

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE DA BIOMASSA SOBRE O DESEMPENHO DE BRIQUETES AUTORREDUTORES PARA USO EM ALTOS-FORNOS*

Paula Maria Gomes Cunha Leão¹

Tais Birchal Zicker²

José Domingos Ardisson³

Maurício Covcevich Bagatini⁴

Resumo

Na siderurgia, o uso da biomassa apresenta-se como uma alternativa para mitigar as emissões de CO₂ e reduzir o consumo de combustíveis nos altos-fornos. Nesse estudo, briquetes autorredutores constituídos de *pellet feed* e bagaço de cana-de-açúcar tratado em diferentes temperaturas (250, 400 e 550°C) foram produzidos em laboratório, objetivando avaliar a influência da temperatura de pirólise da biomassa sobre o desempenho desses aglomerados quando submetidos a regimes térmicos que representam o alto-forno. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e queda, além de ensaios interrompidos em regime não-isotérmico e atmosfera de nitrogênio. Técnicas de FRX e Mössbauer permitiram acompanhar o conteúdo de ferro e a evolução das fases nos diferentes estágios de aquecimento. Os resultados demonstraram que os briquetes produzidos com biomassa pirolisada em temperatura mais elevada apresentaram uma maior resistência mecânica a frio. A partir dos ensaios interrompidos, observou-se uma diminuição da resistência à compressão com a temperatura, atingindo um valor mínimo a 950°C, seguido por um sutil aumento a 1100°C. Os briquetes com biomassa pirolisada a 550°C alcançaram um maior grau de metalização, porém também apresentaram um maior nível de inchamento. Visando seu uso em altos-fornos, esses briquetes demonstraram um maior desempenho em termos de redução e resistência mecânica quando comparados àqueles com biomassas pirolisadas em menores temperaturas.

Palavras-chave: Biomassa; Pirólise; Briquete; Autorredução.

INFLUENCE OF BIOMASS PYROLYSIS TEMPERATURE ON THE PERFORMANCE OF SELF-REDUCING BRIQUETTES FOR USE IN BLAST FURNACES

Abstract

In the steelmaking, the use of biomass presents itself as an alternative to mitigate CO₂ emissions and reduce fuel consumption in blast furnaces. In this study, self-reducing briquettes composed of pellet feed and sugarcane bagasse treated at different temperatures (250, 400 and 550°C) were produced in laboratory, aiming to evaluate the influence of the biomass pyrolysis temperature on the performance of these agglomerates when subjected to thermal regimes that represent the blast furnace. Compressive strength and drop tests were carried out, as well as interrupted tests in a non-isothermal regime and nitrogen atmosphere. XRF and Mössbauer techniques allowed to identify the iron content and the evolution of phases at different heating stages. The results showed that briquettes produced with biomass pyrolyzed at higher temperature exhibited greater cold mechanical strength. From interrupted tests, a decrease in the compression strength with temperature was observed, reaching a minimum value at 950°C, followed by a subtle increase at 1100°C. Briquettes with biomass pyrolyzed at 550°C achieved a higher metallization degree, but also showed a higher level of swelling. For use in blast furnaces, these briquettes

* Contribuição técnica ao 52º Seminário de Redução de Minérios e Matérias-Primas, parte integrante da ABM Week 8ª edição, realizada de 03 a 05 de setembro de 2024, São Paulo, SP, Brasil.

demonstrated better performance in terms of reduction and mechanical strength when compared to those with biomass pyrolyzed at lower temperatures.

Keywords: Biomass; Pyrolysis; Briquette; Self-reduction.

- ¹ *Engenheira Metalúrgica, Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (PPGEM), Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, MG e Brasil.*
- ² *Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, MG e Brasil.*
- ³ *Físico, PhD, Coordenador dos Laboratórios de Física Aplicada e Espectroscopia Mössbauer, CDTN/CNEN, Belo Horizonte, MG e Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Metalúrgico, PhD, Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, MG e Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Diante do aumento das questões ambientais associadas ao uso de combustíveis fósseis e por ser a biomassa um recurso renovável e considerado neutro em emissões de CO₂ [1], alguns trabalhos têm explorado seu potencial de utilização em diferentes etapas da produção de ferro e aço [2,3]. O uso da biomassa em briquetes autorredutores apresenta-se como uma alternativa para mitigar as emissões de CO₂ geradas pelo uso de agentes redutores de base fóssil, além de reduzir o consumo de combustíveis nos altos-fornos, diminuindo a dependência de carvão mineral e coque. Nesses aglomerados, o agente redutor é adicionado diretamente na mistura, visando um íntimo contato entre os óxidos de ferro e o carbono. Em temperaturas adequadas, o material carbonoso promove a geração de gases redutores com elevada pressão parcial no interior dos briquetes, favorecendo a cinética de redução com velocidades superiores às que ocorrem nos aglomerados tradicionais [4].

Contudo, a utilização de briquetes autorredutores em altos-fornos exige certos requisitos de qualidade, visando seu maior desempenho. De modo geral, esses aglomerados apresentam limitações quanto à sua resistência mecânica, especialmente em altas temperaturas, quando ocorre a desvolatilização e o consumo do agente redutor. De outro lado, um elevado índice de redutibilidade pode ocasionar um aumento da eficiência e produtividade do alto-forno, especialmente na zona de preparação, o que diminui o consumo de combustíveis [5].

