

AVALIAÇÃO DA COMBUSTÃO E CO-COMBUSTÃO DE PNEU INSERVÍVEL E CARVÃO MINERAL EM TERMOBALANÇA VISANDO À INJEÇÃO EM ALTOS-FORNOS*

Gabriel Penna Kramer Lima¹
Hector Alejandro Picarte Fragoso²
Juliana Gonçalves Pohlmann³
Antônio Cezar Farias Vilela⁴
Eduardo Osório⁵

Resumo

Neste trabalho, o comportamento de combustão de pneu inservível e de carvão mineral, assim como o comportamento de co-combustão de suas misturas (5%, 10% e 30% de adição de pneu inservível), foram avaliados a partir de ensaios de combustibilidade em um analisador termogravimétrico, com objetivo de estudar a substituição parcial do carvão pulverizado na sua injeção em altos-fornos (PCI). Também foi feita a caracterização e determinação do poder calorífico superior (PCS) dos combustíveis e suas misturas. O comportamento não aditivo do PCS das misturas revelou que houve um efeito sinérgico positivo pela adição de pneus inservíveis. Em geral, o comportamento de co-combustão das misturas correspondeu à soma dos comportamentos individuais de seus constituintes. Os testes de co-combustão indicaram que a adição do pneu gerou uma redução da temperatura de ignição do carvão. No início da combustão, a adição de pneu inservível aumentou o grau de conversão nos momentos iniciais, e garantiu a manutenção do grau de conversão nos momentos finais da combustão, gerando o efeito de suporte de combustão. A adição de 10% de pneu inservível apresentou o comportamento otimizado, com o melhor equilíbrio entre a melhora do comportamento da combustão e o limite de teor de cinzas requerido.

Palavras-chave: Injeção de Carvão Pulverizado; Pneu inservível; Termobalança; Alto-forno.

COMBUSTION AND CO-COMBUSTION EVALUATION OF WASTE TIRE AND MINERAL COAL IN THERMOGRAVIMETRIC ANALYZER AIMING FOR INJECTION IN BLAST FURNACES

Abstract

In this paper, the combustion behavior of pulverized waste tire and pulverized low-volatile coal, and the co-combustion behavior of their blends (5%, 10% and 30% waste tire addition), were evaluated from combustibility in a thermogravimetric analyzer, aiming to study the partial substitution of pulverized coal (PCI) injected into blast furnaces. The characterization and determination of the higher heating value (HHV) of fuels and their blends were also done. The non-additive behavior of the HHV of the blends revealed that there was a positive synergistic effect by the waste tire addition. In general, the co-combustion behavior of the blends corresponded to the sum of the individual behaviors of their constituents. The co-combustion tests indicated that the addition of the tire generated a reduction of the coal ignition temperature. At combustion beginning, the waste tire addition increased the degree of conversion in the initial moments, and ensured the maintenance of the degree of conversion in the final moments of combustion, generating the combustion support effect. The 10% waste tire addition was presented the optimized behavior, with the best balance between the improvement of the combustion behavior and the required ash content limit.

Keywords: Pulverized Coal Injection; Waste tire; Thermogravimetric analyzer; Blast furnace.

¹ Mestre, Laboratório de Siderurgia (LaSid), PPGE3M/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Mestre, Laboratório de Siderurgia (LaSid), PPGE3M/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Doutora, Laboratório de Siderurgia (LaSid), PPGE3M/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁴ Professor Dr., Laboratório de Siderurgia (LaSid), PPGE3M/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁵ Professor Dr., Laboratório de Siderurgia (LaSid), PPGE3M/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

No cenário da indústria siderúrgica brasileira, todo o carvão mineral utilizado na rota dos altos-fornos, inclusive no processo de injeção de carvão pulverizado (PCI), é importado [1]. Assim, aumentam os custos e a dependência do mercado externo e dos combustíveis fósseis. Tal busca por combustíveis alternativos, nacionais, eficientes e de baixo custo tornou-se foco de estudo em linhas de pesquisa para construir possibilidades concretas de superação desses desafios.

Ao mesmo tempo, a indústria automobilística brasileira enfrenta um desafio com o tratamento de pneus inservíveis. Pneu inservível é definido como pneu que apresenta danos irreparáveis em sua estrutura e que não pode ser utilizado para recauchutagem ou reforma [2]. Atualmente, o Brasil é o sétimo maior produtor de pneus de automóveis e o quinto de pneus de caminhões/ônibus/vans do mundo, com aproximadamente 68 milhões de unidades de pneus, considerando reposição, montadoras e exportação [3]. Assim, a alta produção nacional de pneus promove uma alta geração de pneus inservíveis. Entre 2013 e 2019, o país produziu anualmente mais de 400.000 toneladas de pneus inservíveis [4]. No entanto, ainda não são mensuráveis o tamanho e todas as possíveis rotas de destinação de pneus inservíveis no Brasil, bem como seu potencial de uso.

A partir desses dois cenários, o aproveitamento de pneus inservíveis pela rota do PCI surge como uma potencial alternativa para atender a demanda da siderurgia por combustíveis nacionais, eficientes e de baixo custo para substituir parcialmente o carvão injetado, ao mesmo tempo em que contribui para novas rotas de tratamento de pneus inservíveis.

