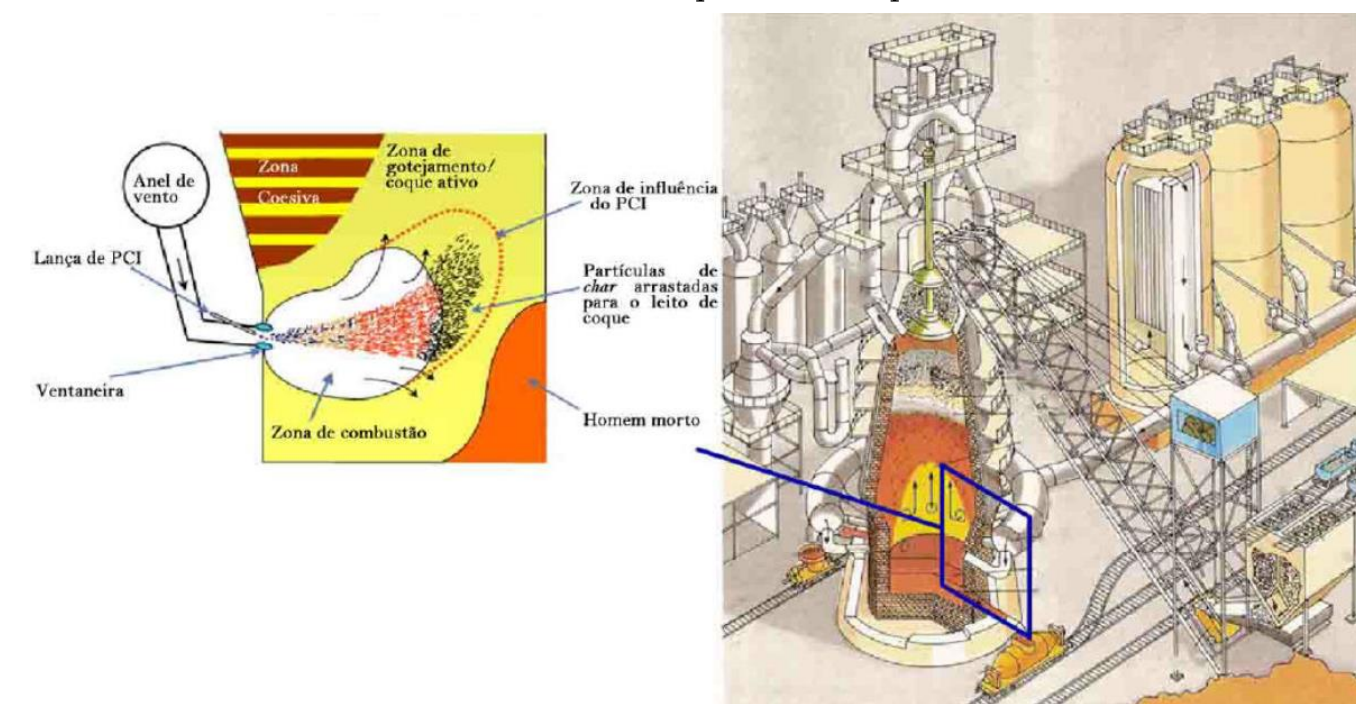


Introdução

O processo de PCI (*Pulverized Coal Injection*) é um processo siderúrgico que visa substituir o coque por carvões mais baratos nas funções de fornecimento de energia e de gases redutores para a redução do minério de ferro no alto-forno (Fig. 1).

Fig. 1 - Típica disposição de operação de produção de ferro-gusa (direita) e detalhe da zona de combustão do Alto-Forno (esquerda). (Adaptado de MOUSA, 2016)



O laboratório de siderurgia da UFRGS (LaSid) desenvolveu um simulador de PCI (Fig. 2) para o estudo dos fenômenos ultrarrápidos que ocorrem nas condições de alta temperatura, pressão e taxas de aquecimento existentes próximas à zona de combustão do alto-forno, sendo capaz de capturar dados de pressão e temperatura na ordem de milissegundos.

Fig. 2 - Simulador de PCI do Laboratório de Siderurgia da UFRGS



A aquisição do sinal de T do simulador não condiz com a temperatura real do gás de combustão. Isto se deve à grande inércia térmica do termopar. Portanto é necessária uma estimativa para a T de chama. Isto viabilizaria a aplicação do sinal de T em modelos termodinâmicos e cinéticos.

Objetivos

Determinar métricas, a partir dos sinais de P e T que possam ser utilizadas em modelos cinético-termodinâmicos para os carvões nas condições rigorosas do AF.

