

UMA REVISÃO SOBRE A PRODUÇÃO DE AGLOMERADOS DE REJEITOS DA MINERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E CARVÃO COQUEIFICÁVEL PARA USO EM REATORES DE REDUÇÃO*

Paula Maria Gomes Cunha Leão¹

Fabício Vilela Parreira²

Flávio de Castro Dutra³

Silvio Maranhã⁴

Cláudio Batista Vieira⁵

Gilberto Henrique Tavares Álvares da Silva⁵

Resumo

No beneficiamento de minério de ferro, os rejeitos são inerentes aos processos de concentração a que são submetidos os minérios para produção dos produtos comerciais. A grande geração de rejeitos vem motivando o estudo de alternativas tecnológicas para seu reaproveitamento, com o desenvolvimento de processos que contemplem a concentração das partículas finas de minério presentes nos rejeitos, como sua reintrodução no próprio processo de fabricação do ferro e aço, através de técnicas de aglomeração como a briquetagem. O objetivo deste artigo é estudar a viabilidade técnica de produção de briquetes de rejeitos da mineração de ferro e carvão mineral coqueificável para uso em reatores de redução, por meio de uma revisão sistemática da literatura referente aos processos de aglomeração, briquetagem e autorredução, abrangendo as principais variáveis que influenciam na produção de briquetes de alta qualidade, como a utilização de aglomerantes, o comportamento aglomerante do carvão coqueificável, granulometria do carvão mineral, proporção entre minério de ferro e carvão, pressão de compactação e temperatura do tratamento térmico, e os efeitos dessas variáveis sobre as propriedades finais dos briquetes.

Palavras-chave: Rejeitos da Mineração de Ferro; Aglomeração; Carvão Mineral Coqueificável; Autorredução.

FEASIBILITY STUDY OF THE PRODUCTION OF IRON ORE TAILINGS AND COKING COAL AGLOMERATES FOR USE IN REDUCTION REACTORS

Abstract

In the iron ore beneficiation, tailings are inherent in the concentration processes to which the ores are subjected for the production of commercial products. The large generation of tailings has been motivating the study of technological alternatives for its reuse, with the development of processes that contemplate the concentration of fine ore particles present in the tailings, such as the reintroduction of these particles in the process of manufacture of the iron and steel itself, through the agglomeration techniques such as briquetting. The aim of this article is to study the technical feasibility of the production of iron ore tailings and coking coal briquettes for use in reduction reactors, through a systematic review of the literature on agglomeration, briquetting and self-reduction processes, covering the main variables that influence the production of high quality briquettes, such as binders use, binder behavior of coking coal, coal granulometry, iron ore and coal proportion, compacting pressure and temperature of thermal treatment and the effects of these variables on briquettes final properties.

Keywords: Iron Ore Tailings; Agglomeration; Coking Coal; Self-reduction.

¹ Engenheira Metalúrgica, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

² Químico, DSc., Marketing de Minério de Ferro, Centro de Tecnologia de Ferrosos (CTF), Vale, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Metalúrgico, DSc., Marketing de Minério de Ferro, CTF, Vale, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalúrgico, Marketing de Minério de Ferro, CTF, Vale, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil.

⁵ Engenheiro Metalúrgico, DSc., Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Escola de Minas e da REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

No processo de beneficiamento de recursos minerais, apenas uma parcela do ROM (*Run of Mine*) resulta no produto mineral destinado aos setores intermediários, como a indústria de transformação, ou de consumo, enquanto volumes consideráveis de materiais sólidos, não aproveitados economicamente, denominados resíduos da mineração [1], são gerados e se tornam passivos ambientais depositados em barragens ou pilhas segregadas. Estes diferem-se dos resíduos produzidos em outros setores por serem divididos entre estéril e rejeito. Os estéreis são materiais escavados e geralmente dispostos em pilhas, gerados pelas atividades de extração (ou lavra) no decapeamento da mina, sem valor econômico, correspondendo às camadas sobrejacentes ou intercaladas ao corpo do minério [2]. Já os rejeitos são definidos como subprodutos do processo de beneficiamento a que o minério é submetido, oriundos de minerais de ganga, que correspondem à porção mineral com pequeno ou nenhum valor econômico [3]. Os rejeitos são consequências inevitáveis dos processos de tratamento de minérios, sendo gerados, paralelamente, ao produto de interesse. Os processos de lavra e beneficiamento do minério de ferro geram um volume de rejeitos da ordem de 40% [4].