Por razões decorrentes das características do pneu original e do seu tipo de tratamento, o pneu inservível é um combustível com características heterogêneas. É formado basicamente por uma estrutura polimérica composta por diversas borrachas e aditivos; preenchimento de negro de fumo; e malhas inorgânicas (metálicas e têxteis). Seu alto teor orgânico, associado ao alto teor de carbono, geralmente confere ao pneu inservível um poder calorífico alto o suficiente para garantir uma forte qualidade energética quando usado como combustível [5] [6]. As misturas de borracha conferem ao pneu inservível altas concentrações de material volátil e, portanto, espera-se que possa contribuir para melhorar a combustibilidade dos carvões de baixa volatilidade e a geração de chars mais reativos durante a injeção [7] [8]. Porém, devido ao alto custo dos processos de pulverização e separação do conteúdo inorgânico, muitos pneus inservíveis apresentam altos níveis de malha metálica e têxtil, que podem promover altos teores de cinzas ao combustível. Esses conteúdos podem variar o nível de influência no comportamento de combustão do pneu inservível.

O objetivo deste trabalho corresponde à primeira etapa do estudo da combustibilidade do pneu inservível com alto teor de malha para injeção em altos fornos, que corresponde aos ensaios de análise termogravimétrica, a fim de comparar o comportamento da combustibilidade do pneu inservível e do carvão mineral. Esta etapa é fundamental para entender os princípios básicos do comportamento de combustão das amostras antes da segunda etapa, correspondente aos ensaios em simulador de PCI. Além disso, foi determinado no trabalho o comportamento de combustão das misturas de pneu e carvão, a fim de conhecer os efeitos da adição sobre a combustibilidade e avaliar o potencial para estudos futuros visando a injeção de combustíveis nacionais, eficientes e de baixo custo em PCI.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos combustíveis

O pneu inservível (WT) foi obtido a partir de lotes fornecidos por uma empresa de reciclagem do Espírito Santo, Brasil. Os lotes passaram por um processo de granulação por recuperação criogênica, sendo recebidos em granulometria abaixo de 600 μm . O carvão (C) utilizado foi um carvão baixo volátil tipicamente utilizado em PCI, proveniente de siderúrgica parceira. O carvão foi moído na faixa de 75-25 μm . Foram produzidas 3 misturas binárias de carvão e pneu inservível, com 5%, 10% e 30% de adição de pneu inservível.

A análise imediata e elementar foram conduzidas de acordo com ASTM D7582-15 e ASTM D 5373-93, respectivamente. O poder calorífico superior foi determinado de acordo com ASTM D5865/D5865M-19 em um calorímetro de bomba IKA C200.

2.2 Ensaios de combustibilidade em termobalança

Os ensaios de combustibilidade foram realizados em uma termobalança NETZSCH, modelo STA 409 PC Luxx. Nos ensaios, uma massa de amostra de 20 mg foi colocada no cadinho de alumina e a temperatura foi aumentada de 40 para 1000 °C a uma taxa de aquecimento de 20 °C/min e fluxo de ar de 100 mL/min.

A partir dos perfis de combustão gerados nos ensaios, foi determinada a reatividade, ou taxa aparente de reação, que mede o consumo de reagente em função do tempo de reação. Essa taxa foi determinada para cada ponto ao longo da temperatura usando a Equação 4.1 [9]:

$$R = -\frac{1}{w_0} \left(\frac{dw}{dt} \right) \quad (1)$$

Onde w_0 é a massa inicial livre de cinzas e dw/dt é a variação da perda de massa no tempo t .

Os perfis de combustão permitiram avaliar a combustibilidade do pneu inservível, do carvão e das misturas por meio de três parâmetros característicos:

- Temperatura inicial de combustão (T_i) – corresponde à temperatura de ignição do combustível, considerada como a temperatura na qual a velocidade de reação corresponde a 1/5 da velocidade máxima [10].
- Temperatura máxima de reação ou temperatura de pico (T_p) - corresponde às temperaturas com as máximas taxas de reação. No caso dos pneus inservíveis, pode apresentar mais de uma região com diferentes picos de temperatura devido às diferentes etapas de combustão dos pneus [11].
- Temperatura de combustão final ou de *burnout* (T_f) - temperatura relativa à combustão completa, determinada quando a taxa de perda de massa (DTG) é inferior a 1%/min [12].

