

## AGLOMERAÇÃO

### 15.1 BRIQUETAGEM

**Eduardo Augusto de Carvalho**

Eng. Metalúrgico pela UFRJ, Mestre e Doutor em  
Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE-UFRJ  
Engenheiro da NUCLEP

**Valter Brinck**

Eng. Metalúrgico pela UFOP  
Consultor

**Antônio Rodrigues de Campos**

Eng. Metalúrgico pela UFOP, Mestre e Doutor em  
Engenharia Mineral pela EPUSP  
Pesquisador Titular do CETEM/MCTIC



## INTRODUÇÃO

---

A justificável preocupação ambiental, resultando em leis cada vez mais rígidas, além da necessidade econômica de aproveitar resíduos e partículas finas geradas na indústria ou durante o beneficiamento de minérios, fez com que a briquetagem se tornasse uma importante alternativa para a indústria mineral. Assim, finos de carvão mineral, carvão vegetal, finos de minerais, turfa, plásticos, lixo biológico, limalhas metálicas e outros, antes considerados como rejeitos industriais, por meio desse processo de aglomeração, passaram a ser aproveitados como fonte de energia ou como um novo produto dentro da própria indústria (GRANDIN, 1994; DEMIRBA, 1998 e 1999) para outras aplicações.

A primeira patente relacionada à briquetagem (Methods of Converting Fine Coal into Solid Lumps, USA Patent Office n. 5.739) foi concedida ao americano William Easby, em 1848. O estudo de Easby versa em cima da formação de aglomerados sólidos de tamanho e forma variados, a partir de frações finas de qualquer tipo de carvão mineral, por meio da pressão exercida sobre esse material. Materiais de pequeno ou quase nenhum valor agregado passaram a ser transformados em produto de elevado valor combustível para máquinas a vapor, forjas, culinária e outras aplicações, permitindo recuperar grande parte dos finos considerados como rejeito do processo de beneficiamento de carvão.

No final do século XIX, a crise econômica fez com que a concepção de Easby se transformasse em realidade. A primeira aplicação industrial do processo de briquetagem de finos de carvão mineral ocorreu nos Estados Unidos, com o aproveitamento das partículas finas (menores que 6,0 mm) geradas após a classificação por tamanho do carvão britado. Após a secagem, o material fino não aproveitado comercialmente era misturado com 6% de asfalto fundido e conduzido a uma máquina com rolos, sendo alimentado sobre pressão, gerando sólidos aglomerados. Após a secagem realizada em transportador de correias, os sólidos aglomerados, agora denominados de briquetes, eram encaminhados para comercialização.

Logo após a Segunda Guerra Mundial, antes da indústria desenvolver aquecedores domésticos movidos a óleo diesel e gasolina, mais de 6 milhões de toneladas anuais de briquetes de carvão mineral eram produzidas nos Estados Unidos e outros países europeus. Apesar da queda de consumo nos países mais frios, o carvão mineral continua sendo, até hoje, o principal material a ser briquetado. Uma outra forma de utilização ocorre na briquetagem parcial de carvões, durante a coqueificação, melhorando a qualidade do coque produzido (aumento da densidade) e possibilitando a utilização de carvões fracamente coqueificáveis.

Além do carvão mineral, outros exemplos clássicos do uso da briquetagem para aglomeração de partículas finas são: óxido de magnésio; poeiras finas de conversor LD, lama de aciaria (setor da produção do aço); carvão vegetal; barita; cromita; dolomita; entre outros.

## A BRIQUETAGEM NO BRASIL

---

No Brasil, uma das primeiras iniciativas de utilização industrial do processo de briquetagem ocorreu no início da década de 60 na Companhia Siderúrgica Belgo Mineira (CSBM), na usina de João Monlevade, MG, com a aglomeração de finos de carvão vegetal, utilizando prensa da empresa alemã Humboldt.

Em 1965, a Companhia Brasileira de Briquetes, situada em Mateus Lemes, MG, passou a aglomerar finos de carvão vegetal para uso doméstico e na siderurgia, em fornos *cubilot*. A empresa trabalhou também na fabricação de máquinas e instalações de briquetagem.

A partir de 1974, a Empresa Carvel, estabelecida em Contagem, MG, iniciou a fabricação de prensas para briquetagem, além de produzir briquetes de diversos materiais, como por exemplo o carbonato de sódio, usado na dessulfuração de gusa nas usinas siderúrgicas integradas.