Materiais e Métodos

Os materiais utilizados no trabalho foram os carvões listados na tabela 1, que foram ensaiados no simulador em atmosfera de O₂ puro, com T₀ de cerca de 1000K. O *burnout* foi determinado em termobalança pelo método de *ash tracer* e os gases de combustão foram quantificados em um cromatógrafo.

Tabela 1 - Carvões utilizados nos ensaios e suas características mais importantes

Carvão	Nacionalidade	Cz (%)	R _{vitrinita} (%)	MV _{bsic} (%)	PCS (MJ/kg) _{bs}
CA	Austrália	10,6	1,54	17,2	31,5
CB	Brasil	18,9	0,46	39,8	25,0
CC	Colômbia	10,8	0,61	42,6	29,8

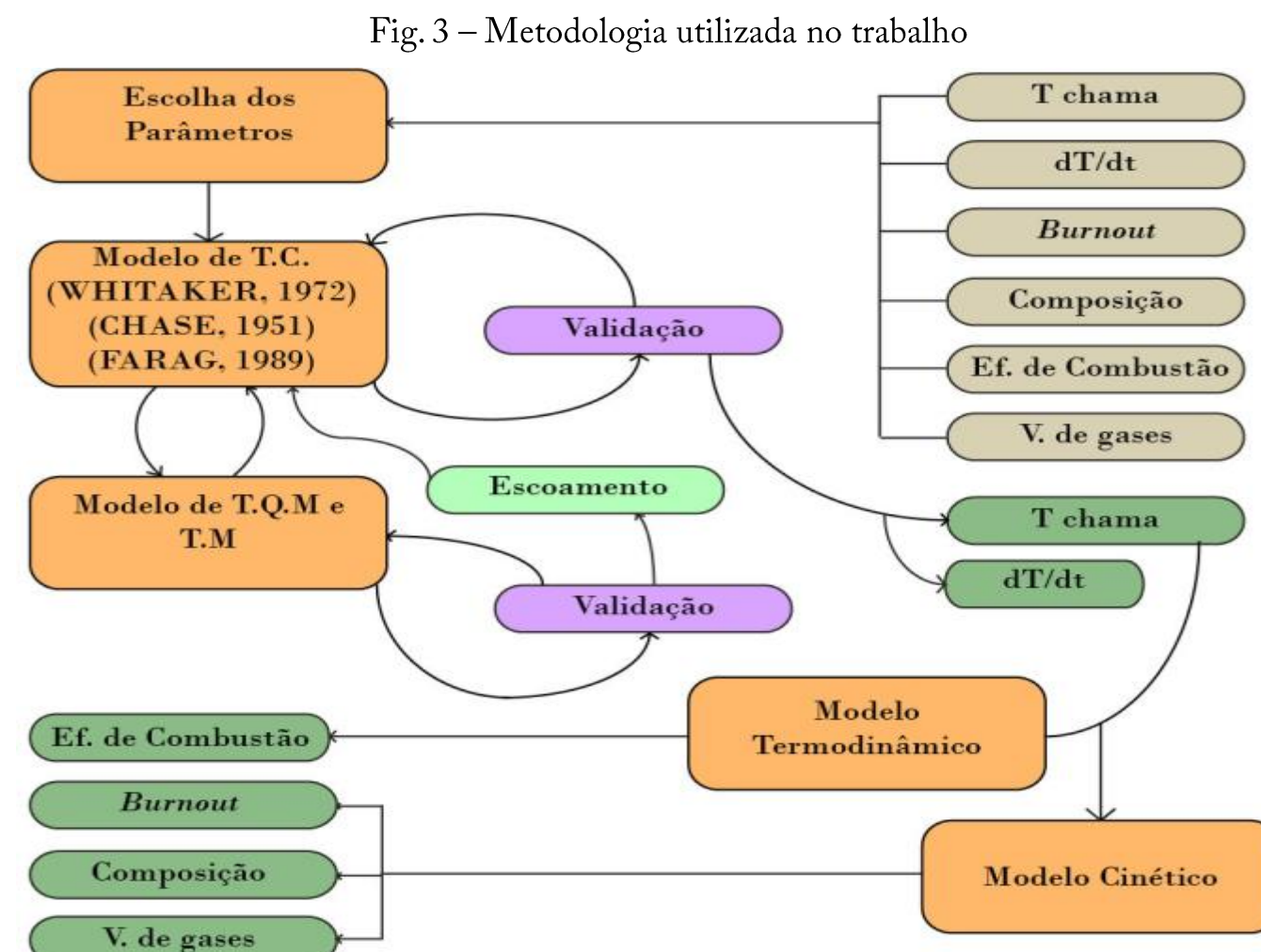
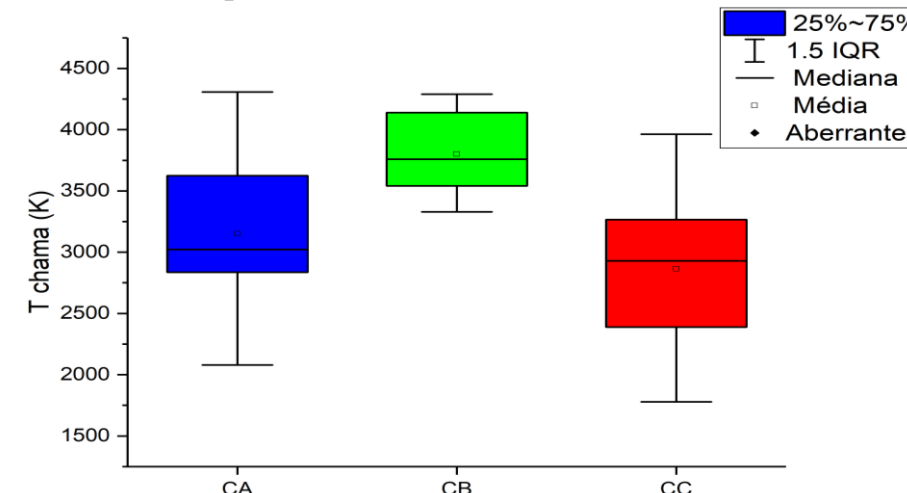