Alguns estudos [6-11] já exploraram a utilização da biomassa como agente redutor em aglomerados autorredutores. Rosso Neto *et al.* [6] e Konishi *et al.* [7] avaliaram o efeito da faixa granulométrica da biomassa na redução de briquetes de minério de ferro e carvão vegetal, indicando que um menor tamanho de partículas resulta em uma taxa de reação mais rápida desses aglomerados, com maior perda de massa. Por meio de análises em termobalança, Zuo *et al.* [8] verificaram que maiores relações molares C/O podem resultar no aumento da taxa e fração de redução de misturas autorredutoras. Indicaram, também, que o uso de carga constituída de biomassa em altos-fornos tende a diminuir a temperatura da zona de reserva térmica, além de aumentar a redutibilidade da carga e reduzir o consumo de combustíveis. Ao estudar o comportamento de redução de aglomerados contendo óxidos de ferro e biomassa vegetal a partir de resíduos agrícolas, Liu *et al.* [9] concluíram que a composição da biomassa tem um impacto importante nas propriedades redutoras dos aglomerados autorredutores. Através de experimentos conduzidos isotermicamente a 1200°C, aglomerados produzidos com biomassa com maior teor de carbono e um adequado teor de matéria volátil apresentaram maior grau de redução. Em outro trabalho, briquetes com biomassa tratada em diferentes temperaturas e com diferentes propriedades foram estudados por El-Tawil *et al.* [10]. Segundo os autores, biomassa com alto teor de matéria volátil pode contribuir para a redução, uma vez que os voláteis podem ser liberados em temperaturas mais altas, favorecendo a redução. Em relação à resistência mecânica dos briquetes, nenhuma análise foi mencionada no estudo.

No entanto, a influência da temperatura de pirólise da biomassa ainda não foi totalmente explorada, especialmente quando associada à resistência e redutibilidade de briquetes autorredutores. De acordo com El-Tawil *et al.* [10] e Mathieson *et al.* [12], o tratamento sofrido pela biomassa em função da temperatura pode convertê-la em produtos com características e propriedades adequadas para aplicações metalúrgicas. Nesse contexto, este estudo foi desenvolvido com o objetivo de investigar a influência da temperatura de pirólise do bagaço de cana-de-açúcar no

desempenho de briquetes autorredutores visando sua utilização em altos-fornos. Trata-se de uma abordagem baseada no acompanhamento da variação da resistência mecânica e da evolução dos produtos de redução durante o aquecimento desses aglomerados que se apresentam como potencial alternativa para a substituição de combustíveis fósseis nos altos-fornos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Matérias-primas

Um *pellet feed* proveniente de uma empresa atuante no setor mineral nacional foi empregado como fonte de ferro nos briquetes, com granulometria predominantemente inferior a 212 μm (95%). Como agente redutor, utilizou-se o bagaço de cana-de-açúcar (fonte de biomassa), submetido a 3 diferentes temperaturas de pirólise: 250, 400 e 550°C (vide Figura 1). O processo de pirólise foi conduzido em laboratório através do aquecimento da biomassa *in natura* em atmosfera de N_2 (vazão de 1,5 l/min) a 10°C/min até as temperaturas visadas, seguido por um período de isoterma de 2 h. A análise química do *pellet feed*, determinada pela técnica de Fluorescência de raios-X (FRX), é apresentada na Tabela 1, enquanto a análise imediata da biomassa *in natura* e das biomassas tratadas pode ser visualizada na Tabela 2.

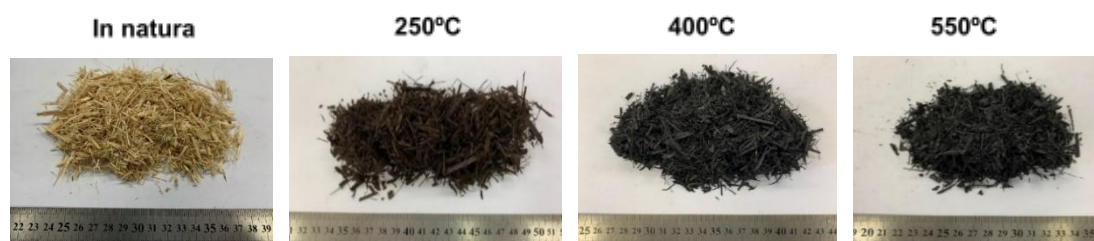


Figura 1. Aspecto visual da biomassa *in natura* e após tratamento em diferentes temperaturas.

