



INFLUÊNCIA DO TIPO DE ALINHAMENTO DOS TUBOS NAS TEMPERATURAS DOS CANAIS DE FUMAÇA NO FORNO DE AUSTENITIZAÇÃO E NA HOMOGENEIDADE DOS TUBOS PRODUZIDOS*

Lis Nunes Soares¹
 Laura Silva Macedo Lima²
 Rodrigo Venâncio da Silva³
 André Amaral Ribeiro⁴

Resumo

A qualidade de fabricação de tubos de aço sem costura está relacionada ao processo de tratamento térmico. O controle do comportamento dos fornos industriais de tratamento térmico é de grande importância de modo a garantir a qualidade do produto. É necessário conhecer os parâmetros de operação dos fornos, assim como suas influências nas variáveis de processo. Este estudo avaliou as extensões do efeito do tipo de alinhamento dos tubos no interior do forno nas temperaturas dos canais de fumaça, temperatura do forno, temperatura do tubo, pressão interna do forno, demanda dos queimadores e consumo de gás natural. Diferentes alinhamentos podem impactar no escoamento da massa de gás queimado dentro do forno e conseqüentemente ter um efeito nas variáveis de processo avaliadas. Para determinar o tipo de alinhamento mais adequado do ponto de vista da qualidade do material final e da melhor eficiência energética, testes foram realizados durante uma corrida em um forno de austenização, na qual se alternou entre os diferentes tipos de alinhamento, medindo-se as variáveis de processo estudadas. Os resultados foram analisados utilizando-se técnicas estatísticas, como ANOVA. Ao final observou-se que certos parâmetros são impactados pelo tipo de alinhamento do tubo, sobretudo a temperatura de fumos e pressão interna no forno. As variações foram relativamente pequenas, principalmente pelo fato da principal variável controladora do processo, a temperatura do forno, possuir uma dinâmica de resposta lenta.

Palavras-chave: Tratamento térmico; Alinhamento de tubos; Fornos industriais; Eficiência energética.

TUBE ALIGNMENT INFLUENCE ON FUME CHANNELS TEMPERATURE AND PRODUCED TUBES HOMOGENEITY IN THE AUSTENITIZING FURNACE

Abstract

The quality manufacturing of seamless steel tubes is related to the heat treatment process. Controlling the behavior of industrial heat treatment furnaces has great importance to ensure product quality. It is necessary to know the operating parameters of the furnace, as well as its influence on the process variables. This study evaluated the effect of alignment of the pipes on the fumes channels temperatures, temperature of the tube, the internal pressure of the furnace, the burners demand and consumption of natural gas. Different alignments can impact the flow of the mass of burnt gas in the furnace and thus have an effect on measured process variables. To determine the most suitable type of alignment from the point of view of final product quality and better energy efficiency, tests were conducted during a heat in a austenitizing furnace, which was switched between the different types of alignment while the process variables were measured. The results were analyzed using statistical methods. At the end it was observed that certain parameters are affected by the type of alignment of the tube, especially the fumes channels temperatures and furnace pressure. The changes were relatively small, mainly because the main controller process variable, the furnace temperature, has a slow dynamic response.

Keywords: Thermal Treatment; Alignment of tubes; Industrial Furnace; Energy efficiency

¹ Engenheira Mecânica, Doutora, Gerência de Utilidades e Eficiência Energética, Vallourec Tubos do Brasil S.A., Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Graduanda em Engenharia Mecânica, PUC-MG, Gerência de Utilidades e Eficiência Energética, Vallourec Tubos do Brasil S.A., Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Graduando em Engenharia Mecânica, UFMG, Gerência de Utilidades e Eficiência Energética, Vallourec Tubos do Brasil S.A., Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Graduando em Engenharia Química, UFMG, Gerência de Utilidades e Eficiência Energética, Vallourec Tubos do Brasil S.A., Belo Horizonte, MG, Brasil.

* Contribuição técnica ao 35º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 29º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 13 a 15 de agosto de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

O processo de fabricação do aço em uma usina integrada consiste, basicamente, em três etapas. A transformação de minério de ferro e carvão em gusa, a redução do teor de carbono e adição de elementos de liga para produção de aços específicos a partir do gusa, e por fim o processo de conformação mecânica que irá conferir ao produto final propriedades mecânico-metalúrgicas. Caso não se alcance as propriedades desejadas com a conformação, pode-se acrescentar uma quarta etapa ao processo envolvendo processamentos como tratamentos térmicos [1].

A Vallourec Tubos do Brasil é líder mundial na produção de tubos de aço sem costura de alta qualidade, produzidos por meio do processo Mannesmann de laminação. Após passar pelo processo de laminação, os tubos produzidos podem passar por uma etapa específica de tratamento térmico. No caso em estudo, o tratamento térmico corresponde ao processo de têmpera seguida por um revenimento, avaliando-se especificamente o comportamento do forno de austenização, o qual consiste na primeira etapa do processo de têmpera.

Este processo ocorre na Usina Barreiro da Vallourec, por meio de dois fornos industriais em sequência. O primeiro forno é responsável pelo pré-aquecimento do material que segue para o segundo forno responsável pelo processo de austenização, forno este objeto de estudo no presente trabalho. A Figura 1 representa esquematicamente o forno estudado. Este forno opera com gás natural, por meio de queimadores distribuídos simetricamente ao longo do seu comprimento. O gás queimado que se encontra no interior do forno sai através de nove canais de fumaça, que se localizam na região mais fria do forno em sua parte inferior. O forno é instrumentado de modo que há medições das temperaturas dos gases internos e demanda de energia por zona, além da temperatura superficial do tubo na saída do forno e temperatura dos canais de fumaça.