Fig. 3 - Metodologia utilizada no trabalho

A metodologia adotada está representada na figura 3. Foram estabelecidos os parâmetros interesse: 1-A T de chama; 2-A taxa de aquecimento; 3-A extensão de *burnout*; 4-A composição dos gases de combustão; 5-A eficiência de combustão; 6-O volume de gases gerados. Então foi feito um processo iterativo de refino de modelos de transferência de calor (T.C.) e transferência de quantidade de movimento e massa (T.Q.M e T.M). Da T de chama, surgem então dois modelos simples para a determinação dos demais parâmetros.

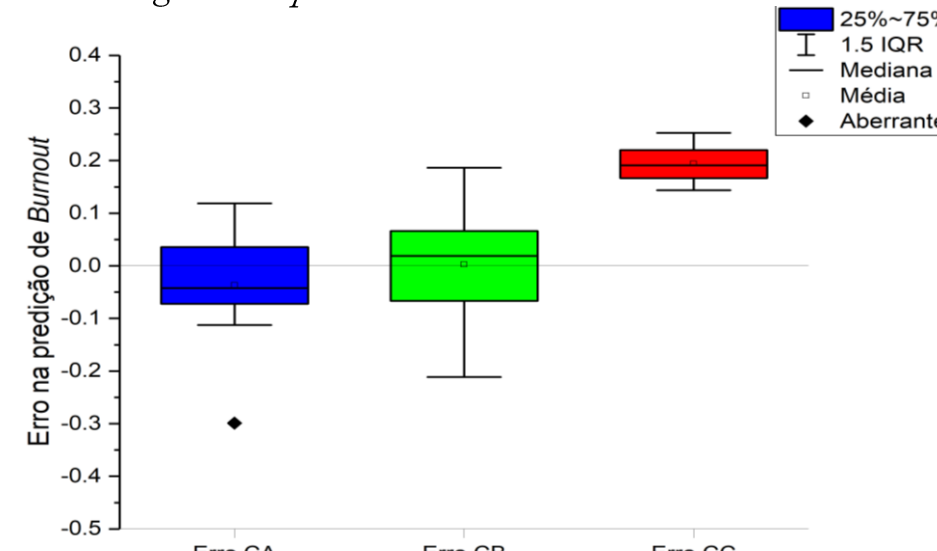
Resultados

Fig. 4 - Boxplot das temperaturas máximas de ensaio



As T de chama (Fig.4) estimadas estão dentro do limite termodinâmico para combustões nas condições de T e P dos ensaios e, com exceção do CC, são proporcionais ao teor de MV. O CC apresenta inversão de tendência pois, dada a maior MV, está além da proporção estequiométrica. Isto implica na necessidade de determinar a melhor massa de amostra para cada carvão. Os erros das estimativas de *burnout* (Fig. 5) para o CA e o CB ficaram na ordem dos 5%. Nota-se um erro sistemático na determinação de *burnout* do CC proveniente dos desvios da idealidade.