Com objetivo de aproveitar os rejeitos gerados, algumas iniciativas vêm sendo implementadas a fim de se desenvolver processos tecnicamente viáveis que permitam a concentração das partículas finas presentes nos rejeitos, de forma econômica e ambientalmente amigável. Uma alternativa eficaz consiste em sua reintrodução no próprio processo de fabricação do ferro e aço, através de técnicas de aglomeração, as quais surgiram da necessidade de recuperação das frações mais finas oriundas do processamento de minérios, carvões ou resíduos em geral. Durante as operações de lavra, beneficiamento e manuseio do minério de ferro, são gerados ultrafinos inadequados à utilização direta nos reatores de redução para a produção do ferro primário. Minérios ou concentrados de granulometria fina são aglomerados com a finalidade de evitar prejuízos à permeabilidade da carga e às condições de reação gás-sólido no interior dos reatores metalúrgicos [5].

A aglomeração baseia-se em um conjunto de processamentos físicos e/ou químicos aplicados a materiais de granulometria fina, objetivando transformá-los em conjuntos coesos de partículas (através da rígida ligação entre elas), conferindo-lhes tamanho e forma adequados ao uso nos processos industriais posteriores [6]. Os três principais processos de aglomeração de finos usados na indústria minero-metalúrgica são: briquetagem, sinterização e pelotização, cujos produtos finais são o briquete, o sinter e a pelota, respectivamente [5]. O objetivo específico deste artigo é estudar a viabilidade técnica de produção de briquetes de rejeitos da mineração de ferro em formulações com carvão mineral coqueificável, com características necessárias para uso em reatores de redução, através de uma revisão sistemática da literatura referente aos processos de aglomeração, briquetagem e autorredução. Serão consideradas as principais variáveis que influenciam na produção de briquetes de alta qualidade química e física, através da utilização de aglomerantes, a adequação do perfil granulométrico do carvão mineral e do minério de ferro, a proporção ideal entre minério de ferro e carvão, as variáveis da briquetagem, como pressão de compactação e temperatura do tratamento térmico, e finalmente os efeitos dessas variáveis sobre o comportamento aglomerante do carvão coqueificável e seus impactos nas propriedades finais dos briquetes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Briquetagem

A briquetagem é um método de aglomeração de partículas finas por meio da compressão, com auxílio ou não de um aglomerante, promovendo a densificação dessas partículas e permitindo a obtenção de um produto compactado e resistente, denominado briquete. Fundamenta-se na movimentação forçada da mistura entre as partículas finas e o aglomerante, que pode ser prensada a frio ou a quente, através de um molde ou matriz de tamanho e forma apropriados. Depois de fabricados, os briquetes devem apresentar características necessárias à sua aplicação, como resistência à compressão, ao impacto, à abrasão, à penetração de água e ao empilhamento, de forma a garantir condições de transporte, manuseio e utilização em reatores metalúrgicos [5,7].

A qualidade dos briquetes é avaliada por meio de suas propriedades ou baseada em algumas características de comportamento durante sua fabricação e uso. As propriedades das matérias-primas, condições do processo e características dos equipamentos que determinam a qualidade de um briquete são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1. Propriedades dos materiais, do processo e dos equipamentos responsáveis pela qualidade de um briquete [8]

Propriedades geométricas das partículas:	Estrutura Tamanho de partícula Distribuição granulométrica	Densidade Forma da partícula
Propriedades mecânicas das partículas:	Tensão axial Tensão cisalhante	Ângulo de repouso Ângulo de atrito interno
Propriedades químicas das partículas:	Energia superficial Contaminação superficial Coesão entre as partículas	Fenômeno eletrostático Fenômeno de superfície Adesão à superfície externa
Propriedades estruturais dos sólidos:	Densidade Estrutura cristalina	Deslocamentos Geometria molecular
Propriedades mecânicas dos sólidos:	Tensão cisalhante Limite de escoamento Módulo de elasticidade	Dureza Tensão axial Resistência à compressão
Propriedades químicas dos sólidos:	Atrito Impurezas Tipo de ligação química	Composição Método de preparação
Condições do processo:	Pressão Temperatura Tempo de mistura Velocidade dos rolos Tipo de equipamento Modo e tempo de cura	Teor de umidade Taxa de deformação Tempo de compressão Tipo de material briquetado Aglomerantes (tipos e teores) Granulometria das matérias-primas
Características dos equipamentos:	Rolos	Diâmetro Composição dos rolos Tamanho e forma das cavidades dos briquetes
	Alimentador	Efeitos da pressão Pré-compressão dos materiais no alimentador
	Sistema Hidráulico	Rigidez dos rolos
	Mancais	Orientação dos rolos Localização

2.2 Autorredução

A autorredução é uma tecnologia que vem sendo estudada ao longo de vários anos e por numerosos pesquisadores, objetivando avanços em processos siderúrgicos já existentes e, também, no desenvolvimento de novos processos, além da possibilidade de utilização de materiais que são, normalmente, descartados na siderurgia convencional e que, em geral, encontram-se em baixa granulometria, como os finos gerados durante as etapas de extração e beneficiamento do minério de ferro e resíduos do processo, além de diferentes fontes de carbono: carvão mineral, coque ou carvão vegetal [9].