No processo de austenitização a homogeneidade dos tubos é de extrema importância na qualidade final do produto, que está diretamente relacionada com o escoamento da massa de gás queimado no interior do forno. Desta forma, visando uma melhor eficiência do forno, e um produto de melhor qualidade, foram feitos estudos a respeito do tipo de alinhamento dos tubos no interior do forno, avaliando os impactos dos diferentes alinhamentos nos parâmetros de processo do forno e do tubo. Buscou-se, por meio de análises estatísticas, avaliar qual o tipo de alinhamento mais adequado, que proporciona um escoamento mais uniforme no interior do forno e, conseqüentemente, uma maior homogeneidade das temperaturas no sentido longitudinal dos tubos, além de melhor eficiência térmica do equipamento.

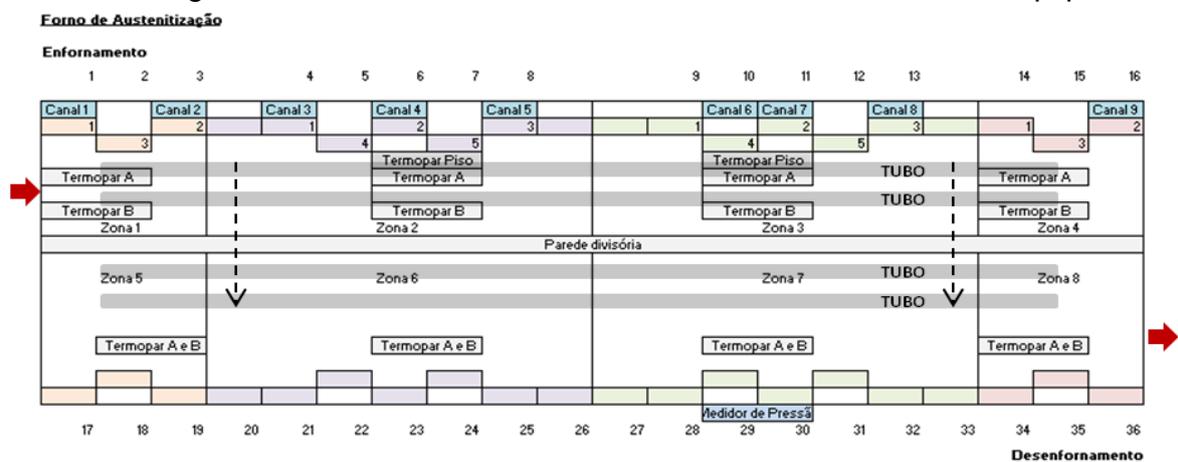


Figura 1. Representação esquemática do forno de austenitização

* Contribuição técnica ao 35º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 29º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 13 a 15 de agosto de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizada uma única corrida contínua nas seguintes condições de operação do forno.

Tabela 1. Parâmetros de operação do forno

Tempo total de forno	5940 s
SP das zonas de controle do forno	875/875/875/875/902/902/905/903/660
Percentual de carregamento do forno	100%
Carregamento	Peça/vaga

O teste durou aproximadamente 17 horas. Neste período, mantiveram-se os demais parâmetros de funcionamento do forno constantes, alterando apenas entre os três tipos de alinhamento dos tubos, conforme explicado a seguir e tendo a Figura 1 como referência.

- Alinhamento pelo pé: os tubos têm suas extremidades alinhadas junto à parede do lado de entrada do forno (zonas 1 e 5).
- Alinhamento pela ponta: os tubos têm suas extremidades alinhadas junto à parede do lado de saída do forno (zonas 4 e 8).
- Quincôncio: os tubos são alinhados alternadamente entre alinhamento pelo pé e alinhamento pela ponta.

Ao longo do período total do teste o forno operou cerca de cinco horas e meia em cada configuração, alternando entre os diferentes tipos de alinhamento a cada três horas e meia.

Durante o teste, mediram-se ininterruptamente as temperaturas dos gases queimados nos canais de fumaça do forno, e as temperaturas dos gases em cada zona de controle. Além disso, registraram-se os valores das demandas de energia exigidas dos queimadores, demanda por combustível, pressão interna do forno e as temperaturas na superfície dos tubos ao longo do seu comprimento. Tanto as temperaturas dos canais quanto as temperaturas do gás nas zonas foram medidos por meio de termopares e as temperaturas de tubo foram medidas mediante o uso de um pirômetro instalado na saída do forno.

Os valores encontrados foram analisados estatisticamente, utilizando-se o software estatístico Minitab®. Para avaliar a dispersão dos dados foram construídos gráficos do tipo boxplot e intervalos de confiança para os valores médios obtidos, considerando um nível de significância de 95%. Por fim, utilizou-se o teste de análise de variância (ANOVA – *Analysis of Variance*) para comparar o impacto dos diferentes tipos de alinhamento nas variáveis avaliadas. Assumiu-se como hipótese nula a igualdade entre os valores obtidos com os diferentes tipos de alinhamento, e caso houvesse elementos suficientes para refutar a hipótese nula poderia ser inferido que há impacto significativo do posicionamento do tubo no forno em relação na variável analisada. Os testes de ANOVA foram realizados considerando um nível de significância de 95%. Os valores foram comparados utilizando-se o Método de Tukey de modo a separar valores estatisticamente diferentes entre si, agrupando aqueles para os quais não foram encontradas evidências estatísticas que permitissem diferenciá-los entre si [2].