Tabela 1. Composição química do *pellet feed* (% em massa)

Fe	SiO_2	Al_2O_3	MgO	MnO	Co	P_2O_5	Cl	LOI	O_{red}
63,23	5,19	2,59	0,625	0,549	0,440	0,267	0,230	2,47	27,17

O_{red} : oxigênio redutível; LOI: perda ao fogo

Tabela 2. Análise imediata da biomassa nas diferentes condições tratadas (% em massa)

Temperatura de pirólise (°C)	Umidade	$\text{C}_{\text{fixo}} (\text{bs})$	Matéria volátil (bs)	Cinzas (bs)
In natura	8,65	16,89	81,25	1,92
250	6,39	22,96	74,31	2,72
400	6,75	65,69	26,39	7,93
550	7,14	76,21	15,18	8,60

bs: base seca

2.2 Produção dos briquetes em laboratório

Durante a etapa de preparação das matérias-primas, o *pellet feed* foi, inicialmente, seco em estufa a 105°C por 12 h e as biomassas pirolisadas cominuídas em granulometria 100% menor que 0,5 mm. As misturas para briquetagem foram compostas por percentuais mássicos de 75% de *pellet feed*, 15% de biomassa pirolisada e 10% de silicato de sódio ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 2,17 e umidade de 52,86%), com adição de água visando umidade total da mistura de 12%. Após

homogeneização por 15 min, a mistura foi adicionada a uma matriz cilíndrica com diâmetro interno de 10 mm e compactada em uma prensa hidráulica utilizando carga de 2 t por um tempo de 3 min. A cura foi realizada posteriormente em forno mufla a 200°C por 2 h.

A Figura 2 exibe o aspecto visual a olho nú e as dimensões finais desses aglomerados, cuja altura média variou de acordo com a biomassa utilizada. Levando em consideração a proporção das matérias-primas e suas respectivas composições químicas, as relações molares C/O (carbono do redutor e oxigênio redutível do minério) obtidas foram de 0,23, 0,64 e 0,75 para os briquetes produzidos com biomassa pirolisada em 250 (B250), 400 (B400) e 550°C (B550), respectivamente.



Figura 2. Briquetes autorredutores produzidos com biomassa pirolisada a 250, 400 e 550°C.

2.3 Resistência mecânica a frio

Os briquetes foram, inicialmente, avaliados quanto à resistência à compressão e teste de queda, visando determinar sua capacidade em se manterem coesos em condições de temperatura ambiente. No ensaio de compressão, 5 briquetes foram submetidos à pressão progressiva em uma máquina universal da marca *Shimadzu*, modelo *Autograph AGS-X*, com carga máxima de 300 kN e velocidade de carregamento de 0,01 mm/s. Já nos ensaios de queda (*Drop Test*), 5 briquetes foram submetidos individualmente a quedas consecutivas de uma altura de 1 metro sobre uma placa de ferro fundido (5 mm de espessura). Esse processo foi repetido até que o maior fragmento coeso dos briquetes apresentasse, aproximadamente, 50% de sua massa inicial. O resultado desse ensaio foi medido pelo número necessário de quedas para provocar essa desintegração.

2.4 Ensaios de aquecimento interrompidos

Os ensaios de aquecimento interrompidos buscaram representar o regime térmico de um alto-forno a coque. Lotes de 6 briquetes foram aquecidos em atmosfera inerte de N_2 com vazão de 7,5 l/min e taxa de aquecimento de 5°C/min até 300, 600, 950 (com isoterma de 30 minutos nessa temperatura representando a zona de reserva térmica do alto-forno) e 1100°C. Em cada uma das temperaturas mencionadas, o ensaio foi interrompido e os briquetes resfriados rapidamente na região superior do tubo de alumina (Figura 3) em N_2 , com o intuito de interromper as reações de autorredução.

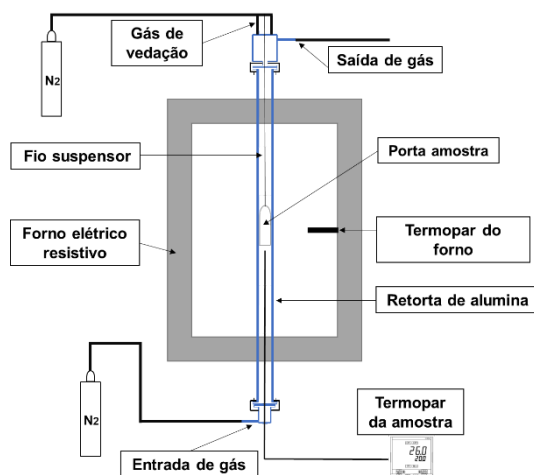


Figura 3. Configuração do sistema empregado nos ensaios interrompidos.

Após cada ensaio interrompido nos diferentes estágios de aquecimento, os briquetes foram analisados quanto à perda de massa, resistência à compressão e caracterização química. A determinação do ferro total foi obtida através da análise de FRX e a quantificação das fases de ferro, pela Espectroscopia *Mössbauer*, por meio de um espectrômetro com aceleração constante e fonte de Fe⁵⁷ em matriz de Rh e Programa *Normos*®. De posse desses resultados, foi possível obter o grau de metalização dos briquetes, calculado através da relação de percentual em massa de ferro metálico e ferro total.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resistência mecânica a frio

Os resultados de resistência à compressão e a queda dos briquetes após cura, bem como seus respectivos desvios-padrões, são apresentados na Tabela 3. Ambos os ensaios indicaram que briquetes constituídos com biomassa pirolisada a 550°C apresentaram uma maior resistência, principalmente, em relação ao ensaio de queda.