Além disso, o perfil de combustão foi utilizado para avaliar o grau de conversão dos combustíveis e suas misturas em determinadas temperaturas ao longo de seu processo de aquecimento. O grau de conversão foi definido através da Equação 4.2, como a porcentagem de contribuição para a combustão já realizada até aquela temperatura, e é um parâmetro amplamente utilizado nos estudos em TGA sobre a

injeção de carvão misturado com materiais poliméricos em PCI, incluindo pneus inservíveis [8] [13].

$$\text{Grau de conversão (\%)} = \frac{m_0 - m_i}{m_0 - m_f} \times 100 \quad (2)$$

Onde m_0 é a massa inicial utilizada, m_i a massa medida a uma determinada temperatura e m_f é a massa final após a combustão. As temperaturas escolhidas foram 500, 600 e 700°C, pois representam, respectivamente, os momentos antes, durante e depois da combustão do char.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização dos combustíveis

3.1.1 Combustíveis individuais

A análise imediata e a análise elementar para os dois combustíveis individuais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Análise imediata elementar dos combustíveis individuais

Combustível	Análise imediata, %				Análise elementar, % (bsic)				
	U	Cz (bs)	MV (bs)	Cfixo (bs)	C	H	N	S	O
Carvão (C)	1,64	9,04	15,58	75,39	93,40	4,33	1,74	0,34	0,20
Pneu inservível (WT)	1,24	12,70	61,42	25,88	88,76	7,96	0,52	2,44	0,33

U - Teor de umidade; Cz - Teor de cinzas; MV - Teor de material volátil; Cfixo - Teor de carbono fixo (por diferença); C - teor carbono; H - teor de hidrogênio; S - enxofre total; O - teor de oxigênio (por diferença); bs - base seca; bsic - base seca isenta de cinzas

O pneu inservível apresenta um teor de voláteis quatro vezes maior que o do carvão, devido à alta concentração de borrachas e à mistura de borrachas relativamente mais leves encontradas em suas estruturas orgânicas. O teor de cinzas de carvão ficou abaixo dos 10% indicados como limite para uso em PCI [14]. No entanto, o pneu inservível apresentou alto teor de cinzas, superior ao limite máximo recomendado para injeção. Isso pode ser justificado pela presença significativa de malha metálica e têxtil. Níveis elevados também podem explicar o baixo teor de carbono fixo, que corresponde à fração orgânica mais resistente do pneu, quase totalmente associado à presença de negro de fumo que, sendo menor quando comparado a pneus inservíveis com menor teor de cinzas [15], apresenta uma fração orgânica que se desvolatiliza durante o aquecimento [11].

A análise elementar revelou um alto percentual de teor de carbono para o carvão, acima de 90%, e um baixo teor de hidrogênio, próximo a 4%. Altos teores de carbono estão relacionados ao alto poder calorífico e alta taxa de substituição, e baixos teores de hidrogênio podem prejudicar aspectos físicos relacionados à densidade e pressão do gás na área de combustão, pois diminuem a concentração de H_2 , que é um gás menos denso, além de ser um redutor energeticamente mais eficiente que o CO, apresentando uma reação de redução do minério de ferro menos endotérmica.

O pneu inservível apresentou maior teor de hidrogênio, o que pode ser associado ao maior teor de voláteis, que pode ajudar a explicar o PCS também mais elevado. Além disso, apresentou teores de carbono relativamente mais baixos, mas ainda

altos quando comparados a outros combustíveis [16], incluindo alguns carvões alto voláteis [17]. Também apresentou um teor de nitrogênio menor que o carvão, o que indica que sua combustão em misturas com o carvão pode resultar em menores níveis de emissão de NO_x. No entanto, o alto teor de enxofre do pneu usado pode ser um desafio, resultante do processo de vulcanização.

3.1.2 Misturas

A análise imediata para as misturas de pneu inservível e carvão mineral estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Análise imediata para misturas

Misturas	Composição	Análise imediata, %			
		U	Cz (bs)	MV (db)	Cfixo (bs)
WT_5%	95% C + 5% WT	1,77	9,06	17,67	73,28
WT_10%	90% C + 10% WT	1,72	9,34	19,91	70,75
WT_30%	70% C + 30% WT	1,59	11,12	28,56	60,32

U - Teor de umidade; Cz - Teor de cinzas; MV - Teor de material volátil; Cfixo - Teor de carbono fixo (por diferença); bs - base seca; bsic - base seca isenta de cinzas

Quase todas as propriedades químicas das misturas mostraram ser aditivas. À medida que aumentava o nível de adição de pneu inservível, havia uma tendência de aumento do teor de cinzas de carvão, superando o limite recomendado para PCI no nível de adição de 30%. Portanto, este nível de adição é indesejável para injeção. Entretanto, todos os demais teores de adição apresentaram teor de cinzas dentro da faixa adequada para injeção, uma vez que o teor relativamente menor de cinzas do carvão possibilitou misturar até 10% de adição de pneu.

Observou-se uma tendência de aumento do teor de voláteis do carvão com a adição do pneu, o que tem um aspecto negativo para a injeção, pois pode causar engaiolamento e arriamento de carga [18], além de promover maior redução da temperatura adiabática de chama [19]. Porém, o valor não deve ultrapassar 40%, considerado o limite de teor de matéria volátil para o carvão. O aumento do teor volátil do carvão, quando dentro do limite, tende a melhorar a queima do carvão para O₂ [20], bem como gerar mais chars reativos ao CO₂ após a queima na zona de combustão [21].

3.2 Avaliação do poder calorífico

O efeito do nível de adição de pneu inservível no comportamento do poder calorífico superior (PCS) das misturas é mostrado na Figura 1.