* *Contribuição técnica ao 35º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 29º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 13 a 15 de agosto de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados obtidos e tratados, o impacto do alinhamento do tubo foi analisado individualmente para cada variável de processo estudada.

3.1 Demanda dos Queimadores

Os dados obtidos para a demanda dos queimadores são mostrados nas Figura 2 e Figura 3. Foram analisadas individualmente as demandas para os queimadores de cada zona comparando os diferentes tipos de alinhamento.

A demanda é aparentemente pouco dependente do tipo de enformamento. Apesar disso, o teste ANOVA para as amostras permitiu identificar uma pequena diferença na demanda para o alinhamento por ponta, que se mostrou em média 4% superior aos demais, o que indica um maior gasto energético nesta configuração. Além disso, para o enformamento por ponta, a dispersão das observações foi significativamente maior, indicando um processo de controle mais oscilatório e uma menor estabilidade do processo.

Um padrão foi observado para a demanda nas zonas de aquecimento que é significativamente maior quando comparada à demanda nas zonas de encharque. Isso pode ser explicado para maior instabilidade do forno nestas zonas devido ao constante enformamento de material frio, o que vai requerer maior potência dos queimadores. A variabilidade e dispersão da demanda foi significativamente maior nas zonas das extremidades do forno, tanto para a zona de aquecimento (zonas 1 e 4) quando para zona de encharque (zonas 5 e 8).

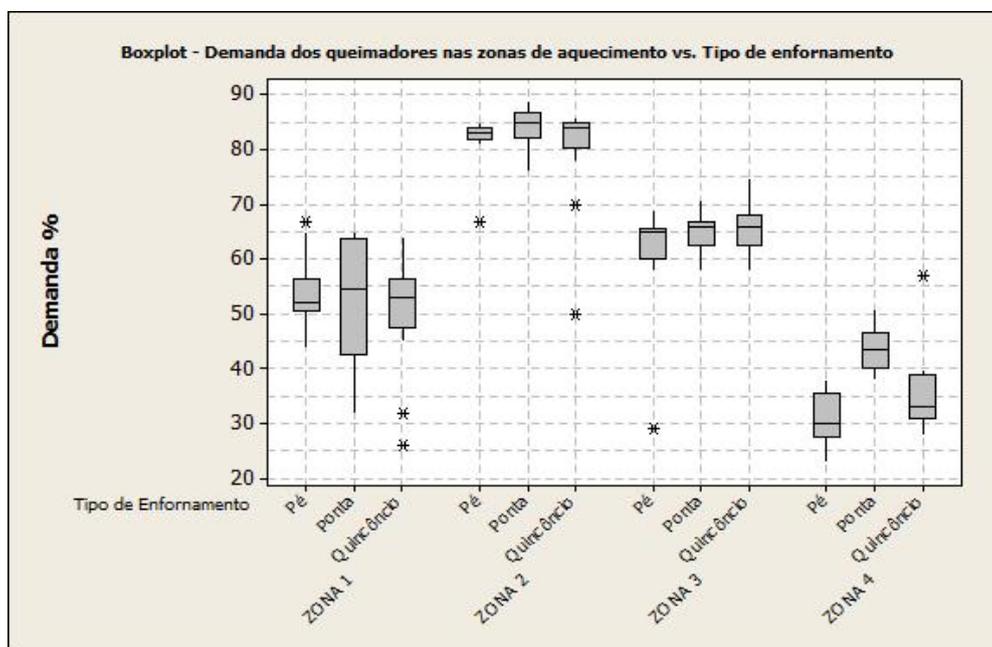


Figura 2. Demanda dos queimadores nas zonas de aquecimento

* Contribuição técnica ao 35º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 29º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 13 a 15 de agosto de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

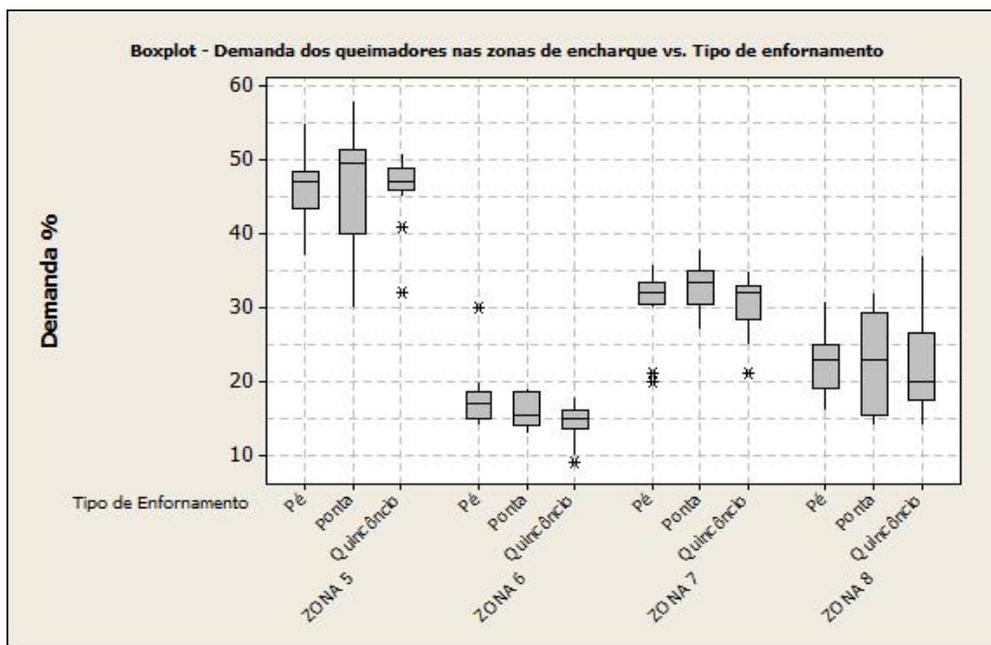


Figura 3. Demanda dos queimadores nas zonas de encharque

3.2 Pressão Interna do Forno

As análises relativas à pressão interna no forno de austenização (HF) não apresentam indícios de que esta seja afetada pelo tipo de enformamento. Contudo, a dispersão e a variabilidade das medidas se mostraram claramente maior para um enformamento do tipo pé.