Tabela 3. Valores de resistência mecânica dos briquetes após cura

Briquete	Resistência à compressão (N)	Número de quedas
B250	479,40 (± 47,44)	5
B400	226,32 (± 9,19)	4
B550	542,26 (± 71,46)	31

Acredita-se que os fenômenos decorrentes da decomposição térmica dos componentes da biomassa durante sua pirólise possam justificar o comportamento apresentado. Na biomassa pirolisada a 550°C, a hemicelulose e celulose foram degradadas por completo, enquanto a lignina ainda está em processo de degradação [13]. Logo, biomassas submetidas a uma maior temperatura de pirólise têm seu caráter fibroso reduzido e, portanto, de menor elasticidade, conferindo uma estrutura mais coesa aos briquetes. De acordo com Narita *et al.* [14], a recuperação elástica de um material pode gerar trincas que, por sua vez, reduzem a resistência à compressão. Outra razão pode estar associada à maior quantidade de poros nessa biomassa, consequência da maior desvolatilização diante de sua maior temperatura

de pirólise. Assim, a ação do aglomerante em sua estrutura interna é potencializada, permitindo uma maior coesão ao briquete.

Já nos briquetes com biomassa tratada em menores temperaturas, embora a resistência à queda de ambos seja equiparável, os valores de resistência à compressão encontrados para B400 são inferiores ao B250. Na biomassa tratada a 250°C, seus componentes se encontram em uma proporção mais uniforme, apesar de ocorrer a degradação parcial da hemicelulose. Após pirólise a 400°C, a proporção de celulose, como componente mais fibroso, se torna majoritária na biomassa, acarretando uma menor resistência dos briquetes.

3.2 Ensaios de aquecimento interrompidos

3.2.1 Perda de massa

Para todos os briquetes estudados, os resultados indicaram um aumento crescente da perda de massa com o aumento da temperatura e do tempo (Figura 4). Até 300°C, a perda de massa pode ser atribuída à saída de umidade e desidratação parcial do minério e do silicato de sódio, que se iniciam nessa faixa de temperatura [15]. Nos briquetes B250, a perda de massa também deve estar associada à decomposição da matéria volátil remanescente do processo de pirólise da biomassa a 250°C.

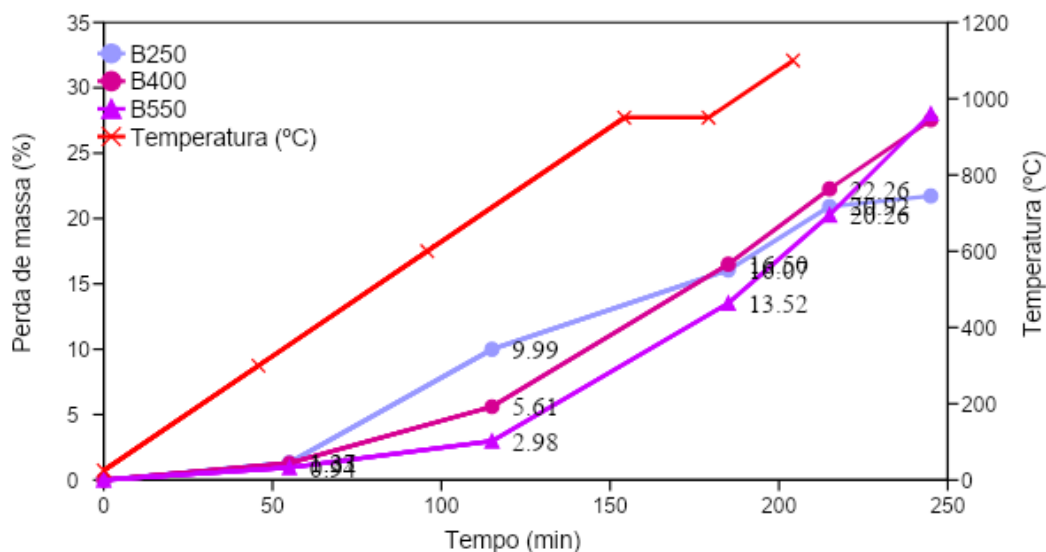


Figura 4. Perda de massa dos briquetes após ensaios interrompidos em diferentes temperaturas.

Já a perda de massa identificada até 600°C deve estar associada, principalmente, à decomposição da matéria volátil das biomassas e uma menor parcela da desidratação do silicato de sódio. Nota-se que os briquetes constituídos de biomassa de menor temperatura de pirólise apresentaram uma perda de massa substancialmente maior, o que se deve ao maior teor de matéria volátil remanescente (vide Tabela 2). Nos ensaios a 950°C, os briquetes apresentaram um aumento considerável da perda de massa, atribuído, em partes, à perda de matéria volátil que se decompõe em altas temperaturas e, principalmente, ao início das reações de redução dos óxidos de ferro. Tal fato pode estar relacionado ao aumento da pressão parcial de CO no interior dos briquetes devido ao consumo de carbono pela reação de *Boudouard*, que tem início em temperaturas próximas a 900°C [16], criando condições que favorecem as reações de redução. Após patamar de 30 min

em 950°C, observou-se um aumento contínuo da perda de massa, provável consequência da continuidade das reações de autorredução. Assim, em 1100°C, os briquetes B550 apresentaram uma perda de massa superior às demais amostras, a qual está possivelmente relacionada à maior quantidade de carbono disponível para reagir, conforme relação molar C/O apresentada na seção 2.2. Uma maior presença de carbono favorece o mecanismo de autorredução, com maior potencial de regenerar o CO₂ no interior do aglomerado pela reação de *Boudouard*, aumentando, por consequência, o grau de redução do aglomerado.

