

Recebido em 12/2019. Aceito para publicação em 01/2020.

## DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO ECOLÓGICO NA ÁREA DE METALURGIA EXTRATIVA COMO COMPONENTE DA CARGA DE ALTO-FORNO

### DEVELOPMENT OF AN ECOLOGICAL PRODUCT IN THE FIELD OF EXTRACTIVE METALURGY AS A COMPONENT OF HIGH-OVEN LOAD

Cyntia Esposti Veloso Machado<sup>1</sup>

André Luís de Brito Baptista<sup>2</sup>

Julia Cardoso Landim<sup>3</sup>

Ingrid Ferreira Coutinho<sup>4</sup>

Roberto de Oliveira Magnago<sup>5</sup>

**Resumo:** O presente trabalho destaca a aquisição de pelotas autofundantes na forma de briquetes consolidados a frio, utilizando para isto uma mistura fina de minério de ferro e manganês, CaO, CaCO<sub>3</sub>, dolomita, carvão e coque, aglomerados com escória de processo da refinação de aço de Tipo MRPL (Processo de Refino de Metal por Lance) como matéria-prima. Os resultados indicam que é possível produzir um aglomerado, com todos os resíduos gerados nas siderúrgicas integradas, pressionando e sujeitos a cura natural sem umidificação; A escória pode ser usada como um aglutinante, levando o briquete para apresentar uma resistência à compressão acima de 160 MPa, de acordo com os métodos ASTM C496 e ABNT 7222. Essa resistência é comparável ao valor do pellet e coque queimados. Essa qualidade permite ser carregada em um alto-forno grande e em outros equipamentos similares. Conclui-se que a briquetagem utilizando como ligante a escória de aço, permite atingir uma mistura de finos descartados.

**Palavras-chave:** Briquetagem; briquete; auto-aglomerado; reciclagem.

**Abstract:** The present work highlights the acquisition of self-deepening pellets in the form of cold consolidated briquettes, using for this purpose a fine mixture of iron and manganese ore, CaO, CaCO<sub>3</sub>, dolomite, coal and coke, agglomerated with slag from the refining steel Type MRPL (Bid Metal Refining Process) as raw material. The results indicate that it is possible to produce a cluster, with all the waste generated in the integrated steel mills, pressing and subjected to natural cure without humidification. Slag can be used as a binder, leading the briquette to have a compressive strength above 160 MPa according to the methods ASTM C496 and ABNT 7222. This resistance is comparable to the value of the burned pellet and coke. This quality allows it to be charged in a large blast furnace and other similar equipment. It is concluded that briquetting using steel slag as a binder allows the reach of a mixture of discarded fines.

**Keywords:** Briquetting; briquette; self-clustered; recycling.

## 1 INTRODUÇÃO

O presente estudo busca desenvolver um briquete, resistente às atmosferas

<sup>1</sup> Mestranda em Materiais, Centro Universitário de Volta Redonda - UNIFOA, Brasil. E-mail: cyntiaesposti@hotmail.com.

<sup>2</sup> Mestre em Materiais, Centro Universitário de Volta Redonda - UNIFOA, Brasil. E-mail: andreluisbritobaptista227@gmail.com.

<sup>3</sup> Mestranda em Materiais, Centro Universitário de Volta Redonda - UNIFOA, Brasil. E-mail: juliacardoso15@hotmail.com.

<sup>4</sup> Mestranda em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense - UFF, Brasil. E-mail: ingridfcouto@gmail.com.