O conceito de autorredução aplica-se quando um agente redutor sólido, geralmente um material com teores razoáveis de carbono fixo, está intimamente misturado e em contato com finos de óxidos metálicos, formando um conjunto coeso que, ao ser submetido a um gradiente térmico propício e em atmosfera controlada, conduz à redução do metal. Para manter a coesão da mistura, muitas vezes são adicionadas substâncias que favorecem a aglomeração, os chamados aglomerantes ou *binders*, sendo o conjunto submetido a um processamento prévio, visando à formação de aglomerados autorredutores, usualmente na forma de briquetes ou pelotas [10]. A briquetagem é, geralmente, utilizada na fabricação destes aglomerados como forma de garantir o íntimo contato entre os óxidos de ferro e o agente redutor, o qual ocorre devido ao fato de que a mistura autorredutora é aglomerada com os constituintes em granulometria relativamente fina [11]. Este tipo de aglomerado pode ser utilizado em diversos reatores de redução-fusão, como os altos-fornos, fornos elétricos a arco (FEA) ou processos como Tecnored, no qual o Brasil tem sido pioneiro em seu desenvolvimento tecnológico [9].

As vantagens da utilização dos aglomerados autorredutores na produção do ferro primário são bem conhecidas, principalmente devido a sua rápida cinética de redução, eficiência energética e possibilidade de utilização de diversos agentes redutores. Dependendo do estado físico de seus constituintes e de sua composição, esses aglomerados podem exibir velocidades de reação superiores às que ocorrem nos processos tradicionais, o que pode favorecer sua utilização em processos onde sejam solicitadas altas taxas de metalização em um curto período de tempo [12]. Tanaka [13] acredita que a utilização de aglomerados autorredutores em altos-fornos apresenta um grande potencial, por permitir a aceleração das reações de redução do óxido de ferro e gaseificação do carbono, com a ocorrência de faixas de menor temperatura, proporcionando uma melhoria na produtividade e diminuindo o consumo energético do reator.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A briquetagem é realizada com aglomerantes quando o material a ser aglomerado não possui resistência à compressão e ao impacto após ser compactado. Por conseguinte, os aglomerantes devem possuir boa propriedade adesiva, compatibilidade química entre as matérias-primas, viscosidade que permita sua distribuição entre as partículas, fácil aplicação, baixo custo, disponibilidade, além de proporcionar aos briquetes boas características de resistência.

Os materiais aglomerantes são classificados em orgânicos e inorgânicos. Os aglomerantes orgânicos, diferentemente dos inorgânicos, têm a vantagem de serem eliminados durante o aquecimento, não contaminando o produto final. Em contrapartida, produzem aglomerados de menor resistência [14].

Entre os aglomerantes inorgânicos, a bentonita é mais utilizada e conhecida para a aglomeração convencional, não autorredutora. É, atualmente, o aglomerante mais usado na pelletização de minério de ferro, já que as argilas têm a capacidade de absorver água, através de suas camadas estruturais, expandindo-se e formando géis que se liquefazem quando agitados e gelatinizam-se quando em repouso, conferindo-lhes poder aglomerante. Sua dosagem nesses processos (% em massa) é da ordem de 0,5 a 0,7% [15]. O silicato de sódio é outro material utilizado como aglomerante na pelletização e briquetagem de minério de ferro, permitindo a consolidação dessas partículas em aglomerados de diversas formas e tamanhos. Nessas circunstâncias, um filme de ligação do silicato de sódio será formado sobre as partículas de minério, melhorando a resistência do aglomerado à temperatura ambiente, tornando a estrutura mais compacta [5]. A cal hidratada é, também, um importante aglomerante empregado na pelletização, contribuindo para a melhoria da resistência das pelotas cruas, originando produtos que aumentam a resistência das pelotas queimadas. A resistência mecânica das pelotas que tem cal hidratada como aglomerante deve-se a reação de recombinação que ocorre do gás carbônico do ar com o hidróxido, formando um carbonato inicial, cujos cristais formados ligam de maneira permanente os grãos do agregado utilizado [15]. Em um estudo abrangendo a produção de briquetes de óxidos de ferro, foi utilizada a cal como agente aglomerante de partículas. Nesse caso, os briquetes produzidos sem aglomerantes apresentaram uma resistência à compressão de 2,45kN. Com a adição de 2% em peso de cal, conferiu-se aos briquetes uma maior resistência à compressão da ordem de 5,29kN [16].

