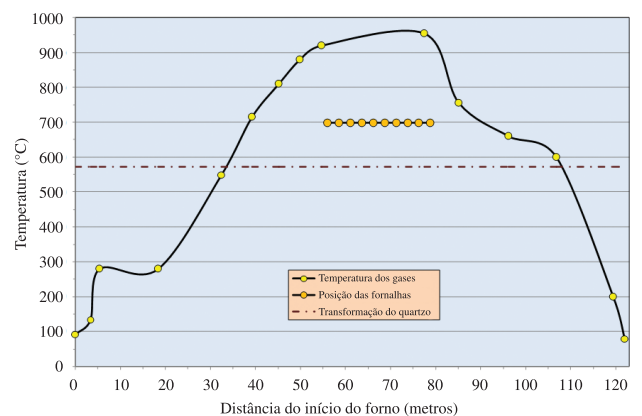


Figura 4. Distribuição de temperatura dos gases - forno 4.

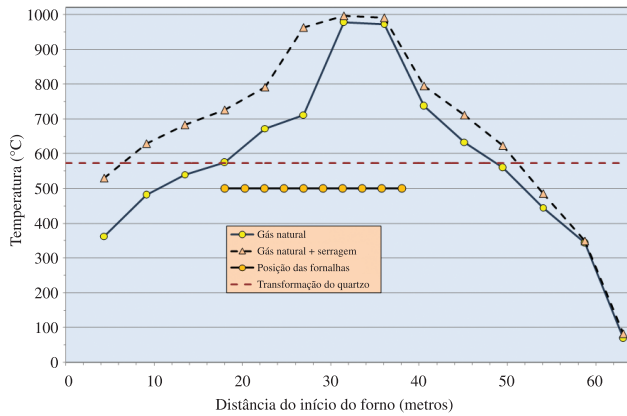


Figura 5. Forno túnel operando com gás natural e serragem ou gás natural apenas - forno 5.

e em conseqüência, nas temperaturas da região de aquecimento. Nesta situação se consegue preparar melhor a carga para a queima, aumentando a temperatura desta mais rapidamente do que com o uso de gás natural apenas. No aquecimento gás natural apenas os queimadores finais estavam em uso. Para um aumento de produção outros queimadores do início da zona de queima devem ser acionados, também para melhor aquecer a carga. O resfriamento final nos dois casos força uma queda rápida na temperatura, como forma de recuperar o calor e sair com a carga mais fria. Entretanto um aumento na produção pode acarretar trincas, pois a passagem pela linha de transformação do quartzo ocorre com quedas acentuadas de temperatura na carga, que está a temperaturas superiores às temperaturas do ar de resfriamento. Neste forno em 5 m de comprimento os gases de combustão estão ainda em temperaturas elevadas e serão aproveitados em um pré-forno montado ao lado da zona de queima de aquecimento do forno principal, funcionando como um prolongamento do próprio forno.

A Figura 6 mostra a curva de aquecimento e queima em um forno intermitente do tipo garrafão. Note-se que o aquecimento é feito de forma bastante lenta, com muito cuidado nas primeiras horas, para que haja a secagem final do material. O aumento de temperatura acentuado só ocorre após 50 horas e a chegada na temperatura final de queima após 70 horas. A queima é mantida até 135 horas, quando se inicia o resfriamento. O longo tempo aparente de queima decorre da necessidade de atingir todos os pontos da carga, sendo mais demorado para os elementos da base da carga e mais rápido para os elementos da parte superior, o que pode levá-los a uma sobrequeima. Dados não são tomados para o resfriamento; apenas se deixa o forno fechado por um tempo razoável, para evitar os choques térmicos. Na fase final as portas são abertas e se usa uma ventilação forçada para permitir a descarga manual das peças.

Um outro forno intermitente tipo garrafão também é considerado na Figura 7, neste caso com um ciclo de queima mais rápido do que o anterior. Foram medidas as temperaturas junto ao piso e junto à abóbada. Como o forno é de chama reversa, com formaldas nas laterais, as temperaturas da abóbada são sempre superiores às observadas no piso. No ponto máximo da queima a diferença atinge 100 °C, o que causa diferenças na qualidade do material queimado. Um retardo muito grande é observado nas temperaturas junto ao piso, pois toda a base da carga e o conjunto do forno partem da temperatura ambiente e precisam ser aquecidos.