A pressão interna no forno de pré-aquecimento (PHF), o qual recebe os fumos provenientes do forno HF, é aparentemente afetada pelo tipo de enformamento conforme mostrado pelo intervalo de confiança para as medidas apresentado na Figura 4. Quando o enformamento é do tipo quincôcio, tem-se uma menor pressão interna no PHF, seguida pelo enformamento pela ponta e por fim enformamento pelo pé, que apresentou valores de pressão interna da ordem de 50 a 100% superiores aos outros tipos de enformamento. Também no forno PHF o enformamento pelo pé levou a uma maior variabilidade e dispersão nas medidas de pressão.

* Contribuição técnica ao 35º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 29º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 13 a 15 de agosto de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

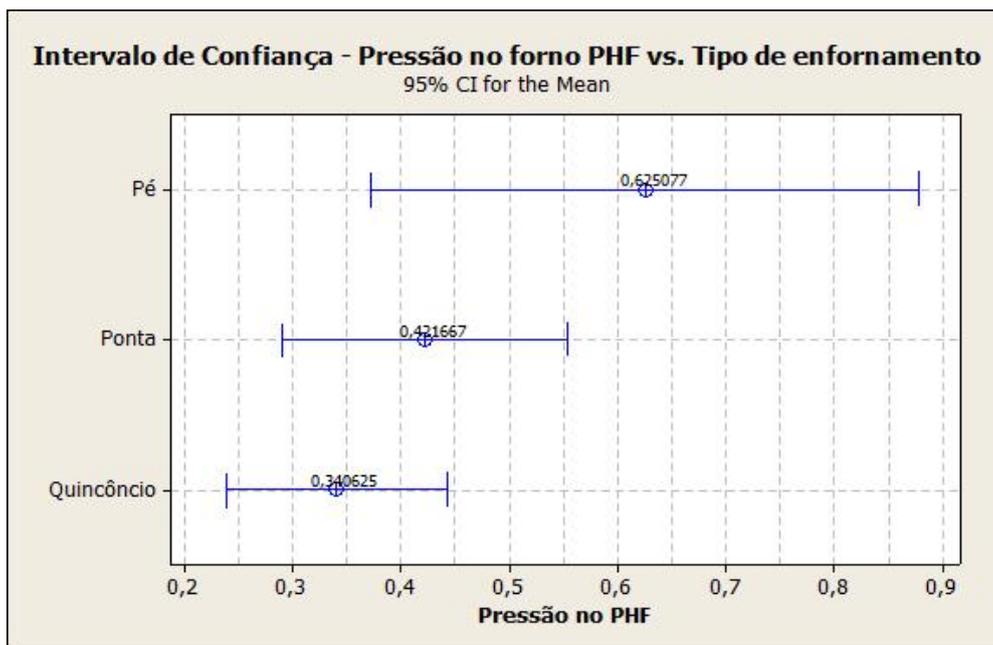


Figura 4. Pressão do forno PHF

3.3 Consumo de GN

Não há evidência estatística que demonstre uma diferença no consumo de GN devido à variação no tipo de enformamento. Ainda que tenha sido observada uma diferença na demanda dos queimadores para enformamento pela ponta, essa diferença foi mínima e não observou-se um impacto deste fator no consumo de GN. Além disso, a variabilidade e dispersão das observações foram aproximadamente as independentemente do tipo de enformamento, como mostrado na Figura 5.