A utilização do cimento como aglomerante (que endurece com “cura a frio”) forma hidratos que conferem resistência aos aglomerados, nos quais a quantidade de cimento varia em valores de até 10% em massa. Seu mecanismo de endurecimento é semelhante ao do concreto, onde os componentes do cimento reagem com a água, hidratando e formando um gel que envolve as partículas. Após a cura normal, de até 28 dias, atinge-se uma boa resistência mecânica a frio. Entretanto, a adição desse aglomerante eleva a quantidade de escória, prejudicando parcialmente os benefícios decorrentes da alta velocidade de redução [17]. Um dos problemas dos aglomerados autorredutores utilizando cimento como aglomerante é sua baixa resistência mecânica na faixa de temperaturas entre 800 e 1000°C (entre as quais ocorrem as principais reações de redução), devido a decomposição dos hidratos, provocando o efeito de inchamento, levando-os à degradação durante a redução [9]. A fim de se obter características apropriadas para resistir às solicitações mecânicas e térmicas em reatores de redução, uma nova tecnologia vem sendo estudada, propondo utilizar a propriedade da plasticidade térmica do carvão mineral coqueificável como aglomerante. Além de servir como agente redutor, o carvão coqueificável, com aquecimento, leva a formação de uma fase plástica (mesofase) contínua que envolve as partículas de minério de ferro e que, ao coqueificar, confere alta resistência mecânica aos briquetes. A utilização da plasticidade térmica é resultado do aquecimento do carvão ao ponto de se obter a fluidificação de parte de sua massa e, posteriormente, a re-solidificação do composto, após sua total desvolatilização devido ao contínuo aquecimento. Durante a solidificação, os constituintes fluidificados do carvão passam por um rearranjo em sua estrutura, transformando-se em “semi-coque”, com elevada resistência mecânica [13]. Trata-se de um processo no qual não há necessidade de se adicionar aglomerantes à mistura, não há aumento na quantidade de escória e é possível manter a resistência às altas temperaturas (800 a 1000°C). Entretanto, necessita-se de carvão de alta

fluidez e da ocorrência dos processos de briquetagem a quente (400 a 600°C) ou briquetagem a frio seguida por tratamento térmico [9]. No processo de briquetagem sem o uso de aglomerantes, seu sucesso dependerá da composição do carvão e da pressão de briquetagem. A pressão utilizada deve ser suficiente para conferir a deformação plástica do carvão, de forma que as partículas estejam posicionadas o mais próximo umas das outras, compensando a ausência de uma substância com poder aglomerante [13].

Uma metodologia para a produção de aglomerados de minério de ferro e carvão mineral coqueificável sem a necessidade de utilização de nenhum tipo de aglomerante ocorre por meio da briquetagem a frio, onde a mistura entre os constituintes é compactada e, em seguida, um tratamento térmico é realizado. Dessa forma, a manifestação da plasticidade térmica do carvão ocorrerá após a etapa de briquetagem, em um segundo processo com aquecimento em temperaturas superiores a 350°C.

A seguir, é apresentada a influência de diversas variáveis de processo nas propriedades desses aglomerados (briquetes de minério de ferro e carvão mineral), indicando os principais parâmetros a serem considerados, de modo a obter melhores resultados no processo de briquetagem.

A granulometria do carvão mineral é uma variável que afeta a resistência mecânica e a densidade dos briquetes, podendo ser observada na Figura 1, em análises antes e após a realização do tratamento térmico [18].

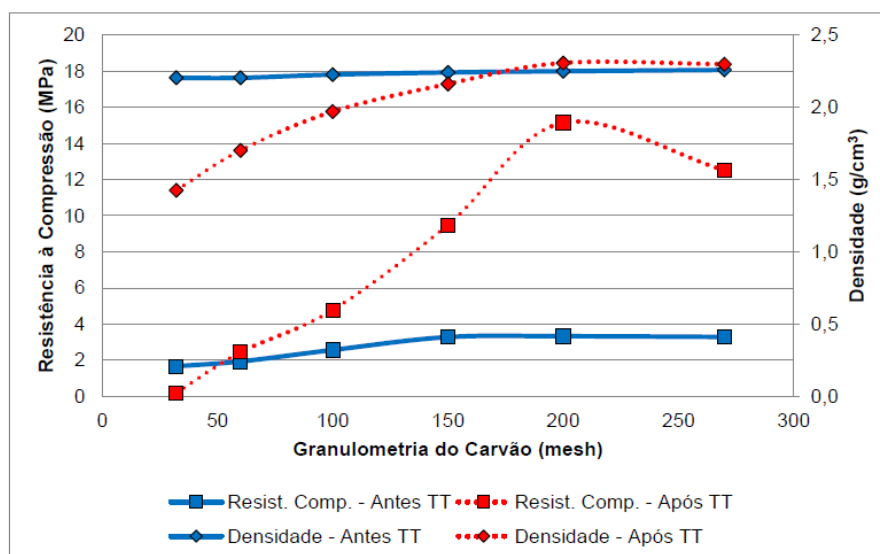


Figura 1. Curvas de resistência à compressão e densidade dos briquetes antes e após o tratamento térmico a 500°C/1h em função da granulometria do carvão (25% em massa de carvão) [18].