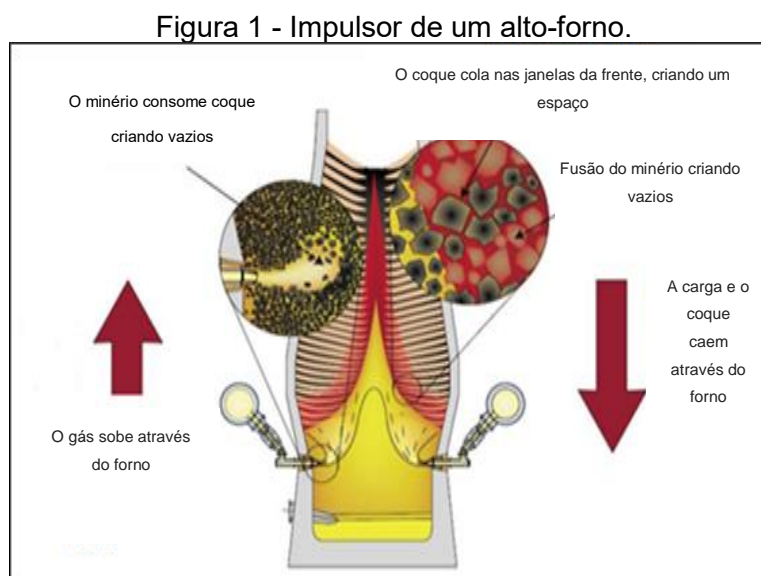
<sup>5</sup> Doutor em Física, Centro Universitário de Volta Redonda - UNIFOA, Universidade Estadual do rio de Janeiro - UERJ, Brasil. E-mail: roberto.magnago@foa.org.br.

dentro de um alto-forno, formado com finos descartados no processo de redução de ferro. O aglutinante é composto por escória de aço, adicionada com cal hidratada, compactada e curada naturalmente. A aceitação esperada para o resultado proposto mostra resistência à compressão diametral, com um valor de resistência mecânica próxima ao do coque (180MPa).

A seleção da matéria-prima para obter o produto dependerá das seguintes qualidades: custo, aceitação e disponibilidade, método de fabricação e preço do produto acabado.

O alto-forno é um reator metalúrgico de alta complexidade, operando em contracorrente com a carga (minério, sinterização, pelotas e / ou briquetes), o redutor (coque ou carvão vegetal), bem como os descalcificadores descendo enquanto os gases gerados subiam internamente.

Centenas de reações ocorrem dentro na presença de estados sólidos, líquidos e gases. Ainda existem grandes gradientes de temperatura. A resistência à carga do alto-forno é ilustrada na Figura 1, conforme ilustrado por Maximiano (2011) (*apud* BAPTÍSTA, 2016, p. 67).



Fonte: Maximiano (2011).

A capacidade de produção depende diretamente do volume interno do forno, que geralmente pode ser menor que 1.500m<sup>3</sup>; entre 1.500m<sup>3</sup> e 3.000m<sup>3</sup> considerados de tamanho médio e acima de 3.000m<sup>3</sup>, grandes.

A Conclusão aborda os resultados da pesquisa de forma a responder as questões apresentadas na introdução; usa-se como título a palavra Conclusão.

Chagas *et al.* (2019) argumenta em seu artigo que, com o desenvolvimento de altos-fornos cada vez maiores, forçaram esses equipamentos cada vez mais exigentes a estar em relação às especificações de carga.

O coque é responsável pelo suprimento de calor, o qual é gerado pelas reações do carbono com o oxigênio e usado em altos e grandes fornos, enquanto nos pequenos o carvão é utilizado. A alto custo, o coque é a principal matéria-prima do alto-forno, por ser o único material que permanece sólido na parte inferior do forno, ele suporta a carga e dá permeabilidade à passagem de gases.

O minério e a escória já estão no estado líquido. Devido à resistência mecânica e alta porosidade, fornecem energia e produzem os gases redutores exigidos pelo processo. Como fator negativo, menciona-se a carburação do ferro líquido. Com essas características, o coque é universalmente utilizado na redução de ferro, a ser obtido a partir de seu minério. Assim, ao desenvolver uma matéria-prima sintética, com requisitos de aplicação, é importante os limites de resistência oferecidos pelo coque, no mínimo 150Mpa e no máximo 180Mpa.

De acordo com Alves (2017), qualquer matéria-prima carregada no alto-forno deve resistir ao peso da coluna de carga de 25 a 30 metros de material no caso do forno de coque e de 15 a 18 metros no forno de carvão.

Tanaka (2014) afirma que o uso de briquetes em altos-fornos é promissor, mas as seguintes condições são atendidas: (i) catalisador da reação de redução, (ii) aumento da marcha e produtividade; (iii) fornecer resistência mecânica para suportar a carga do alto-forno; (iv) manter as características em altas temperaturas.