Em 1994, a Companhia Siderúrgica de Tubarão - CST, (atual ArcelorMittal Tubarão) de modo a aproveitar os resíduos gerados na produção do aço, colocou em operação uma unidade experimental de briquetagem de lama de aciaria e outros resíduos, com capacidade instalada da ordem de 20.000 t/mês de briquetes.

Por meio de estudos recentes da EMBRAPA Agroenergia, observa-se uma busca pela compactação de outros produtos não minerais, como a biomassa de resíduos de madeira, arroz, milho, café, cana de açúcar e outros, em substituição da lenha tanto para aplicação em residências quanto em indústrias e estabelecimentos comerciais como olarias, padarias, pizzarias, indústrias químicas, têxteis e de cimento.

Segundo Dias et al. (2012), não há no Brasil uma estatística oficial sobre a produção e venda de briquetes e pelotas - outro tipo de aglomerado, havendo uma estimativa da existência de cerca de 80 empresas produtoras de briquetes, com uma produção aproximada de cerca de 960 mil toneladas por ano, computando aqui briquetes produzidos a partir de finos minerais e também de produtos não minerais.

## CONCEITOS

---

A briquetagem é um dos processos de aglomeração utilizados pela indústria mineral. Aglomeração é o termo geral empregado para designar operações aplicadas a materiais de granulometria fina para transformá-los em corpos, ou fragmentos coesos, por meio da ligação rígida e consolidação de suas partículas, entre si, por meio de mecanismos físicos e/ou químicos, conferindo-lhes tamanho e forma adequados ao uso.

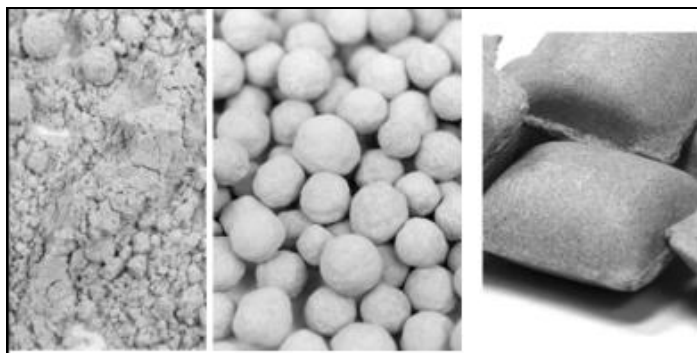
A aglomeração pode ocorrer de duas formas distintas. A primeira utilizando compressão mecânica para obter a forma de interesse e também a chamada sem pressão, onde é utilizado processo de tamboramento, onde o material vai sendo aglomerado em formas de pelotas esféricas.

O conceito de material fino na indústria mineral, depende muito do minério envolvido. No beneficiamento convencional de carvão, são consideradas finas, as partículas com tamanho inferior a 0,6 mm. Entretanto, no beneficiamento de minério de ferro, a fração fina, não aproveitada pelo processo de flotação, pode apresentar partículas menores do que 20  $\mu\text{m}$ . Dessa forma, não é simples generalizar o conceito de fração fina.

As aplicações mais frequentes dos processos de aglomeração são verificadas para o aproveitamento de:

- minérios ou concentrados de granulação fina, sem causar prejuízos à permeabilidade da carga e às condições de reação gás-sólido nos fornos metalúrgicos, especialmente nos fornos verticais;
- resíduos, ou subprodutos finos de outros processos mineiros e metalúrgicos, para sua reutilização, ou reciclagem, de forma adequada, interna e/ou externamente;
- resíduos metálicos (cobre, ferro, titânio, etc) e outros materiais (papel, algodão, madeira, e outros) para transporte e/ou reciclagem.

A sinterização, a briquetagem, e a pelletização (Figura 1) são os principais processos de aglomeração de finos usados pela indústria mínero-metalúrgica (TRAJANO, 1966). A pelletização de finos de minérios e/ou concentrados de ferro pelas mineradoras, a sinterização desses materiais nas usinas siderúrgicas integradas e a briquetagem de finos de carvão mineral são aplicações clássicas na indústria de base.



**Figura 1.** Sequência de imagens, mostrando finos aglomerados, nas formas de sinter, pelotas e briquetes.

Fonte: FEECO INTERNATIONAL, 2018

A escolha do processo ideal de aglomeração depende de uma análise cuidadosa e exaustiva, considerando parâmetros que definem as características físicas e químicas do material, o volume anual de material a ser processado, o investimento, os custos operacionais, entre outros.