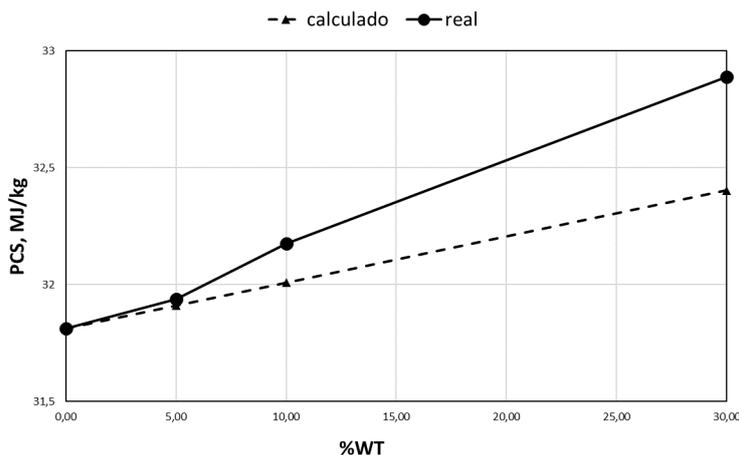


Figura 1. Efeito do nível de adição de pneu inservível no PCS

Todos os combustíveis individuais e misturas apresentaram PCS acima de 30 MJ/kg, recomendados para combustíveis para PCI [14]. No entanto, percebe-se que a adição de pneu inservível gerou um aumento não aditivo no PCS do carvão. Nota-se também que esse efeito sinérgico foi positivo, aumentando com o aumento do nível de adição.

Uma vez que a análise do PCS é baseada em uma reação de combustão realizada em uma bomba de alta pressão, o fenômeno relatado pode estar associado ao efeito de suporte de combustão que ocorre durante a combustão de combustíveis orgânicos com alto teor volátil em misturas com carvão pulverizado [8]. Pode estar relacionado com o aumento das interações entre os voláteis liberados antecipadamente pelo pneu inservível com estrutura de carvão pulverizado e com o aumento da transferência de calor proporcionado pela pressão aplicada ao equipamento, promovendo a aceleração do processo de reação.

3.3 Ensaios de combustibilidade em termobalança

3.3.1 Combustíveis individuais

As curvas de perda de massa (TG) e o comportamento da taxa de reação, derivados das curvas DTG, em função da temperatura para os combustíveis individuais são mostrados na Figura 2.

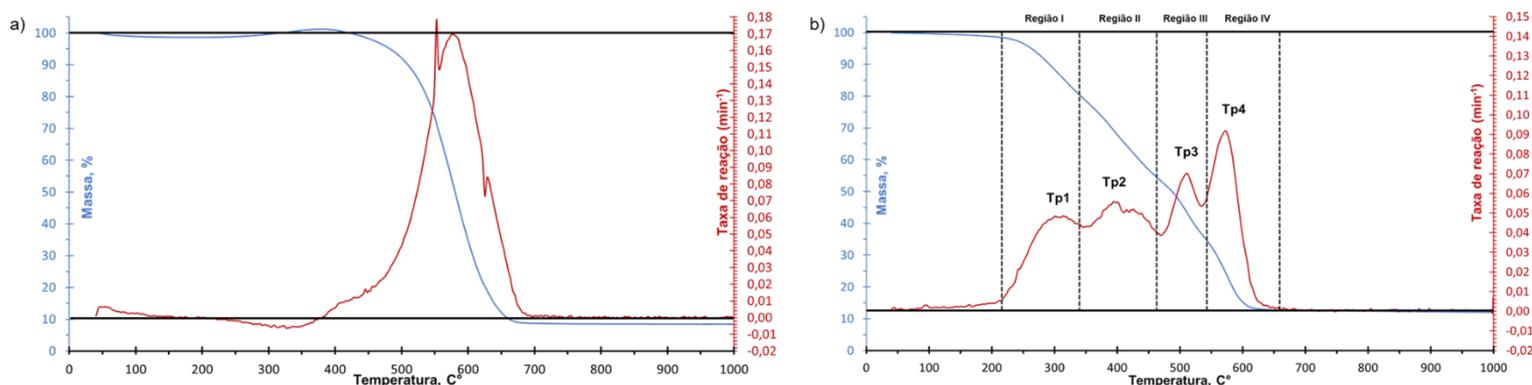


Figura 2. Perfil de combustão de (a) carvão mineral e (b) pneu inservível

As curvas de perda de massa (TG) e o comportamento da taxa de reação, derivados das curvas DTG, em função da temperatura para os combustíveis individuais são mostrados na Figura 2.

O baixo teor de umidade dos materiais implica em pequenos picos de perda de massa no início do ensaio. O aumento da massa do carvão entre 200 e 400 °C está associado ao fenômeno de quimissorção [10]. A alta temperatura de ignição do carvão está associada à baixa combustibilidade do carvão, geralmente aumentando com o aumento do rank [22]. A região de maior perda de massa logo após a ignição indica a liberação e combustão do material volátil. Em temperatura próxima a 550°C, ocorre uma aceleração da perda de massa, indicando o consumo de carbono fixo, associado à combustão do *char* gerado [23]. A temperatura de pico (T_p) ficou próxima a 576 °C, considerada bastante alta quando comparada aos carvões de classificação inferior, e está associada à menor combustibilidade devido ao seu baixo teor de voláteis e geração de chars menos reativos.