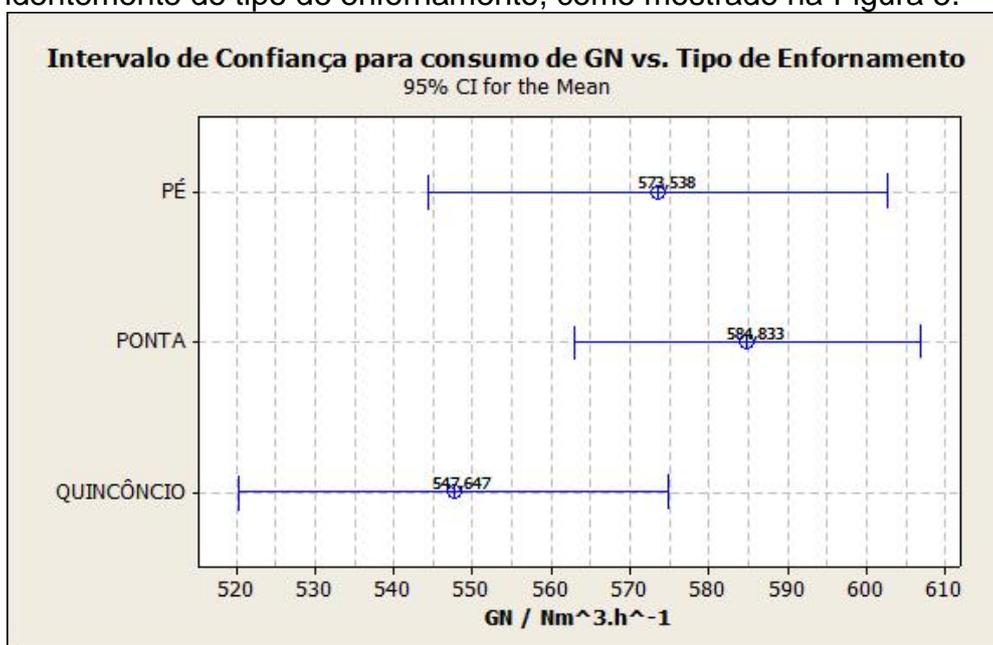


Figura 5. Consumo de GN

* Contribuição técnica ao 35º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 29º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 13 a 15 de agosto de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



3.4 Temperatura do Tubo

A temperatura do tubo e sua heterogeneidade são dois dos parâmetros mais críticos e decisivos para as propriedades do material e conseqüentemente para sua qualidade. Esta pode ser agrupada de acordo com a região do tubo na qual a foi medida, podendo ser na região da ponta, centro ou pé. Em relação à temperatura do tubo, analisaram-se três parâmetros: heterogeneidade, temperatura por região do tubo e temperatura média, esta mostrada na Figura 6. Não houve nenhuma evidência que demonstrasse diferença em qualquer um destes parâmetros ao alternar entre diferentes tipos de enformamento do material no forno. A variabilidade e dispersão das medidas de temperatura no tubo e heterogeneidade também se mostraram independentes em relação ao tipo de enformamento, demonstrando que o posicionamento do tubo no forno não impacta na distribuição de temperatura do tubo nas condições deste experimento.

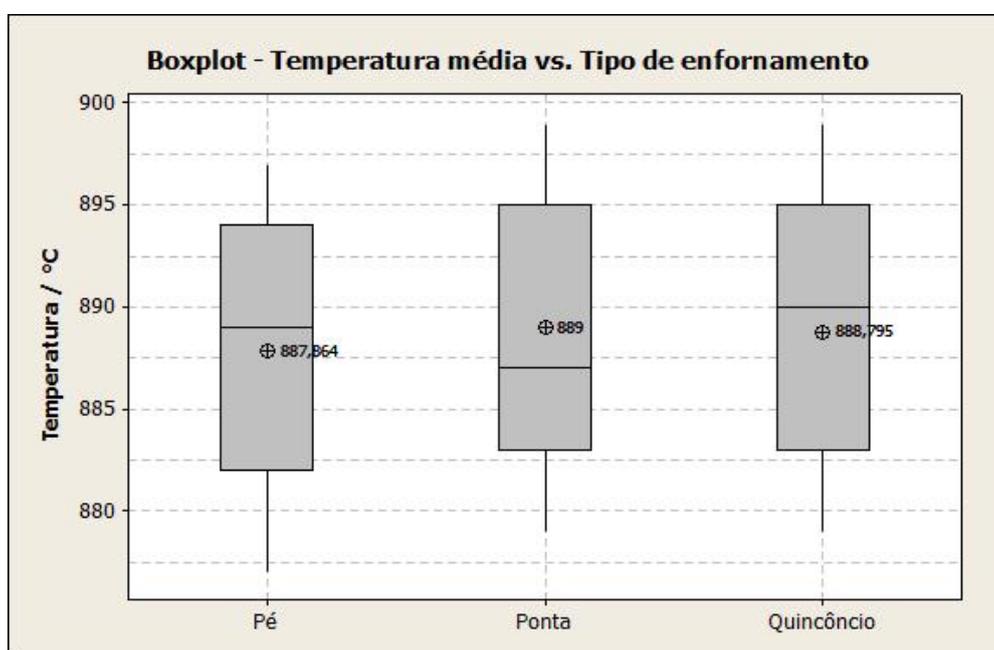


Figura 6. Temperatura média dos tubos

3.5 Temperatura dos Fumos

Os fumos do forno HF são distribuídos ao longo de 9 canais de saída, como mostrado esquematicamente na Figura 1. Com relação a esta variável, analisaram-se três parâmetros: heterogeneidade da temperatura de fumos entre os diferentes canais, temperatura de fumos médio (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) e perfil da temperatura de fumos nos diferentes canais (Figura 8).

Apesar de uma diferença pequena entre as heterogeneidades, pelo teste ANOVA pode-se afirmar com um nível de significância de 95% que há uma tendência para a heterogeneidade ser maior para o enformamento pelo pé, que se mostrou em média 15°C superior aos demais o que indica que este tipo de distribuição dificulta a homogeneização dos gases no interior do forno. Em seguida tem-se o enformamento por quincôncio e pela ponta, que apresentou menor heterogeneidade entre as temperaturas de diferentes canais de fumos, o que indica um favorecimento à homogeneização dos gases no interior do forno, o que é recomendado.