Petry (2009), (*apud* BAPTÍSTA, 2016), afirmou que o uso de briquetes poderia reduzir o uso de coque ou carvão de 20 para 40%, diminuindo a diminuição de escória durante o processo em aproximadamente 15% a 30%; o consumo de sinter diminuiu em até 35%; reduzindo o uso de minério de ferro em 16% a 20%, calcário em 33% e quartzo em 22%.

O alto-forno é dividido em regiões, como mostra a Figura 2. As matérias-primas passam por várias situações em cada uma dessas regiões, devido ao ambiente termo-redutor predominante e às reações físico-químicas que se desdobram no leito de fusão, portanto, os componentes de carga precisam ser específicos e adequados aos requisitos impostos (CASTRO, 2006 *apud* BAPTÍSTA, 2016).

De acordo com a afirmação de Castro, Gonçalves e Silva (2007), a carga de aglomerados auto-redutores para substituir parte de coque ou carvão, sinterização, minério e pelotas, além de reduzir o consumo de combustível, possibilita a reciclagem de resíduos gerados no processo em si, que exibe um teor considerável de ferro e pouco ou nenhum emprego alternativo.

Os principais custos de produção das siderúrgicas são carvão e coque, minério de ferro, ligas e sucata de níquel e aço.

Para a carga de metal em um nível total de ferro (70 a 75%) superior às pelotas (65 a 66%) e ao sinter (58%), os briquetes são competitivos como matéria-prima para o

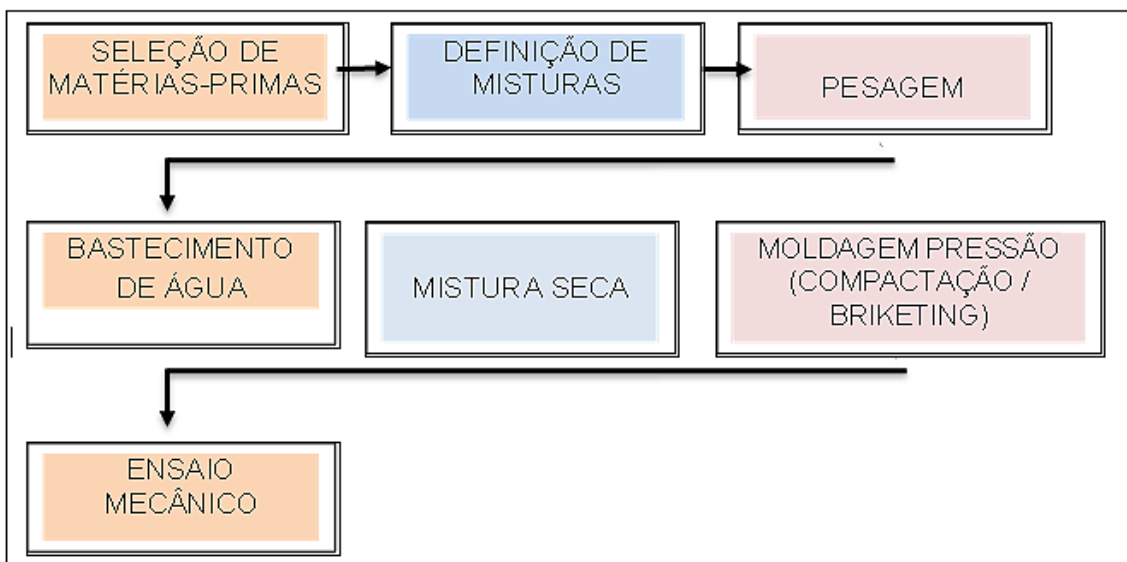
alto-forno. Sabe-se que, para poder utilizar o alto-forno, um ponto importante seria conhecer a resistência do briquete às sucessivas reduções a que o material seria submetido até seu consumo, devido ao manuseio excessivo (BORGES, 2017).

## 2 METODOLOGIA

Para obter os objetivos propostos, o desenvolvimento da produção é exibido nas seguintes etapas no fluxograma da Figura 2.

As matérias-primas selecionadas foram: produtos metálicos (minério de ferro e manganês), fluxos (calcário, dolomita e cal), material combustível (coque e carvão vegetal), ligante (escória LD).

Figura 2 - Etapas de confecção do produto (briquete do tipo aglomerado a frio).