Antes da realização do tratamento térmico, nota-se que a resistência à compressão dos briquetes produzidos tende a aumentar com a diminuição do tamanho de partícula do carvão, permanecendo praticamente constante a partir de um tamanho de grão de 150 *mesh*. Após o tratamento térmico, a resistência dos briquetes aumenta à medida que o tamanho de partícula do carvão diminui, atingindo um máximo para uma granulometria de 200 *mesh*, a partir da qual a resistência começa a diminuir. Percebe-se, também, a influência da granulometria do carvão na densidade dos briquetes, que aumenta conforme a diminuição do tamanho de partícula do carvão, com uma estabilização a partir de 200 *mesh*.

Em outro estudo [13], o efeito da granulometria do carvão é analisado (Figura 2), verificando-se melhores resultados de resistência à compressão utilizando finos passantes em peneiras de 200 *mesh*, ocorrendo um aumento da resistência até esse tamanho de partícula e posterior diminuição da mesma, indicando como essa variável apresenta impacto direto no desempenho final dos briquetes. Esses resultados mostram-se semelhantes a outros encontrados na literatura, a qual aponta valores satisfatórios de resistência à compressão com peneiramento na faixa de 140 *mesh* [13].

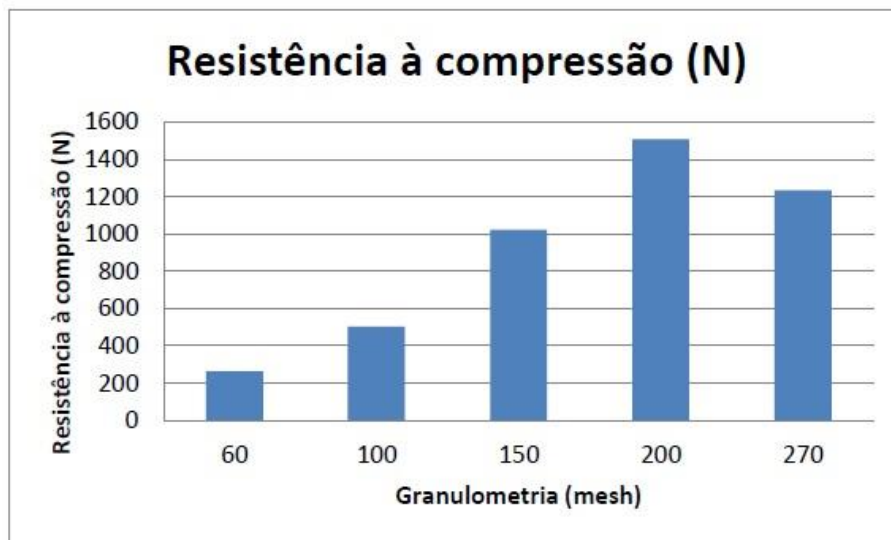


Figura 2. Gráfico da resistência à compressão em função da granulometria do carvão após tratamento térmico a 500°C/1h (25% em massa de carvão) [13].

A Figura 3 exibe as curvas de resistência à compressão e densidade em função de uma segunda variável de processo estudada: a quantidade de carvão mineral coqueificável presente na mistura briquetada, antes e após o tratamento térmico.

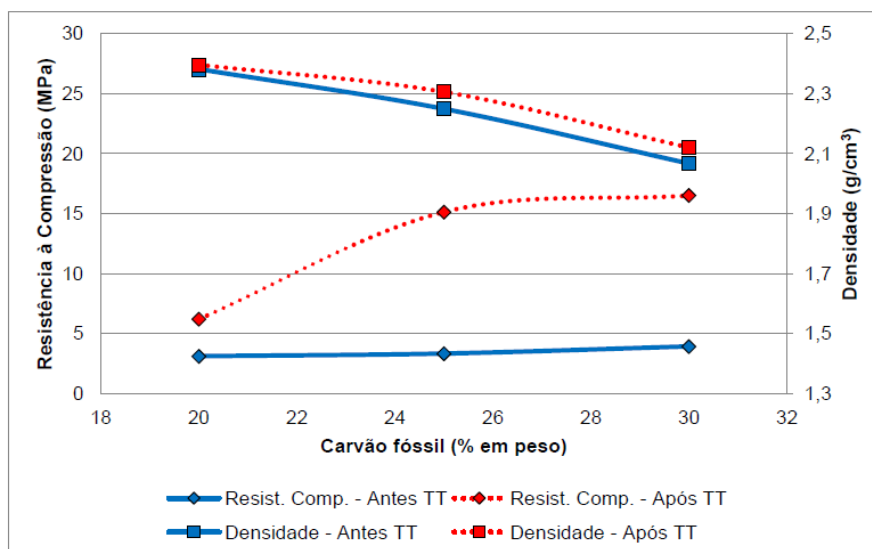


Figura 3. Curvas de resistência à compressão e densidade dos briquetes antes e após o tratamento térmico a 500°C/1h em função da quantidade de carvão mineral [18].