No perfil de combustão do pneu inservível, foram identificadas quatro regiões de reação: região I – degradação dos componentes básicos; região II – desvolatilização primária do conteúdo polimérico; região III – desvolatilização secundária do conteúdo polimérico e formação do char; região IV – combustão do char.

O pneu inservível apresentou temperatura de ignição inferior à do carvão, indicando que o pneu inicia a combustão mais rapidamente, o que pode indicar uma maior reatividade desses combustíveis em relação aos carvões de alto rank, principalmente devido ao maior teor de voláteis e à alta quantidade de componentes básicos e borrachas com menores temperaturas de degradação [7] [24].

Na região I, o pico corresponde à degradação dos plastificantes, óleos, aditivos e outros componentes básicos do pneu, de menor massa molecular, que são os primeiros a serem consumidos [25] [26]. Na região II, o pico é a desvolatilização primária da estrutura polimérica do pneu, liberando gases mais leves como CO, CO₂, H₂O, CH₄, alcanos e alcenos de 2 a 3 carbonos. O pico na região III corresponde à desvolatilização secundária da estrutura polimérica, com a degradação dos constituintes mais pesados das borrachas menos resistentes que não foram desvolatilizadas, como a borracha natural (NR), e em maior grau a degradação dos constituintes das borrachas mais resistentes, como polibutadieno (BR) e estireno-butadieno (SBR), que se degradam em temperaturas intermediárias (320 - 420°C) e elevadas (420 - 520 °C) [11]. Por fim, na região IV, ocorre a combustão do char, que apresentou a maior taxa máxima de reação, devido à alta concentração de carbono na fração orgânica remanescente que irá reagir com o oxigênio da atmosfera reativa. A existência de várias regiões de degradação do pneu é uma das razões para a taxa de reação máxima mais baixa para combustão do *char* na região IV quando comparada à combustão do carvão mineral. Outra justificativa é que as características mais metalizadas do pneu poderiam ser a razão pela qual seu alto teor de matéria de origem inorgânica poderia ter absorvido o calor fornecido durante o aquecimento e reduzido as taxas de reação. Para aplicações de PCI, o alto teor de cinzas dos aditivos afeta diretamente a estabilidade e a eficiência da combustão do alto-forno, [27]. Outra razão pode ser o tamanho das partículas dos combustíveis. Sabe-se que a redução da granulometria dos carvões minerais pode melhorar substancialmente seu desempenho de combustão, devido ao favorecimento de fenômenos cinéticos e diminuição do gradiente térmico da superfície em relação ao centro da partícula, aumentando a queima [28].

3.3.2 Misturas

O comportamento da taxa de reação, derivado das curvas DTG, em função da temperatura para as misturas é mostrado na Figura 3.

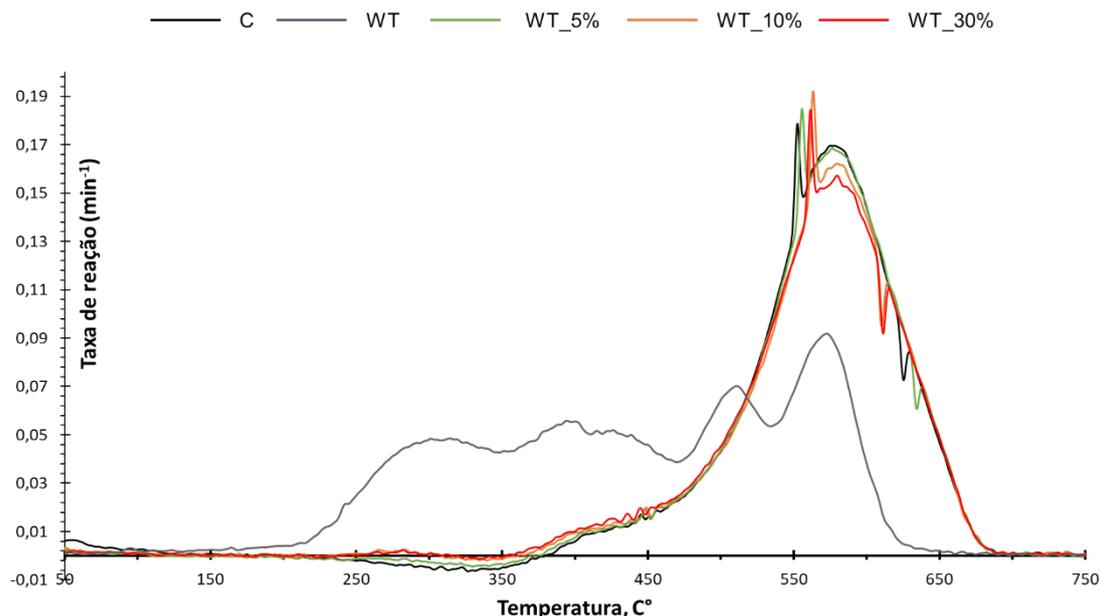


Figura 3. Comportamento da taxa de reação das misturas

O comportamento de combustão das misturas correspondeu à soma dos comportamentos individuais de combustão de seus constituintes individuais. A combustão das misturas apresentou uma região referente à desvolatilização inicial do pneu inservível (200-500°C), e outra referente à desvolatilização do carvão mineral e à combustão dos chars gerados por ambos os combustíveis (500-700°C). A primeira região foi predominantemente impulsionada pela adição do pneu, correspondendo às suas principais regiões de desvolatilização, e a segunda foi regida principalmente pelo carvão mineral, correspondendo à sua região de oxidação do *char* gerado.