Fonte: Costa, 2002.

Os testes foram conduzidos de acordo com as normas NBR 12654 e ISO 17025. A seleção e amostragem de materiais foram seguidas pela NBR 10007 (ASSOCIAÇÃO..., 2015a, 2017, 2004). As amostras foram fabricadas de acordo com as normas NBR 7680, NBR 5738 e NBR 13729 (TANAKA, 2014; CHAGAS *et al*, 2019; ASSOCIAÇÃO..., 2015b, 2015c, 2019).

Os testes de compressão diametral foram realizados de acordo com as normas ASTM C496 e NBR 7222, em uma máquina de compressão 'Emic PC-150C' (TANAKA, 2014; MAXIMIANO, 2011; ASTM C496, 2017; ASSOCIAÇÃO..., 2011).

A resistência mecânica foi avaliada através do teste de compressão diamétrica dos briquetes e a resistência à fratura de outras matérias-primas utilizadas nos fornos de aço, como carvão, coque, sinterização, calcário, pellet e minério de ferro. Foram

realizados dez ensaios para cada briquete e cinco ensaios para cada matéria-prima. Fotografias macro foram tiradas com câmera manual dos briquetes fraturados. As micrografias da face interna fraturada dos materiais foram feitas em um microscópio eletrônico de varredura, com aumentos de 100 a 1500 vezes.

A figura 3 representa os moldes de briquetes e os briquetes produzidos durante a pesquisa.

Figura 3 - Molde de briquetes e briquetes produzido nesta pesquisa.



Fonte: Os autores.

### 3 RESULTADOS

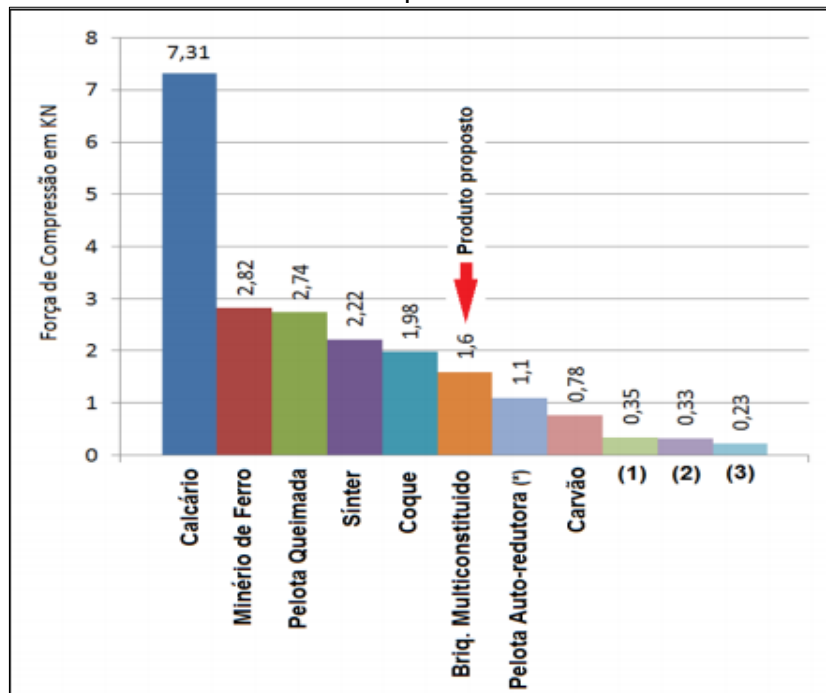
Os resultados das forças de compressão até a fratura dos briquetes e das matérias-primas são mostrados e comparados no gráfico 1. Estes testes foram executados com o objetivo apenas de observar uma ordem de grandeza, sem considerar os valores padrões.

A mistura proposta resistiu à carga até valores próximos aos de coque e sinter, as demais misturas apresentaram valores próximos aos dos briquetes com bentonita; o que sugere mais opções como ligantes para briquetes usados em condições não tão severas quanto as apresentadas em um alto-forno.

Os valores da compressão diametral foram analisados de acordo com a literatura. (STEPHEN; GETTU; RAPHAEL, 2016; CHAGAS *et al.*, 2019; BORGES, 2017).

A tabela 1 mostra os valores médios que podem ser comparáveis aos valores declarados nos estudos.