* Contribuição técnica ao 35º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 29º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 13 a 15 de agosto de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

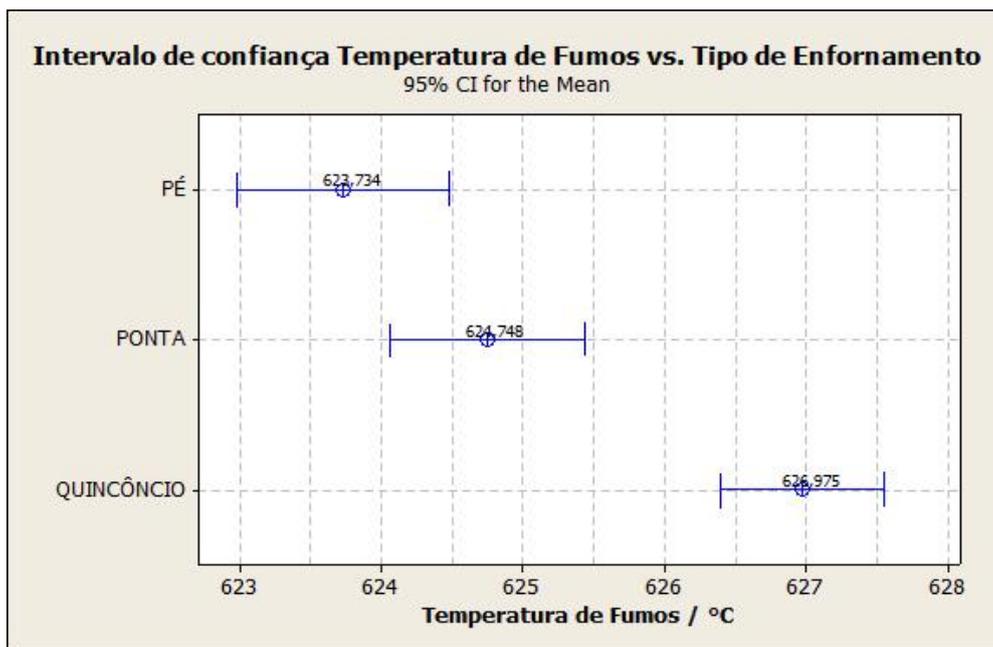


Figura 7. Temperatura média dos fumos

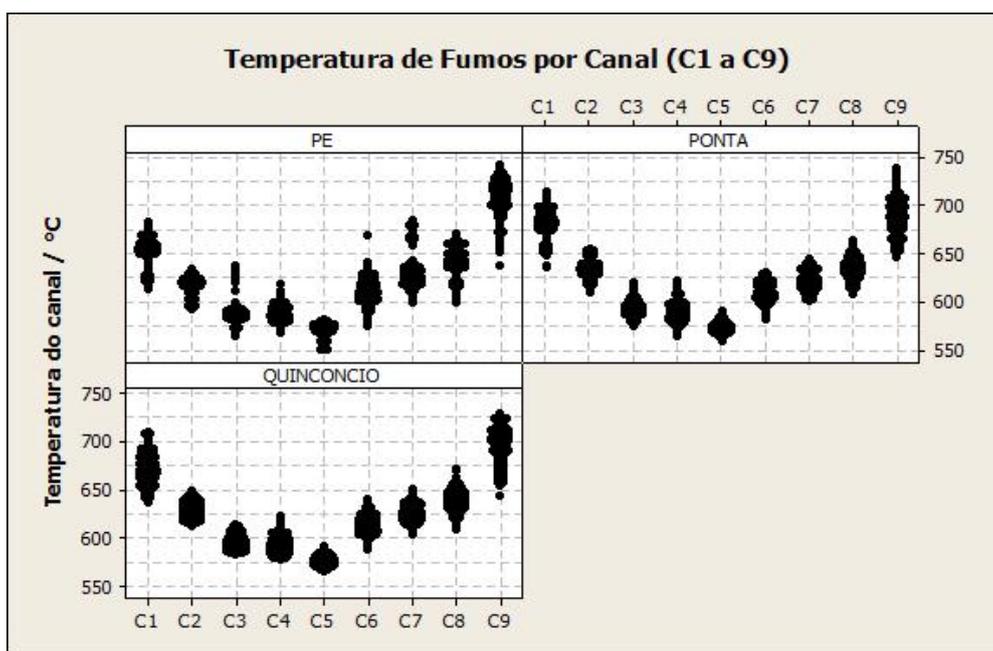


Figura 8. Perfil de temperatura dos canais de fumos

Pode-se afirmar, também, com um nível de significância de 95%, que a temperatura média dos fumos é ligeiramente superior para o quincônio, quando comparada aos enforamentos pé e ponta, que não diferem entre si em relação à temperatura média dos fumos. Isso pode indicar uma maior eficiência energética e aproveitamento da carga térmica, já que estes fumos alimentam e são usados no aquecimento do forno PHF. Contudo, a diferença observada foi mínima e a princípio pode ser desprezada. Em relação ao perfil de temperatura para os fumos nos diferentes canais, o mesmo padrão de perfil foi observado para os três tipos de enforamento. A temperatura nos canais das extremidades do forno (canais 1 e 9) são sempre as maiores. Por outro lado, as temperaturas dos canais caem à medida que se desloca para os canais centrais, de modo que o canal 5 sempre apresenta as menores temperaturas

* Contribuição técnica ao 35º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 29º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 13 a 15 de agosto de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



de fumos. Isso é explicado devido à ausência de material (tubo) próximo às zonas das extremidades, deixando livre o fluxo de gás nesta região e permitindo melhor homogeneização do gás.

Por fim, o enformamento quincôncio e ponta apresentaram um perfil de temperatura aproximadamente simétrico, enquanto no enformamento pelo pé a temperatura no canal 1 é nitidamente menor que a temperatura no canal 9. A explicação é semelhante, uma vez que há uma maior área livre para o fluxo de gás nas regiões próximas ao canal 9 quando o enformamento ocorre pelo pé, que por sua vez bloqueia parcialmente o fluxo de gás próximo a zona 1.