Os parâmetros médios obtidos das curvas de blends são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros médios obtidos das misturas

	C	WT_5%	WT_10%	WT_30%
Ti (°C) a	487,02	487,32	483,39	473,32
Tp (°C) b	576,16	576,81	575,99	576,71
Rmáx (min ⁻¹) c	0,1664	0,1657	0,1600	0,1414
Tf (°C) d	669,65	672,67	670,96	664,45
mresidual (%) e	10,21	12,61	10,87	11,18

a - Temperatura inicial; b - Temperatura de pico; c - Taxa máxima de reação; d - Temperatura final; e - Massa residual após a combustão.

De maneira geral, houve uma tendência de redução da temperatura de ignição do carvão com o aumento do nível de adição do pneu inservível. Isso demonstra que, mesmo com granulometrias maiores e alto teor de cinzas, a elevada quantidade de energia liberada pela fração polimérica das partículas do pneu contribuiu para acelerar o processo de combustão do carvão pulverizado [7] [8]. Na região de temperatura mais alta, não houve diferenças significativas nas temperaturas de pico

entre o carvão e as misturas. Isso está diretamente relacionado ao efeito de suporte da combustão do pneu sobre o carvão, pois, além de melhorar a ignição do carvão, a manutenção das temperaturas de pico é um forte indicativo de que não houve redução da combustão do carvão durante a oxidação do *char* para todos os níveis de adição.

Mesmo com temperaturas de pico semelhantes, houve uma redução significativa na velocidade máxima de reação com 30% de adição de nível. Esse efeito pode estar associado ao alto teor de cinzas do pneu, onde a partir de certo nível de adição, o material de origem inorgânica no pneu acaba reduzindo a quantidade de energia disponível para a combustão do *char* do carvão. No entanto, para os níveis de adição de 5 e 10%, não foram identificadas diferenças significativas nas taxas, o que indica que a adição do pneu não foi suficiente para afetar o comportamento do suporte de combustão nesses níveis, o que é um fator positivo para avaliar a viabilidade da injeção de pneus inservíveis em PCI.

Os graus de conversão médios referentes às temperaturas de 500, 600 e 700°C, dos combustíveis individuais e das misturas, são apresentados na Figura 4.

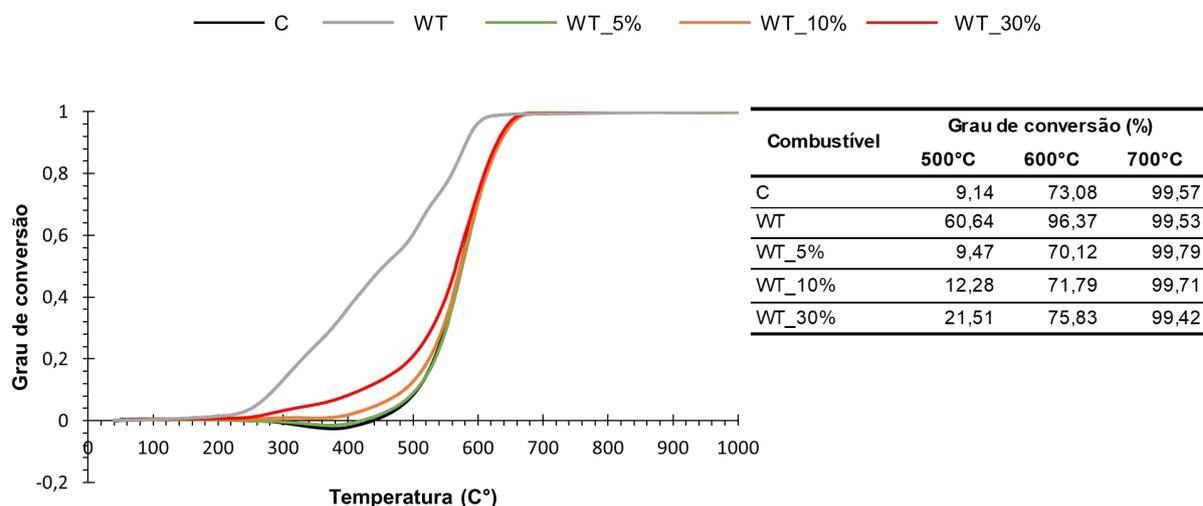


Figura 4. Grau de conversão de combustíveis individuais e misturas

Durante a combustão das misturas, acredita-se que o alto calor de combustão do pneu inservível proveniente das altas quantidades de voláteis até 500°C acabou sendo absorvido pelo carvão pulverizado, gerando um aumento no calor acumulado pelo carvão. Isso resultou em um aumento no grau de inflexão das curvas nessa região, aproximando-se do grau de conversão do carvão. O efeito de suporte de combustão aumentou com o aumento do nível de adição do pneu, melhorando significativamente o comportamento da combustão do carvão. Desta forma, espera-se que nas misturas o carvão atinja o calor acumulado maior que o calor de dissipação antes do tempo que o carvão individual obteria, antecipando a ignição [8] [13].