Gráfico 1 - Resultados de testes simples de compressão em matérias-primas e briquetes.



Fonte: Os autores.

Quadro 1 - Valor médio da compressão diametral.

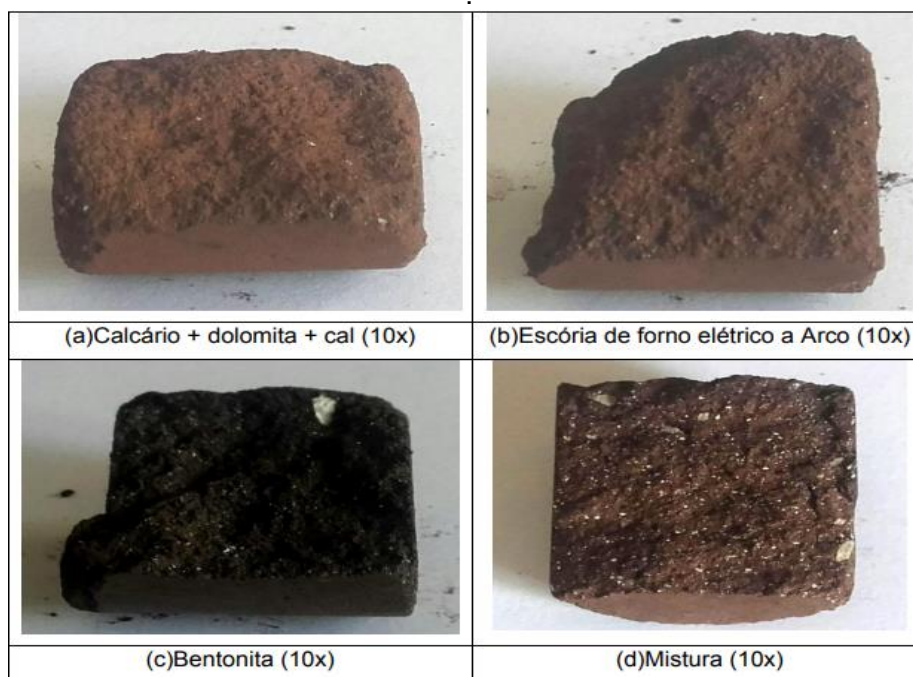
Material Crú	Resistência à Compressão (Mpa)
Briquete de ferro e manganês (bentonita + calcário + dolomita + cal + carvão + coque)	37,95
Briquete de ferro e manganês (Escória elétrica + cal + carvão + coque)	40,5
Briquete de ferro e manganês (calcário + dolomita + limão)	30,25
Multi-composto	190,95

Fonte: Os autores.

As macrofotografias das fraturas são mostradas nas figuras 4 (A) a (D) e as figuras 5 (A) a (D) exibem detalhes da macroestrutura do briquete aglomerado de escória de aço que é o produto desta pesquisa.

Pode-se enfatizar na figura A o aspecto mais pulverulento da mistura Calcário-Dolomita-Cal, gerando menos resistência; a aparência da superfície das principais misturas de ligantes e a escória de fusão elétrica (figura B) e a Bentonita (figura C) são muito semelhantes.