A sinterização se baseia na fusão incipiente dos componentes de uma mistura constituída de um componente principal e de adições de fundentes, promovendo a ligação rígida das partículas, com a solidificação da fase líquida. A sinterização não pode ser utilizada em casos, onde há alteração da composição química do material quando aquecido.

Há, basicamente, dois tipos de instalações de sinterização: as do tipo panela (menor capacidade de produção), que operam em regime intermitente de carregamento, queima e descarregamento, e as de esteira contínua (Processo Dwight-Lloyd), com alta capacidade de produção, que operam continuamente o carregamento, a queima e o descarregamento. Este tipo de sinterização atinge taxas de produção compatíveis com os alto-fornos de grande capacidade.

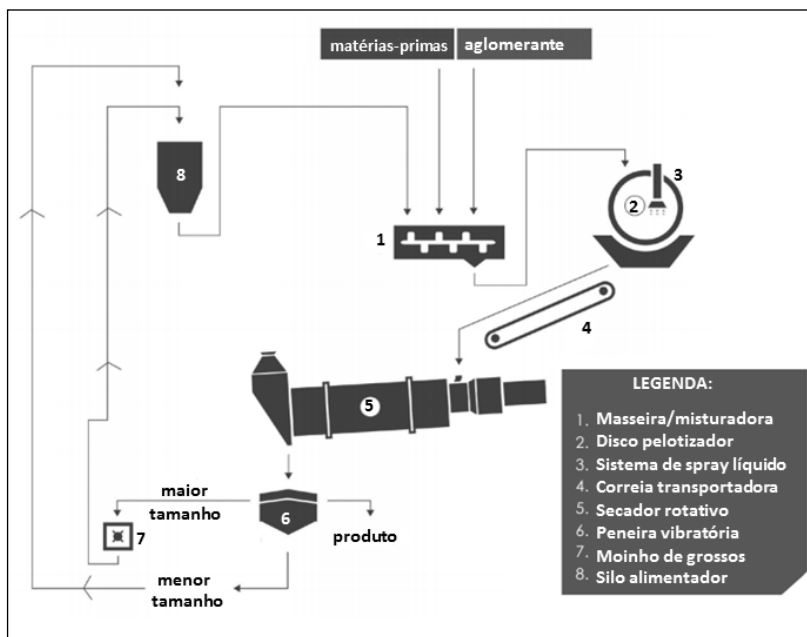
A utilização do processo de sinterização teve maior avanço tecnológico após 1930, quando começou a ser utilizada, em geral, na ustulação e aglomeração de minérios sulfetados e na simples aglomeração de concentrados oxidados de ferro (magnetitas) na Suécia (DIAS et al., 2012).

A sinterização é indicada para materiais com tamanho máximo de partículas entre 6,4 mm e 12 mm, e com uma pequena parcela de partículas com tamanho inferior a 0,30 mm.

O sinter (produto da sinterização) não suporta transporte a grandes distâncias. Devido a isso, as instalações de sinterização são normalmente localizadas próximas do local de utilização do sinter, ou mesmo nas próprias indústrias, como são os casos das indústrias siderúrgicas chamadas integradas.

A pelletização (Figura 2) é o processo mais recente de aglomeração, sendo resultante da necessidade de utilização de concentrados finos de magnetita, obtidos no processamento de certos minérios de ferro nos EUA<sup>(5)</sup>. O material fino a ser aglomerado deve ser moído até apresentar uma superfície específica elevada ( $2.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ), além de umidade constante.

Nesse processo, um ligante deve ser utilizado, geralmente bentonita, de modo que o produto aglomerado apresente maior resistência mecânica, logo após a sua formação. Quando a aplicação destinada não exigir resistência mecânica muito elevada, as pelotas passam apenas por um processo de secagem (pelota crua). Quando se faz necessária resistência mecânica mais elevada, para manuseio da pelota, é fundamental a presença de etapa de queima, de modo a tornar as ligações entre as partículas, mais fortes (pelota cozida).



**Figura 2.** Circuito típico de uma Usina de Pelotização.

Fonte: Adaptado de FEECO, 2018

Os principais equipamentos utilizados em uma usina de pelletização são o disco de pelletização e o tambor de pelletização, sendo um destes equipamentos o responsável pela transformação das partículas finas de minério em pelotas esféricas redondas com até 20 mm de diâmetro. No caso do disco (Figura 3), o tamanho das pelotas é influenciado pelo ângulo e velocidade do disco de pelletização e também pelo local de alimentação dos finos e dos líquidos.