A perda de massa total estimada para os briquetes, considerando os fenômenos de secagem, desidratação, desvolatilização e autorredução, é apresentada na Tabela 4. A autorredução foi determinada a partir do consumo total de carbono fixo e oxigênio redutível contidos nos briquetes. Os teores de matéria volátil e carbono fixo foram calculados com base na quantidade de biomassa adicionada aos briquetes, enquanto o oxigênio redutível se refere ao oxigênio associado ao ferro do *pellet feed* e sua proporção nesses aglomerados. Observa-se, portanto, que os briquetes não atingiram a máxima perda de massa estimada, indicando que a autorredução foi incompleta. Embora a perda de massa teórica para B250 tenha sido superior aos demais, observou-se um menor valor através dos ensaios experimentais. Esse fato pode ser justificado pela insuficiência de carbono para a total remoção do oxigênio, interrompendo as reações de autorredução e, portanto, a perda de massa desses briquetes.

Tabela 4. Perda de massa teórica dos briquetes (%)

Briquete	Desidratação/ Calcinação	Matéria volátil	Autorredução		Perda de massa total
			C _{fixo}	O _{red}	
B250	3,93	11,15	3,44	20,38	38,90
B400	4,18	3,96	9,85	20,38	38,37
B550	3,65	2,28	11,43	20,38	37,74

3.2.2 Caracterização química

As fases de ferro identificadas nos briquetes através de Espectroscopia Mössbauer antes e após os ensaios interrompidos são apresentadas nas Figuras 5 (B250), 6 (B400) e 7 (B550). Em temperatura ambiente, a hematita foi a fase majoritária em todos os briquetes, embora também tenham sido identificadas magnetita e goethita, refletindo a matéria-prima ferrosa empregada nesses aglomerados (*pellet feed*). Nos ensaios a 300 (para B250 e B550) e 600°C (para B400), a goethita não foi mais detectada, consequência da sua decomposição e transformação em hematita, que se inicia em 250°C [17].

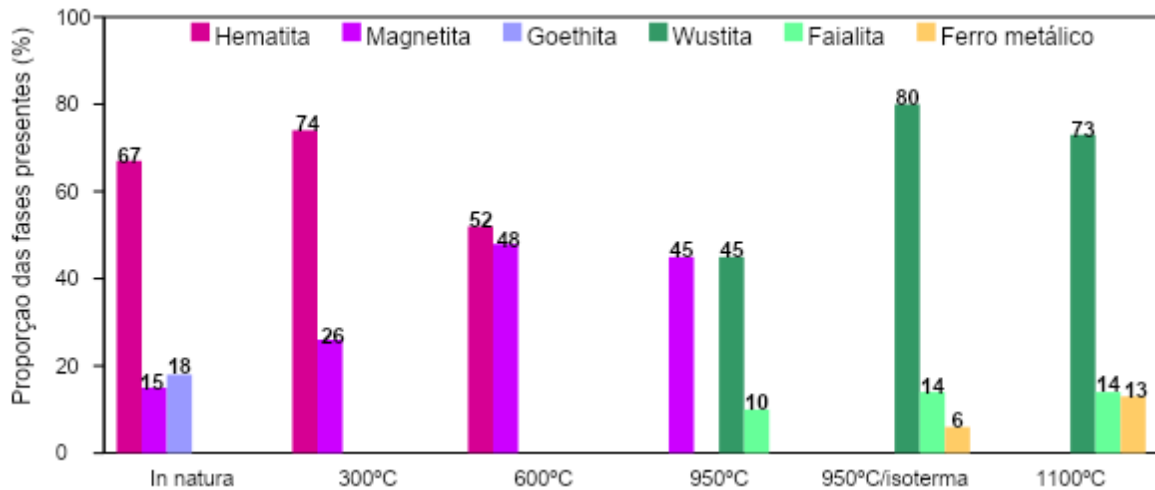


Figura 5. Análises qualitativa e quantitativa das fases de ferro em B250.