Para maiores quantidades de carvão mineral na mistura briquetada, antes e depois de ser tratada termicamente, aumenta-se a resistência à compressão dos briquetes,

observando a importância do carvão como agente aglomerante, não havendo, obrigatoriamente, a necessidade de adição de aglomerantes na mistura. Verifica-se, após o tratamento térmico, um ganho expressivo da resistência à compressão quando a porcentagem de carvão aumenta de 20 para 25%, porém esse valor é pouco significativo quando se varia a quantidade de carvão de 25 para 30%, não justificando, portanto, uma adição maior de carvão. Sendo assim, a quantidade ideal de carvão em uma mistura briquetada deve ser limitada tanto pela viabilidade econômica, uma vez que o carvão coqueificável é o de maior valor no mercado, quanto pela viabilidade técnica, considerando que o excesso de carvão não contribui significativamente para o aumento da resistência dos briquetes. Portanto, a quantidade de carvão não deve ultrapassar a quantidade necessária à redução do minério de ferro. O gráfico também apresenta a influência da quantidade de carvão nos valores de densidade dos briquetes produzidos, que diminuem com o aumento dessa variável.

A Figura 4 indica como a pressão de compactação influencia na resistência à compressão e na densidade dos briquetes, antes e após a realização do tratamento térmico.

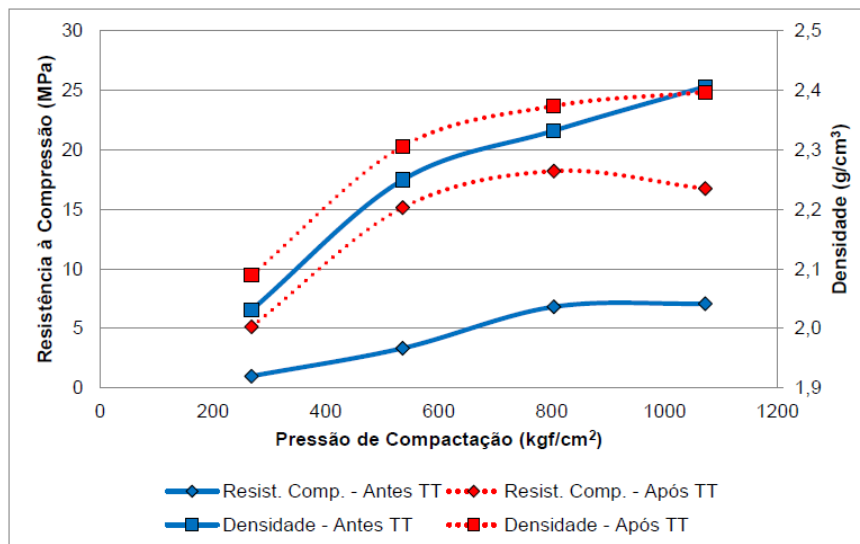


Figura 4. Curvas de resistência à compressão e densidade dos briquetes antes e após o tratamento térmico a 500°C/1h em função da pressão de compactação (25% em massa de carvão) [18].

Pela figura, percebe-se uma forte influência da pressão de compactação na resistência à compressão dos briquetes antes do tratamento térmico. Porém, essa influência só é notada em pressões menores que 800kgf/cm². A partir desse valor, observa-se um aumento da resistência em uma menor taxa. Realizado o tratamento térmico, verifica-se que o aumento contínuo da pressão de compactação não é sempre benéfico para o processo de briquetagem, ocorrendo uma diminuição da resistência com o aumento da pressão, a partir do ponto em que atinge-se o valor de aproximadamente 800kgf/cm², reflexo das trincas geradas durante a conformação a frio do briquete e que não desaparecem durante o tratamento térmico. Já a variação da densidade em função da pressão de compactação ocorre de forma praticamente linear: à medida que aumenta-se a pressão de compactação, maiores valores de densidade são observados [18].

A temperatura de realização do tratamento térmico é uma variável extremamente importante na determinação do comportamento aglomerante do carvão. Sua

influência sobre as propriedades de resistência à compressão e densidade dos briquetes é exibida na Figura 5.