4. Conclusão

As figuras mostradas indicam processos equivalentes nos diversos fornos túneis e também em fornos intermitentes. De um modo geral as curvas de queima as quais os produtos são submetidos possuem

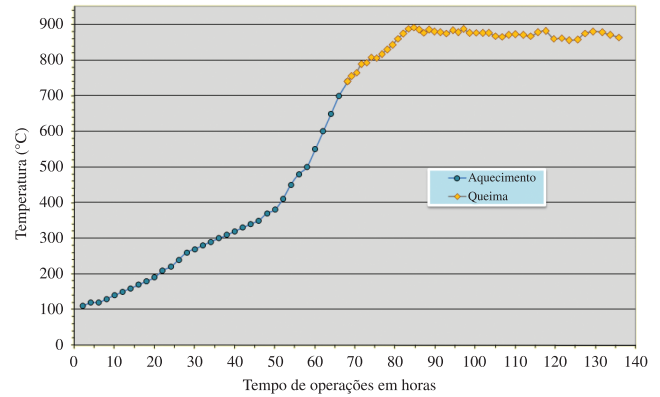


Figura 6. Temperaturas em forno intermitente, durante aquecimento e queima - forno 6.

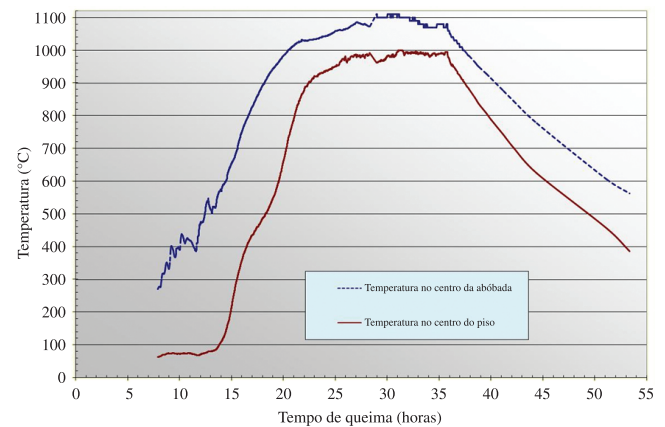


Figura 7. Temperaturas no piso e na abóbada em um forno intermitente - forno 7.

formato similar, embora cada forno e cada produto em particular tenham as suas características que devem ser consideradas durante a operação. Considerando a similaridade entre as diversas curvas de queima apresentadas, pode-se estabelecer uma correspondência entre o comprimento do forno túnel e o tempo de queima do forno intermitente. Como normalmente a evolução das empresas ocorre de fornos intermitentes para fornos túneis, deve-se partir do pressuposto que o ciclo de queima deve ser o mesmo. Se a queima ocorre em, por exemplo, 50 horas no total em um forno intermitente, poderá ocorrer em 50 horas em um túnel. Se o túnel tiver 100 m de comprimento, a velocidade será de 2 m/h, definindo a produção, que também depende da largura e altura do carro e por conseqüência do próprio forno. Para aumentar a produção em 20%, pode-se aumentar o comprimento do forno em 20%, mantendo-se o mesmo tempo total do ciclo. Pode-se reduzir este tempo, mas seria equivalente a uma queima mais rápida em um forno intermitente. A questão então repousa sobre a qualidade da argila empregada e o tipo de produto. As respostas podem ser obtidas através de ensaios em laboratório e através de experimentação nos fornos túneis, que, por isto, partem com baixas velocidades quando colocados em marcha.

Embora a instrumentação sempre esteja presente nos fornos, tem-se observado que a colocação de mais termopares, seguida de inspeções para assegurar o correto funcionamento, são medidas necessárias, uma vez que na maioria dos casos se constata que existem deficiências. Também uma análise mais consistente e um acompanhamento mais próximo são necessários para a correção dos problemas e melhoria do processo como um todo. O investimento para tal é pequeno em consideração ao retorno que pode ser obtido.

Mais informações em: www.labtermo.ufsc.br