Espera-se que, em momentos iniciais, a combustão incompleta da porção de pneu inservível nas misturas promova maior liberação de CO do que em relação ao carvão original, melhorando a velocidade de combustão do carvão. Pela figura, foi possível identificar diferenças significativas no grau de conversão até a temperatura de 500 °C a partir da adição de 10% de resíduo de pneu, o que está de acordo com o aumento da inflexão das curvas, indicando que o resíduo de pneu determinou a

combustão naquele período, atuando de fato como antecipador da reação naquele nível de adição.

No entanto, no período posterior, há uma tendência de esgotamento da desvolatilização do pneu inservível. Como o pneu inservível não possui alto teor de carbono fixo, os graus de conversão tornam-se menores devido ao baixo teor de matéria orgânica restante para reagir após os instantes iniciais de combustão. Especificamente pneus com alto teor de cinzas ainda contribuiriam para a redução da combustibilidade nesta região devido à absorção de energia por matéria de origem inorgânica. Assim, a combustão neste período seria determinada pela combustão do carvão, indicando a provável incapacidade do pneu inservível em melhorar a combustibilidade do carvão pulverizado. No entanto, isso não implica que a amostra de pneu estudada neste trabalho não apresente reatividade alta o suficiente para continuar a combustão, a fim de garantir a manutenção do comportamento de combustão do carvão [8].

Para misturas com 5% de adição de pneus inservíveis, não houve melhora no grau de conversão do carvão, havendo maior dificuldade em sustentar a combustão devido à baixa contribuição de voláteis em relação aos demais teores. Já para 30%, foi constatado o melhor comportamento dos graus de conversão durante o aquecimento, devido à alta contribuição dos voláteis na geração de chars de carvões mais reativos. Porém, neste nível de adição, a mistura apresenta alto teor de cinzas, que ultrapassa o limite especificado para alto-forno [14]. Desta forma, a adição de 10% de pneu inservível é a que apresentou o melhor balanço, pois contribui para a melhoria do comportamento da combustão e não ultrapassa o limite do teor de cinzas requerido.

A adição do pneu inservível pulverizado ao carvão no PCI pode aumentar a taxa de combustão do carvão e o grau de conversão durante a ignição, além de gerar chars que garantem o suporte da combustão nas etapas finais do processo. Esta análise está de acordo com o que foi encontrado em testes de termobalança onde foi avaliada a viabilidade de adicionar pneus inservíveis ao carvão para PCI, tanto com alto [7] quanto com baixo [8] teor de cinzas.

4 CONCLUSÃO

O trabalho determinou que o comportamento de combustão do pneu inservível é distinto do carvão mineral, apresentando 4 regiões de reação.

Todas as misturas apresentaram teor de cinzas dentro da faixa adequada para injeção, com exceção da adição de 30%. Houve um efeito sinérgico positivo no poder calorífico superior do carvão com a adição do pneu inservível.

Em geral, houve uma tendência de redução da temperatura de ignição do carvão com o aumento do nível de adição do pneu inservível, o que indica melhora na combustibilidade. O comportamento de combustão das misturas correspondeu à soma dos comportamentos individuais de combustão de seus constituintes individuais. A combustão das misturas foi controlada pelo pneu na região de liberação de voláteis e pelo carvão mineral na região de oxidação do char.

A associação do alto teor volátil liberado do pneu inservível e a alta reatividade de seus chars promoveu o efeito de suporte da combustão do *char* de carvão, aumentando o grau de conversão nos momentos iniciais, e garantindo a manutenção do grau de conversão nos momentos finais de combustão.