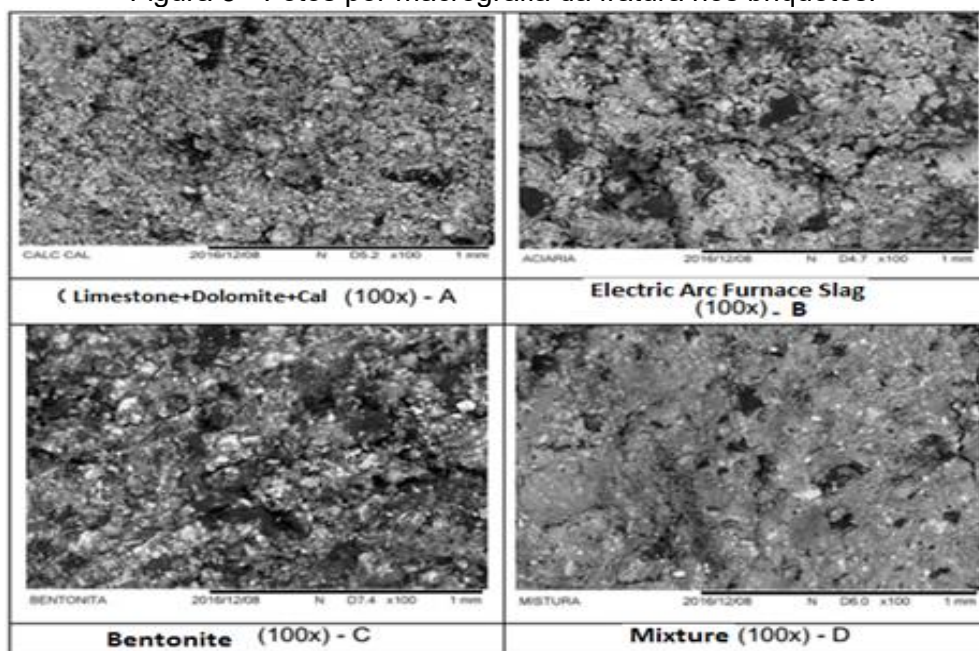
Figura 4 - Macrografias fotográficas de briquetes aglomerados de escória de aço



Fonte: Os autores.

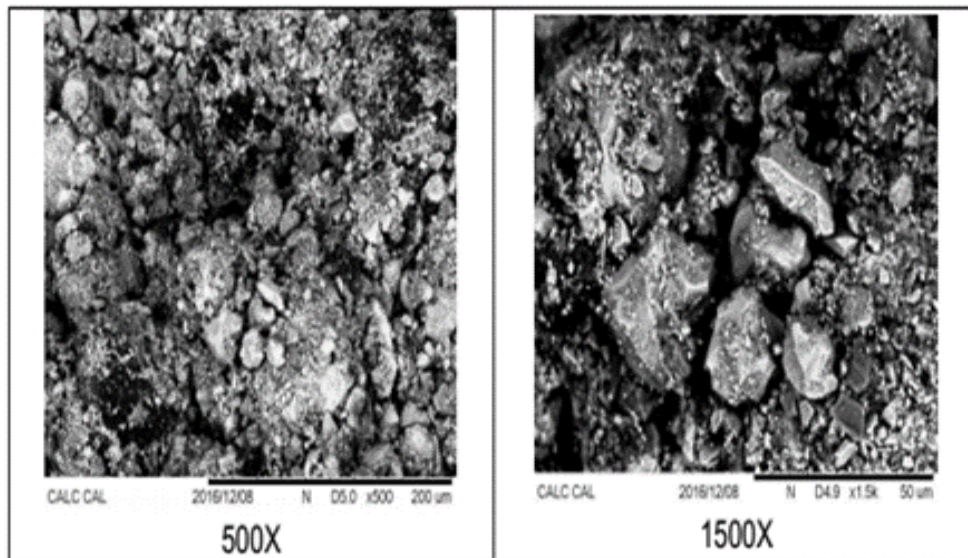
A micrografia mostrada em "D", desenvolvida neste trabalho, apresenta aglomerados mais compactados, com dispersão da fase de cimentação, apresentando valor de força de compressão próximo ao do coque. Observa-se um material desagregado, o que não garante resistência mecânica. A figura 6 apresenta fotos da macrografia do briquete de calcário, dolomita e limão.

Figura 5 - Fotos por macrografia da fratura nos briquetes.



Fonte: Os autores.

Figura 6 - Fotos da macrografia do briquete de calcário, dolomita e limão.



Fonte: Os autores.

#### 4 DISCUSSÃO

Na Figura A, observamos material com alta compactação e fase cimentícia dispersa; na Figura B, vemos fase dispersa com formas e tamanhos variados; apresentando resistência alcançada.

O valor médio da resistência atingida, 191 MPa no briquete multiconstituído (coque máximo de 180 MPa) pode ser baseado em: (i) compactação mecânica (prensagem); (ii) os fenômenos conhecidos como poder de aglomeração a frio; (iii) o fenômeno conhecido como sensibilidade à compressão; (iv) o efeito cimentício da escória; (v) o fenômeno efeito Filler; (vi) a distribuição granulométrica natural das matérias-primas que aumenta a compactação; (vii) a adição ótima de conteúdo de água; (viii) a relação água / cal, (ix) a interação sinérgica entre os materiais de mistura (regra das misturas clássicas) e (x) adição de material pozolano finamente moído.