Apesar da heterogeneidade da temperatura dos fumos ao longo do forno devido a diferentes distribuições de massa em seu interior, a temperatura ao longo do tubo não é impactada significativamente, como foi relatado na análise anterior referente à temperatura do tubo. Este fato evidencia que as trocas térmicas por condução e radiação são predominantes e suficientes para homogeneizar a temperatura ao longo do tubo, mesmo havendo diferenças nas trocas térmicas por convecção ao longo do seu comprimento. Não foram observados distúrbios nas temperaturas de fumos dos canais localizados próximos à porta de entrada do forno, o que indica que eventuais aberturas da mesma impactam pouco na temperatura destas zonas.

3.6 Temperatura das Zonas do Forno

A análise das temperaturas das zonas foi feita separadamente por zonas de aquecimento (zonas 1 a 4), zonas de encharque (zonas 5 a 8) e soleira (zona 9), uma vez que os *setpoints* de temperatura diferem entre as zonas. Os intervalos de confiança para as médias são mostrados na Figura 9 e Figura 10. Não há evidências estatísticas de acordo com o teste ANOVA que indiquem que diferentes tipos de enformamento provoquem alterações nas temperaturas de cada zona, nem na dispersão e variabilidade das medições. Contudo, algumas considerações podem ser feitas.

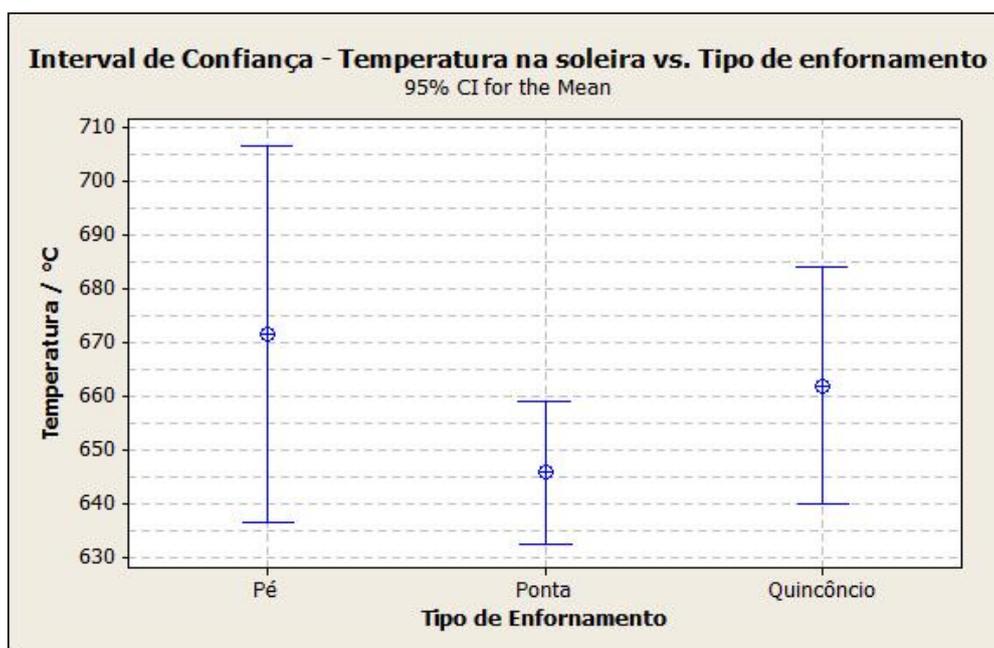


Figura 9. Temperatura da soleira

* Contribuição técnica ao 35º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 29º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 13 a 15 de agosto de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