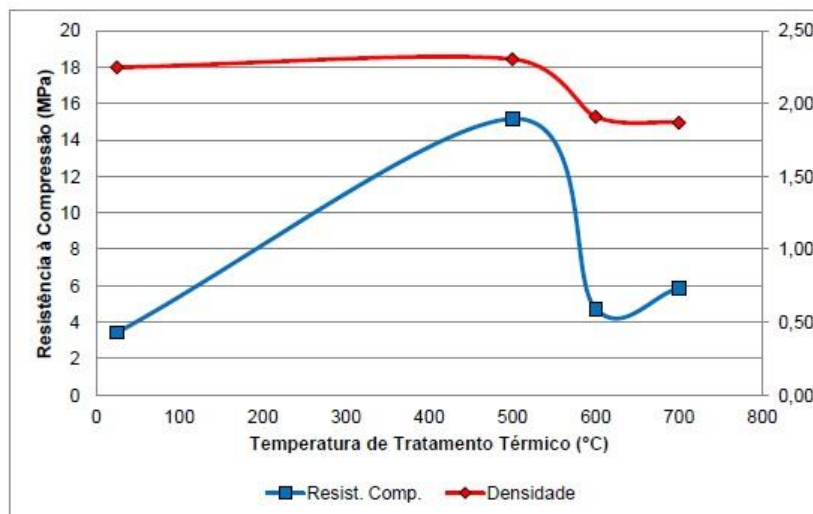


Figura 5. Curvas de resistência à compressão e densidade dos briquetes em função da temperatura do tratamento térmico realizado em 1h (25% em massa de carvão) [19].

Através desse gráfico, verifica-se que a resistência à compressão aumenta até atingir uma temperatura de aproximadamente 500°C, ocorrendo uma drástica diminuição dessa propriedade a partir desse valor. Logo, temperaturas maiores que 500°C podem prejudicar a resistência dos briquetes. O mesmo pode ser observado para os valores de densidade, os quais, nessa mesma temperatura, sofrem uma queda, já que as porções de carvão que antes não se volatilizavam por causa das baixas temperaturas, passam a ter condições de volatilização em altas temperaturas [19].

A avaliação do efeito da temperatura do tratamento térmico também pode ser observada na Figura 6, confirmando os dados encontrados na literatura, nos quais o tratamento térmico acima da temperatura de solidificação (490°C) leva a uma queda nos valores de resistência à compressão dos briquetes. A literatura aponta que o tratamento térmico é mais efetivo quando se trabalha com a máxima fluidez do carvão. Logo, a temperatura ideal de realização do tratamento térmico situa-se na faixa de temperatura de fluidificação do carvão [13]. Os briquetes devem ser aquecidos em uma faixa de temperatura onde ocorra a manifestação da plasticidade térmica do carvão - fase plástica (350-550°C), atuando como agente aglomerante dos briquetes.

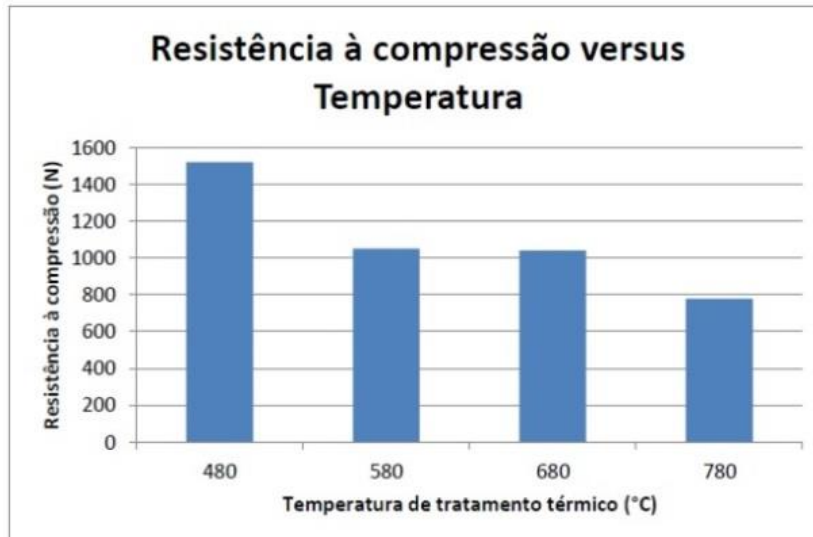


Figura 6. Gráfico da resistência à compressão em função da temperatura do tratamento térmico realizado em 1h (25% em massa de carvão) [13].

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho confirma, através de uma sistemática revisão da literatura sobre a aglomeração de minério de ferro e carvão mineral, a viabilidade técnica de produção de briquetes constituídos de rejeitos da mineração de ferro e carvão coqueificável para uso em reatores de redução, identificando-se as variáveis mais importantes a serem consideradas na fabricação desses briquetes e a influência que exercem sobre seu processo de produção e em suas principais propriedades, contribuindo para o desenvolvimento de trabalhos futuros que envolvam a briquetagem de rejeitos e carvão mineral. O uso de aglomerantes na mistura briquetada é destacado em função de conferir maior resistência à compressão e ao impacto e proporcionar a adesão das partículas. Entretanto, com a realização do tratamento térmico após a briquetagem, observa-se que a aglomeração ocorrerá devido à plasticidade térmica do carvão, quando os briquetes são aquecidos em uma faixa de temperatura referente à fase plástica do carvão, o qual atuará como agente redutor e aglomerante. Ademais, ressalta-se a importância dos processos de aglomeração como alternativas para a recuperação das frações mais finas oriundas do processamento de minério, carvão e resíduos siderúrgicos e para o reprocessamento do grande volume de rejeito gerado nas usinas de beneficiamento de minério de ferro.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (REDEMAT), à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), FAPEMIG e CAPES.