#### CONCLUSÃO

Com base nos resultados e comparando-os com publicações similares, este trabalho concluiu que é possível utilizar pós finos dos resíduos, ricos em ferro, fluxos e escórias de uma siderúrgica, gerados em uma siderúrgica integrada na forma de briquetes. Pode-se até reduzir a quantidade de material injetado através do alto-forno.

Definindo uma aplicação para escória de aço, o produto proposto aproximava-se do valor de resistência do coque conforme planejado. Este produto, por se fundir automaticamente, oferece o potencial de aumentar a produtividade do alto-forno. Através da prensagem e cura naturais, eliminam a queima. O briquete estudado pode ser usado como carga para os altos-fornos grandes, diminuindo os custos do ferro básico. O produto desenvolvido tem o potencial de atender aos requisitos econômicos



e ecológicos, com foco na reciclagem. Também oferece o uso de resíduos das indústrias de cimento e rochas ornamentais.

Outra biomassa pode ser usada como termo redutor, como descarte da agroindústria, poda e limpeza urbana, indústria moveleira e construção civil. O briquete apresenta projeções de redução de materiais granulares como coque, minério, calcário e dolomita. O produto desenvolvido, por ser uma carga metálica, pode reduzir a necessidade de sinterização e / ou pelotas, diminuindo os custos nesses processos. Além de reduzir a contaminação ambiental proveniente da produção desses aglomerados. O briquete, produto desta pesquisa, mostra potencial de contribuição ambiental e econômica por meio da redução de custos e de recursos naturais, além do impacto social positivo que qualquer material pode oferecer.

## REFERÊNCIAS

ALVES, F.I.C. **Produção de coque metalúrgico a partir de carvão densificado por vibrocompactação em forno de soleira aquecida**. 2017. 77f. Dissertação (Mestrado. em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

ASTM C496 - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. United States: s.n., 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12654**: Controle tecnológico de materiais componentes do concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680**: Concreto - Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13729**: Sinalização metroferroviária - Contador de eixo. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 17025**: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BAPTÍSTA, A. L. B. **Desenvolvimento de um briquete auto-fundente, multiconstituído de rejeitos, resíduos e descartes recicláveis gerados na planta integrada de produção de aço, aplicado como componente da carga de fornos**

**de redução de ferro.** 2016. Dissertação (Mestrado em Materiais) -, Centro Universitário de Volta Redonda – UNIFOA, Volta Redonda, 2016.

BORGES, A. C. L. **Ensaio de compressão de corpo de prova com duplo corte em cunha na avaliação de concretos com baixos teores de fibra de aço.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

CASTRO, J. A.; GONÇALVES, A. P.; SILVA, A. J. Estudo de técnicas de recirculação do gás do leito de sinterização visando diminuir a emissão de dioxinas e furanos. In: Seminário de redução de minério de ferro e matérias primas, 37., Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro da ABM, 8., 2007. **Anais...**, Salvador, 2007.

CHAGAS, L. G. M. et al. Avaliação da resistência de consolos de concreto moldados em duas etapas com a utilização de protensão não aderente. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v.15, n. 1, 2019.

COSTA, M. M. **Princípios de ecologia industrial aplicados à sustentabilidade ambiental e aos sistemas de produção de aço.** Tese de Doutorado em Ciências em Planejamento Energético. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), R.J. - Brasil, Dezembro de 2002.

MAXIMIANO, M. **Estudo da influência da alumina no índice de degradação sob redução do sinter de minério de ferro.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Centro Universitário da Zona Oeste-UEZO, Rio de Janeiro, 2011.

STEPHEN, S.J.; GETTU, R.; RAPHAEL, B. Effect of loading rate on the fracture behavior of fibre reinforced concrete. In: International Conference of Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures – FRAMCOS, 9., 2016. **Proceedings...** Berkeley: IA-FraMCoS, 2016. 6p.

TANAKA, M. T. **Estudo experimental de briquetes autor-redutores e autoaglomerantes de minério de ferro e carvão fóssil.** 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.