Fig. 5 - Boxplot dos erros de estimativas de Burnout



A eficiência de combustão foi definida como a fração do poder calorífico superior que foi entregue durante a combustão, a partir do cálculo da variação de entalpia. Os valores estão sumarizados na a tabela 2. Como se pode observar, eficiência de combustão e *burnout* (variação de massa no resíduo) sólido são parâmetros diferentes quando falamos de simulação de fenômenos em processo de PCI.

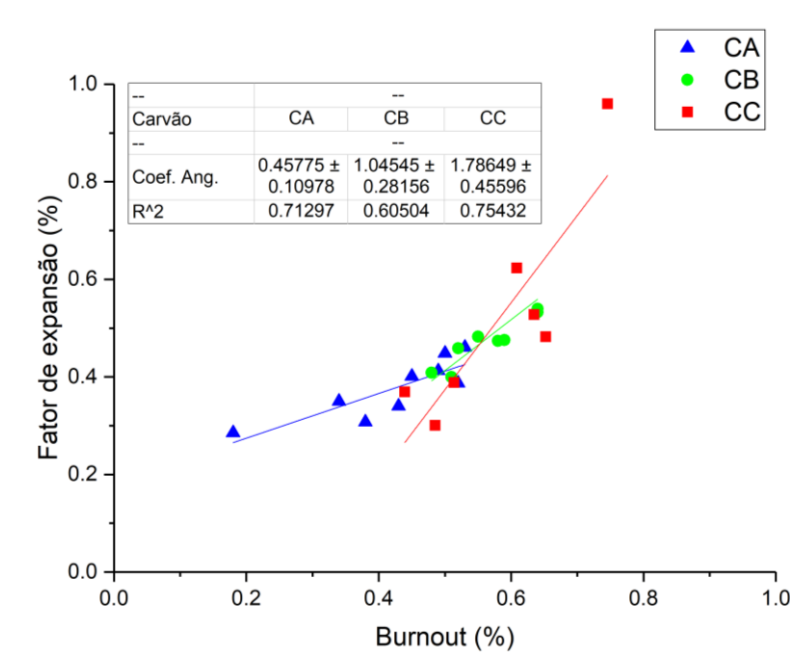
Tabela 2 - Eficiência de combustão (Variação de entalpia / Poder calorífico superior) em comparação com *burnout*

Carvão	ΔH/PCS	Burnout
CA	7,4%	42,9%
CB	12,9%	58,5%
CC	5,4%	62,6%

Não foi possível obter um modelo para predição de composição gasosa, devida a natureza heterogênea das reações. No entanto foi possível definir um fator de expansão adimensional que pode ser determinado para cada carvão em função de seu teor de matéria volátil (Fig. 6). O fator de expansão é definido como na equação 1.

O Fator é definido como a razão entre a variação de volume na combustão e o volume de sopro inicial. Sendo adimensional, o fator pode ser extrapolado diretamente para as condições industriais, sendo uma métrica para a estimar o efeito de um carvão na pressão de sopro em alto-forno.

Fig. 6 - Fatores de expansão (beta) em função do *burnout* para cada carvão.



Equação 1 - Fator de expansão

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_0}$$

Conclusões

- 1 - As temperaturas e taxas de aquecimento, após a correção, estão de acordo com o esperado.
- 2 - É possível estimar *burnouts* com bastante precisão e de forma mais rápida e barata do que por termobalança.
- 4 - O fator de expansão desenvolvido é aparentemente independente dos carvões (*Rank*, MV, etc.) o que permitiria uma generalização para AFs.
- 5 - Não foi possível prever a composição de gases de combustão pelo modelo atual.
- 6 - No simulador, *burnout* (perda de massa por oxidação + volatilização) é um parâmetro diferente de eficiência de combustão (variação de entalpia).

Sugestões para trabalhos futuros

- 1 - Refinar o modelo cinético considerando a matéria volátil.
- 2 - Aumentar o número de termopares na zona de interesse para reduzir a relação sinal/ruído.

Agradecimentos



Referências

CHASE, M.W., Jr., NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition, J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph 9, 1998, 1 -1951

FARAG I.H. Radiative heat transmission from non-lumhious gases. Computational study of the emissivities of water vapor and carbon dioxide (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology), 1989.

MOUSA, E.A., AHMED, H.M., YISYANATHAN N.N., LARSON, M.; Recent Trends in Ironmaking Blast Furnace Tecnology to Mitigate CO₂ Emissions: Tuyeres Injection. Springer pp.173-197, 2016.

WHITAKER S. Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles. AIChE Journal. 1972 Mar;18(2):361-71.