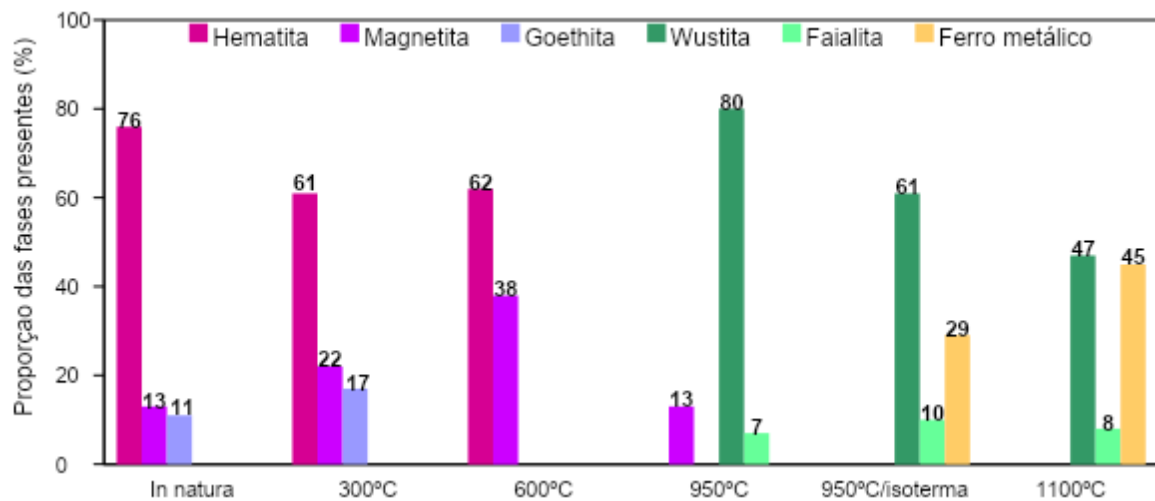


Figura 6. Análises qualitativa e quantitativa das fases de ferro em B400.

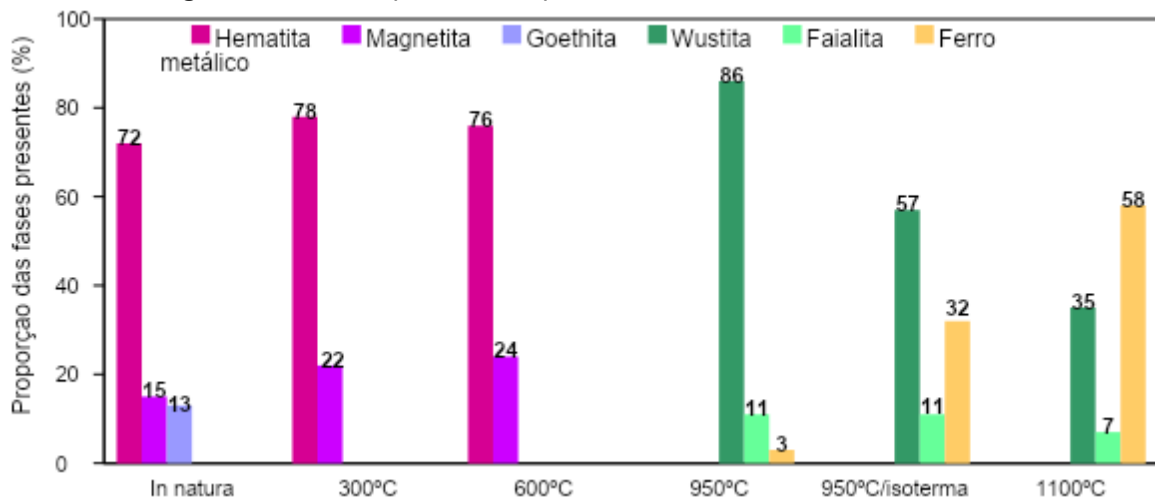


Figura 7. Análises qualitativa e quantitativa das fases de ferro em B550.

A 600°C, observou-se uma presença mais significativa da magnetita, indicando a redução parcial da hematita para magnetita. Essa transição foi mais acentuada nos briquetes B250, possivelmente como resultado da redução por voláteis, uma vez que, nessa condição, a biomassa apresenta um maior teor de matéria volátil,

iniciando sua liberação em menores temperaturas. De acordo com Bagatini *et al.* [18], os voláteis podem apresentar um grande potencial como agente redutor e um papel importante nos aglomerados autorredutores. Em seu estudo, os autores concluíram que os voláteis liberados durante a pirólise da biomassa de eucalipto contribuíram para a redução dos óxidos de ferro hematita e magnetita em temperaturas inferiores a 800°C.

Em 950°C, a hematita não foi mais detectada, revelando que essa fase foi completamente reduzida. Nos briquetes B250 e B400, foram identificadas magnetita, wustita e faialita, apontando para o progresso da redução. Para B550, verificou-se, ainda, o surgimento de ferro metálico. De acordo com as fases formadas e suas proporções, observou-se que o processo de redução ocorreu de forma mais eficiente para briquetes compostos com biomassa pirolisada em maior temperatura. Tal fato deve estar relacionado à maior disponibilidade de carbono fixo para a redução dos óxidos, conforme já discutido. Dessa forma, visando o uso em altos-fornos e considerando os parâmetros operacionais do reator, B550 apresentaram um melhor desempenho. Esses briquetes entrariam na zona de elaboração do alto-forno em um estado mais reduzido, diminuindo, portanto, o consumo de combustível.

Após isoterma de 30 minutos em 950°C, foi identificado ferro metálico em todas as amostras, assim como nos ensaios a 1100°C, cuja presença tornou-se mais pronunciada. Em maiores temperaturas, a reação de *Boudouard* é favorecida e as condições para a redução da wustita em ferro metálico são potencializadas. Observa-se que a redução da wustita progrediu de 950 para 1100°C, mas não se completou. Os resultados obtidos pela análise química confirmam os dados de perda de massa nessa temperatura, indicando que, ainda há material disponível para reagir. Além disso, a partir de 950°C, a presença de faialita foi identificada em todos os briquetes, resultado da associação parcial da wustita com a sílica. Nota-se, inclusive, que a faialita reduziu mais lentamente que a wustita, o que é coerente com a literatura [19].