REFERÊNCIAS

- 1 Moraes SL, Motta FG, Massola CP, Saccoccio EM, Cabral Jr. M. Rejeitos de mineração: um olhar do cenário brasileiro - parte I: cadeia produtiva. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 18º Simpósio de Mineração; De 02 a 06 de Outubro de 2017; São Paulo, Brasil. São Paulo: ABM; 2017. p. 228-240.

- 2 Lozano, FAE. Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica [Dissertação]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2006.
- 3 Milonas JG. Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeito de minério de ferro em aterro hidráulico [Dissertação]. Brasília: Universidade de Brasília; 2006.
- 4 Portes AMC. Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta [Dissertação]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2013.
- 5 Dutra FC. Estudos fenomenológicos associados à aplicação de silicato de sódio em aglomeração a frio de finos de minério de ferro [Tese]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2015.
- 6 Buzin PJWK. Desenvolvimento de briquetes autorredutores a partir de carepas de processamento siderúrgico para utilização em forno elétrico a arco [Dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2009.
- 7 Sousa TA. Desenvolvimento de briquetes autorredutores com resíduo de fundição e fibra da palmeira [Dissertação]. Volta Redonda: Centro Universitário de Volta Redonda; 2012.
- 8 Carvalho EA, Brinck V. Aglomeração. In: Luz AM, Sampaio JA, França SCA. Tratamento de minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT; 2010. p. 613-636.
- 9 Takano C, Narita CY, Mourão MB. Ligantes alternativos para aglomerados autorredutores: uma análise. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 4º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro; De 26 a 30 de Setembro de 2016; Rio de Janeiro, Brasil. São Paulo: ABM, 2016. p. 621-630.
- 10 Mourão MB, Takano C. Self-reducing pellets for ironmaking: reaction rate and processing. Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review. 2003; 24(3-4): 183-202.
- 11 Buzin PJWK, Flores BD, Heck NC, Vilela ACF. Briquetes autorredutores a partir de carepas de processamento siderúrgico para utilização em fornos elétricos a arco. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro; De 17 a 21 de Agosto de 2015; Rio de Janeiro, Brasil. São Paulo: ABM, 2015. p. 316-326.
- 12 D'Abreu JC, Mourão MB, Costa PHC, Noldi Jr. JH, Marcheze E. Curso de Auto-redução Carbo-metalotérmica. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 7º Simpósio Brasil-Japão; 2008; São Paulo, Brasil. São Paulo: ABM; 2008.
- 13 Tanaka MT. Estudo experimental de briquetes autorredutores e auto-aglomerantes de minério de ferro e carvão fóssil [Dissertação]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2014.
- 14 Zambrano AP, Takano C, Mourão MB, Tagusagawa SY. Influence of the binder on the mechanical properties of the chromite self-reducing pellets. International Journal of Business, Humanities and Technology - IJBHT. 2013; 3(8): 99-108.
- 15 Zambrano AP, Takano C, Nogueira AEA, Mourão MB, Tagusagawa SY. Influência dos aglomerantes nas propriedades mecânicas e no processo de redução da pelota auto-redutora de cromita. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 14º Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas; De 21 a 25 de Julho de 2014; São Paulo, Brasil. São Paulo: ABM; 2014. p. 3147-3164.
- 16 Cassola MS, Moraes SL, Tumolo Filho M. Aglomeração de finos de óxido de ferro - resíduo industrial. In: Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de

- Resíduos Sólidos Industriais; 2000; São Paulo, Brasil. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente; 2000.
- 17 Takano C, Mourão MB, Castro JA. Aspectos fenomenológicos que afetam o processo de auto-redução de minérios de ferro. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 5º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro; De 02 a 06 de Outubro de 2017; São Paulo, Brasil. São Paulo: ABM; 2013. p. 112-124.
 - 18 Narita CY, Mourão MB, Takano C, Cardona LMV, Kurauchi MHN. Efeito de variáveis de fabricação em propriedades de aglomerados carvão fóssil-minério de ferro obtidos por briquetagem seguida de tratamento térmico. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 2º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro; De 15 a 18 de Setembro de 2014; Belo Horizonte, Brasil. São Paulo: ABM; 2014. p. 652-662.
 - 19 Narita CY. Estudo da obtenção de briquetes autorredutores de minério de ferro e carvão fóssil endurecidos por tratamento térmico [Dissertação]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2015.