A adição de 10% de pneu inservível é a que apresentou o melhor balanço, pois contribui para a melhoria do comportamento da combustão e não ultrapassa o limite do teor de cinzas requerido.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), assim como agradece à ArcelorMittal pelo fornecimento das matérias primas e incentivo financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 IABR. Instituto Aço Brasil. [Online].; 2021 [Acessado em 2022. jan. 22. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/07/Anuario_Completo_2021.pdf.
- 2 CONAMA. Resolução 416 de 30 de Setembro de 2009. [Online].; 2009 [acesso em 2021 mar. 30. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>.
- 3 ANIP. Relatório - Vendas Totais de pneumáticos (reposição + montadoras + exportação) 2020. [Online].; 2021 [Acessado em 2022 mar. 29. Disponível em: <https://www.anip.org.br/sitenovo/wp-content/uploads/2021/02/Vendas-totais.pdf>.
- 4 RECICLANIP. Volume de Pneus Destinados. [Online].; 2021 [acesso em 2021 mar. 30. Disponível em: <https://www.reciclanip.org.br/destinados/>.
- 5 Díez C, Martínez O, Calvo LF, Cara J, Morán A. Pyrolysis of tyres. Influence of the final temperature of the process on emissions and the calorific value the product recovered. Waste Management. 2004; 24: p. 463-469.
- 6 Dourado DC, Rabelo GF, Schirmer WN, Stroparo EC, Barsi FV, Trugilho PF. Determinação do poder calorífico e análise elementar de pneus automotivos inservíveis. Espacios. 2018; 39(4): p. 20 - 35.
- 7 Li X, Ma B, Xu L, Hu Z, Wang X. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres. Thermochimica Acta. 2006 Jan.; 441(1): p. 79 - 83.
- 8 Zhang J, Ren S, Liu Z, Zhou Y, Meng F, Su B. Combustion-Supporting Effect of Common Carbonous Solid Waste on Anthracites. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS). 2012 ago.; 64: p. 1011-1016.
- 9 Ollero P, Serrera A, Arjona R, Alcantarilla. Diffusional effects in TGA gasification experiments for kinetic determination. Fuel. 2002; 81(5): p. 189-200.
- 10 Alonso MJG, Borrego AG, Alvarez D, Kalkreuth W, Menéndez R. Physicochemical transformation of coal particles during pyrolysis and combustion. Fuel. 2001; 80: p. 1857-1870.
- 11 Atal A, Levandis YA. Comparison of the combustion behavior of pulverized waste tyres and coal. Fuel. 1995 Nov.; 74(11): p. 1570-1581.
- 12 Morgan PA, Robertson SD, Unsworth JF. Combustion studies by thermogravimetric analysis - 1. Coal Oxidation. Fuel. 1986 nov.; 65(11): p. 1546-1551.
- 13 Yan B, Zhang J, Guo H, Liu F. Advances in Materials Science for Environmental and Energy Technologies IV. In • Research on simultaneous injection of waste tires with pulverized coal for blast furnace; 2015; Beijing: The American Ceramic Society. p. 135 - 144.
- 14 Carpenter AM. Use of PCI in blast furnaces London: IEA Coal Research; 2006.
- 15 Martinez J, Puy N, Murillo R, Garcia T, Navarro M, Mastral A. Waste tyre pyrolysis – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013 jul.; 23(1): p. 179–213.
- 16 Campos AMA, Novack K, Assis PS. Selection of materials for blast furnace injection using quality indicators. Metallurgy and materials. 2019 Jan; 72(1): p. 119 - 123.

- 17 Fragoso HP. Avaliação da combustibilidade de carvões em simulador de PCI: evolução da metodologia de operação. Porto Alegre, RS: Dissertação submetida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); 2019.
- 18 Defendi GA. Caracterização da cinética de reação e comportamento das cinzas dos carvões minerais injetados através das ventaneiras dos altos-fornos da CST. Porto Alegre, RS: Tese submetida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); 2006.
- 19 Crelling JC. Coal combustion under conditions of blast furnace injection. In In: Ironmaking Conference, n., 1995, Proceedings; 1995;... p. 73-79.
- 20 Lima GPK, Fragoso HAP, Pohlmann JG, Vilela ACF, Osório E. Comportamento de carvões na combustão visando PCI e sua relação com as características químicas, físicas e petrográficas. In 50º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 8º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro - ABM Week 6ª edição; 2021; São Paulo: ABM. p. 10.
- 21 Pohlmann JG, Osório E, Vilela ACF, Diez MA, Borrego AG. Pulverized Combustion under Conventional (O₂/N₂) and Oxy-Fuel (O₂/CO₂) Conditions of Biomasses Treated at Different Temperatures. Fuel Processing Technology. 2017 jan.; 155: p. 174-182.
- 22 Ghetti P. DTG combustion behavior of coal. Correlations with proximate and ultimate analysis data. Fuel. 1986 mai.; 65(5): p. 636-639.
- 23 Carpenter AM, Skorupska NM. Coal combustion - analysis and testing (Série IEACR). 1st ed. Londres: IEA Coal Research; 1993.
- 24 Pan D, Jiang W, Guo R, Huang Y, Pan W. Thermogravimetric and Kinetic Analysis of Co-Combustion of Waste Tires and Coal Blends. ACS Omega. 2021 jul.; 6(1): p. 5479-5484.
- 25 Leung DYC, Wang CL. Kinetic study of scrap tyre pyrolysis and combustion. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 1998 maio; 45(2): p. 153-169.
- 26 Conesa JA, Font R, Fullana A, Caballero JA. Kinetic model for the combustion of tyre wastes. Fuel. 1998 out.; 77(13): p. 1469-1475.
- 27 Kurose R, Ikeda M, Makino H. Combustion characteristics of high ash coal in a pulverized coal combustion. Fuel. 2001; 80(10): p. 1447-1455.
- 28 Fragoso HP, Pohlmann JG, Machado JGMS, Vilela ACF, Osório E. Combustion Behavior of Granulated and Pulverized Coal in a PCI Rig: Combustibility and Pressure Variation Analysis. Journal of Materials Research and Technology. 2019 out.; 8(6): p. 1-6. |