De posse dos valores de ferro metálico formado e de ferro total identificados nos briquetes nos diferentes estágios de aquecimento, foi calculado o grau de metalização das amostras (Figura 8). Para todos os briquetes estudados, quanto maior a temperatura e o tempo de redução, maior foi o grau de metalização atingido. O uso de biomassa pirolisada a 550°C possibilitou uma maior formação de ferro metálico, que se iniciou em menor temperatura (950°C), resultando em um valor de metalização superior às demais amostras a 1100°C.

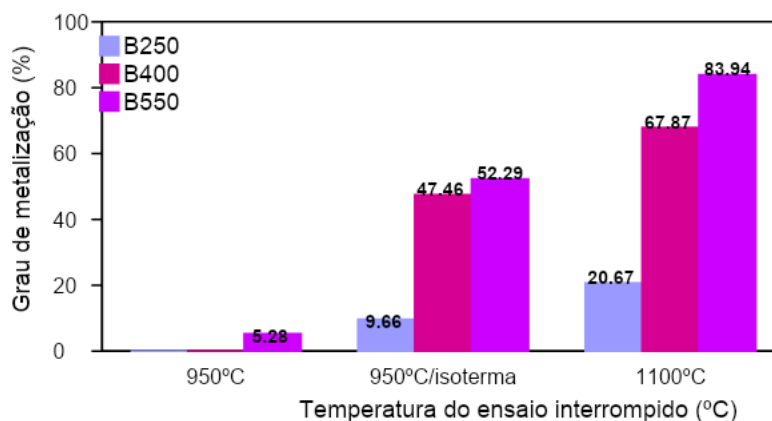


Figura 8. Grau de metalização dos briquetes com o aquecimento a partir de 950°C.

De maneira geral, os resultados de metalização são condizentes com a perda de massa apresentada. Como observado, as amostras não alcançaram a total metalização, assim como não atingiram a total perda de massa prevista. Fica evidente, nesse estudo, que o aumento do teor de carbono até uma relação molar C/O de 0,75 (maior temperatura de pirólise) oferece vantagens para a redução dos óxidos de ferro, com carbono disponível para regenerar o CO₂ formado nesse processo.

3.2.3 Resistência à compressão

A média dos valores da carga máxima suportada por cada briquete antes e após os ensaios interrompidos nas diferentes temperaturas pode ser visualizada na Tabela 5.

Tabela 5. Resistência à compressão (N) dos briquetes após ensaios interrompidos

Briquete	Temperatura do ensaio interrompido (°C)					
	Ambiente	300	600	950	950*	1100
B250	479,40 (±47,44)	474,85 (±67,15)	144,29 (±21,39)	39,40 (±6,79)	28,23 (±4,28)	40,55 (±2,87)
B400	226,32 (±9,19)	221,20 (±7,15)	86,75 (±12,25)	42,87 (±3,76)	19,84 (±4,77)	22,92 (±9,23)
B550	542,26 (±71,46)	425,34 (±7,58)	379,52 (±57,67)	76,12 (±8,67)	22,67 (±5,98)	36,80 (±9,78)

*isoterma de 30 minutos

De modo geral, observou-se uma diminuição da resistência à compressão dos briquetes com a temperatura, atingindo um valor mínimo a 950°C após isoterma de 30 min. Até 600°C, a queda de resistência deve estar vinculada à decomposição térmica do silicato de sódio e à perda de matéria volátil da biomassa, conforme indicado pelos resultados de perda de massa. Nesse intervalo de temperatura, a queda da resistência foi mais expressiva justamente para B250, os quais apresentam maior teor de voláteis.

A menor resistência dos briquetes a 950°C deve estar relacionada à continuidade da desvolatilização e ao consumo do carbono pela reação de *Boudouard*, decorrente da autorredução. Como esse processo ocorre através de intermediários gasosos no interior dos aglomerados, a saída de gases aumenta a pressão interna, contribuindo para a fragilização da estrutura dos aglomerados [20]. Por outro lado, o acréscimo da resistência dos briquetes quando aquecidos a 1100°C deve ser resultado da formação de ferro metálico na superfície desses aglomerados, originando uma estrutura mais resistente e coesa, conforme aponta a literatura [19,20].

A Figura 9 exibe a evolução do aspecto externo dos briquetes nas diferentes temperaturas de ensaio. Em B250, observa-se que, apesar da queda de resistência com o aumento da temperatura, os mesmos mantiveram sua integridade geométrica. Já para os briquetes com biomassa pirolisada a 400 e, especialmente a 550°C, nota-se um inchamento superior a 20% após ensaios em temperaturas mais elevadas (950°C/isoterma e 1100°C), considerado anormal ou catastrófico.