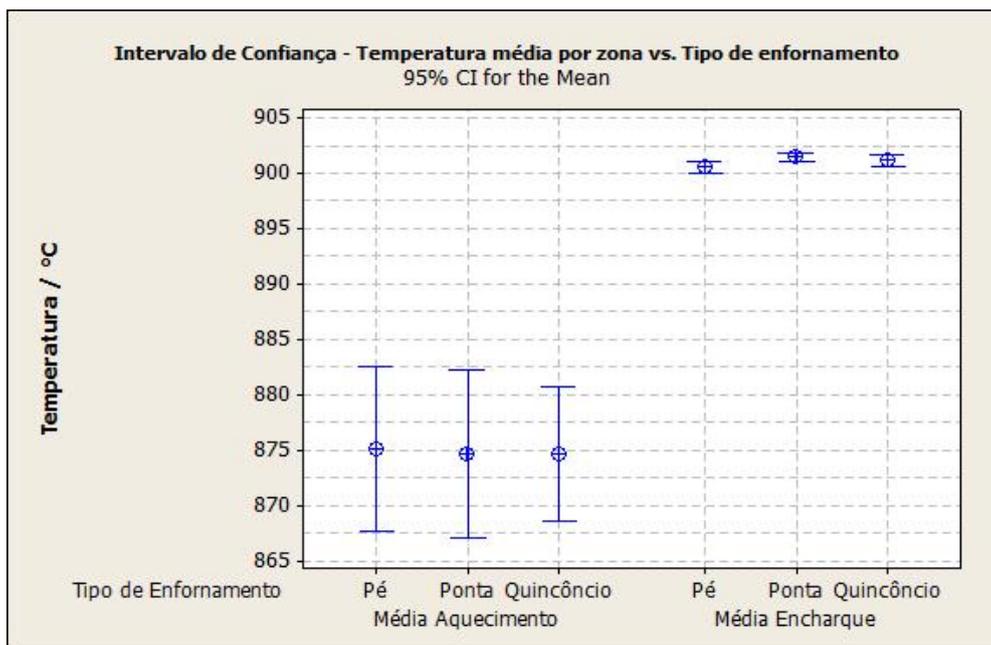


Figura 10. Temperatura média por zona

A dispersão e variabilidade nas temperaturas das zonas são significativamente maiores para as zonas de aquecimento que apresentaram desvio padrão relativamente elevado quando comparado às zonas de encharque, estas com distribuição das medições mais homogênea e estável. Isto pode ser explicado pela constante entrada de material a baixas temperaturas nas zonas de aquecimento, enquanto os mesmos chegam à zona de encharque já em temperaturas elevadas. Do ponto de vista de qualidade de processo, é importante que se mantenha a temperatura nas zonas de encharque e bem contraladas de forma a garantir a qualidade do tubo e as propriedades do material desejadas.

Uma observação exclusiva para a Zona 7 mostrou que nesta zona, para enformamentos do tipo ponta e quincôncio, a dispersão e variabilidade das medidas é significativamente maior quando comparadas ao enformamento pelo pé.

A temperatura da zona 9, sofreu grande influência do tipo de enformamento, apresentando maiores variações de temperatura para o enformamento pelo pé, em seguida quincôncio e por fim pela ponta, que apresentou valores de variabilidade menores. Uma menor variabilidade é sempre desejada de forma a garantir estabilidade do processo e a qualidade do produto final.

4 CONCLUSÃO

O fato de o experimento ter sido realizado com tubos cujo comprimento ocupa grande parte da extensão do forno acaba diminuindo as diferenças que possam ocorrer devido à alteração entre os tipos de enformamento. Sendo assim, uma vez alternado o posicionamento do tubo no forno, nestas condições, a diferença será pequena. Isto pode mascarar ou atenuar possíveis impactos que os diferentes enformamentos podem causar às variáveis analisadas.

O experimento ocorreu de forma contínua e em uma mesma corrida, alternando entre os tipos de enformamento, de modo que para cada distribuição testada obteve-se um tempo relativamente curto de operação. Enquanto isso, a temperatura do forno é uma variável com uma dinâmica de resposta lenta. Soma-se a isso o fato de não haver grandes diferenças entre os tipos de enformamento para o tubo usado no

* Contribuição técnica ao 35º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 29º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 13 a 15 de agosto de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

experimento, obteve-se ao final a um regime pseudo-estacionário. Nas condições deste experimento não foi possível observar alterações significativas na temperatura do forno.

A demanda dos queimadores e o consumo de GN, por sua vez, são variáveis que respondem a variações na temperatura do forno, de modo a mantê-la no valor determinado pelo *setpoint*. Não havendo distúrbios significativos na temperatura do forno, a demanda e o consumo de GN tendem a se manter estáveis.

Em relação ao consumo energético, apesar do consumo médio de GN para o enforamento pela ponta ser superior aos demais, a variabilidade das observações fornece um intervalo de confiança amplo para as médias, o que não permite inferir, do ponto de vista estatístico, que o consumo de GN seja diferente nos três casos considerados. Por outro lado, a demanda nos queimadores se mostrou estatisticamente superior quando o material foi enforado pela ponta, além de apresentar maior instabilidade nas medidas da mesma. As duas observações são um indício que a eficiência energética é reduzida quando o enforamento ocorre pelas pontas.

A temperatura dos fumos se mostrou a variável mais impactada pela alteração no tipo de enforamento, principalmente em relação ao perfil de temperatura nos canais de fumos, uma vez que a homogeneização e circulação de gases são impactadas pela distribuição do material no forno. Apesar disso, não se observou diferença significativa na média destas temperaturas, não havendo, portanto, impacto na eficiência energética do forno PHF que recebe estes fumos.

A temperatura de saída do tubo e a heterogeneidade das temperaturas do tubo são as propriedades mais críticas considerando a qualidade do produto final. Ambas são influenciadas diretamente pelas temperaturas das zonas do forno e do regime de circulação dos gases no interior do forno. Estas não sofreram variações significativas ao alternar-se entre os diferentes tipos de posicionamento do tubo no interior do forno, mesmo observando variação na distribuição e circulação dos gases. Isto indica que a diferença nas trocas térmicas por convecção ao longo do comprimento do tubo é compensada pela transferência de calor por condução e radiação.

A pressão interna no forno PHF é aparentemente afetada pela distribuição dos tubos no interior do forno HF. Contudo, outros experimentos são necessários para confirmar e explicar esta observação. Além disso, desde que mantida dentro determinados valores, esta não é uma variável crítica para o processo.

Pelos resultados encontrados, apesar de alguns mostrarem certa tendência do impacto do posicionamento do tubo em relação a algumas variáveis de processo, ainda não se pode afirmar que existe um enforamento preferencial que proporcionará maior qualidade do produto final, assim como maior eficiência energética, uma vez que as mudanças nas variáveis observadas foram limitadas.

REFERÊNCIAS

- 1 Plentz RS. Otimização do processo de resfriamento do aço mola SAE 9254 durante a laminação. 2009 [acesso em: 6 mai. 2014]. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/23972>.
- 2 Paese C, Caten C, Ribeiro JLD. Aplicação da análise de variância na implementação do CEP. 1999 [acesso em: 6 mai. 2014]. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1999_A0324.PDF.

* *Contribuição técnica ao 35º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 29º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 13 a 15 de agosto de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*