**Figura 9.** Aspecto visual dos briquetes *in natura* e após ensaios interrompidos.

4 CONCLUSÕES

No presente estudo, briquetes produzidos com biomassa de cana-de-açúcar tratada em diferentes temperaturas foram avaliados com vistas ao uso em altos-fornos. Os resultados demonstraram que os briquetes com biomassa pirolisada a 550°C

apresentaram índices superiores de resistência mecânica a frio. Ensaio em regime não-isotérmico indicaram um aumento da perda de massa com a temperatura, de modo que quanto maior a temperatura de pirólise, maior foi a perda de massa final dos briquetes. Nas condições de ensaio empregadas, ao final da isoterma a 950°C, todos os briquetes apresentaram ferro metálico, indicando uma grande eficiência na zona de preparação do alto-forno, com consequente economia de combustível. A 1100°C, B550 atingiram, aproximadamente, 84% de metalização. Os resultados ainda demonstraram uma diminuição da resistência à compressão dos briquetes com o aquecimento, alcançando um valor mínimo a 950°C (após período de isoterma), seguido por um sutil aumento a 1100°C. Observou-se, também, que os briquetes produzidos com biomassa pirolisada a 550°C apresentaram um maior nível de inchamento em comparação aos demais. Contudo, de modo geral, esses briquetes (B550) demonstraram um melhor desempenho em termos de redução e resistência mecânica quando comparados aos briquetes produzidos com biomassas tratadas em menores temperaturas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da CAPES, CNPq e aos laboratórios e técnicos dos Departamentos de Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG e do CDTN.

REFERÊNCIAS

1. Liu Y, Shen Y. Modelling and optimisation of biomass injection in ironmaking blast furnaces. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2021;87:100952.
2. Mousa E, Wang C, Riesbeck J, Larsson M. Biomass applications in iron and steel industry: an overview of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;65:1247-1266.
3. Suopajarvi H, Umeki K, Mousa E, Hedayati A, Romar H, Kemppainen A, *et al.* Use of biomass in integrated steelmaking - Status quo, future needs and comparison to other low CO₂ steel production technologies. *Applied Energy*. 2018;213:384-407.
4. Silva RT, Fernandes TLA, Flores IV, Bagatini MC. Avaliação em alta temperatura de briquetes compostos por carepa e pó de balão. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 18° ENEMET; 2018; São Paulo, Brasil. São Paulo: ABM; 2018. p.192-201.
5. Kowitwarangkul P, Babich A, Senk D. Reduction behavior of self-reducing pellet (SRP) for low height blast furnace. *Steel Research International*. 2014;85(11):1501-1509.
6. Rosso Neto L, Borgert CH, Grillo FF, Oliveira JR, Coleti JL, Frizon TEA, *et al.* Sustainable steel production: evaluating the reduction kinetics of iron ore self-reducing briquettes with eucalyptus charcoal. *Journal of Cleaner Production*. 2024:142426.
7. Konishi H, Ichikawa K, Usui T. Effect of residual volatile matter on reduction of iron oxide in semi-charcoal composite pellets. *ISIJ International*. 2010;50(3):386-389.
8. Zuo HB, Hu ZW, Zhang JL, Li J, Liu ZJ. Direct reduction of iron ore by biomass char. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2013;20(6):514-521.
9. Liu Z, Bi X, Gao Z, Liu W. Carbothermal reduction of iron ore in its concentrate-agricultural waste pellets. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018:1-6.
10. El-Tawil AA, Ahmed HM, Ökvist LS, Björkman B. Self-reduction behavior of bio-coal containing iron ore composites. *Metals*. 2020;10(1):133.
11. Mousa E, Lundgren M, Ökvist LS, From LE, Robles A, Hällsten S, *et al.* Reduced carbon consumption and CO₂ emission at the blast furnace by use of briquettes containing torrefied sawdust. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2019;5(3):391-401.

12. Mathieson JG, Somerville MA, Deev A, Jahanshahi S. Utilization of biomass as an alternative fuel in ironmaking. *Iron Ore*. 2015:581-613.
13. Yang H, Yan R, Chen H, Lee DH, Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*. 2007;86(12-13):1781-1788.
14. Narita CY, Mourao MB, Takano C. Development of composite briquettes of iron ore and coal hardened by heat treatment. *Ironmaking & Steelmaking*. 2014;42(7):548-552.
15. Dutra FC, Dias A, Costa, GM, Emrich M. Influência da temperatura e atmosfera de secagem sobre a resistência mecânica de um aglomerado de minério de ferro para uso em sinterização. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 2º Simpósio de Aglomeração de Minério de Ferro; 2014; Belo Horizonte, Brasil. São Paulo: ABM; 2014. p.5803-5812.
16. Bruno DF, Adrià G, Angeles GB, Díez MA, Osório E, Vilela ACF. Comportamento de carbonização de briquetes de ferro-coque. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 2º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro; 2014; Belo Horizonte, Brasil. São Paulo: ABM; 2014. p.5285-5296.
17. Costa GM, Novack KM, Elias MMC, Cunha CRF. Determinação dos teores de água em minérios de ferro e de manganês. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro; 2013; Belo Horizonte, Brasil. São Paulo: ABM; 2013. p.100-111.
18. Bagatini MC, Kan T, Evans TJ, Strezov V. Iron ore reduction by biomass volatiles. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021;7:215-226.
19. Gandra BF, Paula Junior GE, Bagatini MC, Osório E. Analysis of self-reducing composites with different iron ore-carbon ratio. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;26:6433- 6445.
20. Bagatini MC, Fernandes T, Silva R, Galvão DF, Flores IV. Mill scale and flue dust briquettes as alternative burden to low height blast furnaces. *Journal of Cleaner Production*. 2020;276:124332.