**Figura 3.** Disco de Pelotização.

Fonte: TECNOMETAL, 2012

A briquetagem consiste na aglomeração de partículas finas normalmente por meio de pressão, com auxílio ou não de um ligante ou aglutinante, permitindo a obtenção de um produto não só compactado, porém com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados.

A redução de volume do material, em alguns casos, além dos benefícios tecnológicos, permite que materiais finos possam ser transportados e armazenados de forma mais econômica (DEMIRBA, 1998), além de provocar a redução da poluição, em caso da não utilização desses materiais finos.

## PROCESSO DE BRIQUETAGEM

---

No processo de aglomeração de partículas finas em prensas, as forças de atração molecular de Van der Waals apresentam forte influência na união das partículas. Entretanto, somente tornam-se efetivas quando a distância entre as partículas é reduzida pela ação de uma força externa elevada.

Os parâmetros mais importantes para a confecção de briquetes são a umidade da mistura e a escolha do ligante. A adição de água só não é realizada quando a substância aglomerante (o ligante) se apresenta na forma de solução aquosa ou como um fluido.

A fim de apresentarem a resistência mecânica desejada, os briquetes são submetidos a um tratamento de endurecimento, realizado à temperatura ambiente, em estufas e secadores (400°C) ou em fornos (acima de 1.000°C).

Os briquetes, em que o processo de endurecimento é realizado à temperatura ambiente, apresentam resistência mecânica mais baixa do que quando submetidos a um tratamento à temperatura elevada. O seu uso fica restrito aos processos onde se utiliza baixa pressão.



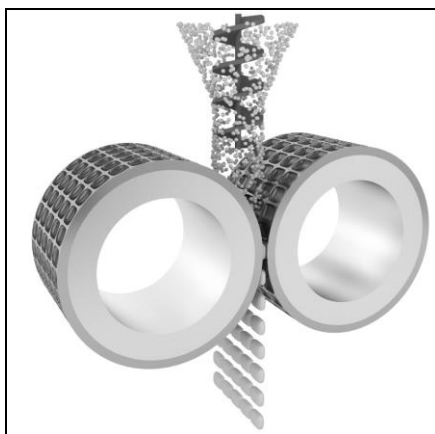
Nos briquetes endurecidos a temperaturas superiores à ambiente, as impurezas do minério e do próprio material de interesse são os responsáveis pela ligação entre as partículas. Essa ligação pode ser realizada por meio dos processos de:

- fusão incipiente do constituinte principal;
- difusão e recristalização do constituinte principal;
- escorificação ou reação química;
- endurecimento ou cristalização do constituinte principal.

Na aplicação da pressão externa ao material a ser briquetado, podem ser utilizados três processos:

- briquetagem em prensas de rolos (Figura 4), onde o material flui continuamente, entre dois rolos paralelos, com cavidades ou moldes dispostos em sua superfície, de tamanho e forma adequados, rigidamente ligados entre si, girando com a mesma velocidade de rotação, todavia em sentidos contrários;
- briquetagem por extrusão contínua em máquinas do tipo maromba;
- briquetagem em prensas hidráulicas, em que os moldes são preenchidos, de forma intermitente.

Briquetes pequenos apresentam baixo volume e são mais difíceis de fabricar com as características de interesse. Quanto menor o briquete, maior será o custo de fabricação. Por essa razão, o tamanho mínimo, do ponto de vista econômico para um briquete, apresenta espessura em torno de 6 mm (1/4") e comprimento de 12 mm (1/2").



**Figura 4.** Princípio da compressão em prensas de rolos.

Fonte: KOEPPER, 2017

A briquetagem em máquina de rolos, processo mais utilizado, pode ser dividida em quatro etapas: preparação; mistura; alimentação forçada, compressão e tratamento térmico.

### **Preparação**

Consiste na determinação das características de compactação do material a ser briquetado e do tipo de equipamento que deve ser utilizado, para facilitar a adesão das partículas finas.

A determinação das propriedades do material permite conhecer não só o valor máximo da pressão a ser aplicada, como também a taxa de compactação requerida pelo material. O conhecimento do coeficiente de atrito do material permite gerar uma previsão do comportamento do mesmo, no momento da saída dos rolos e, também, se a superfície dos briquetes úmidos poderá ser ou não danificada durante a queda (DRZYMALA e HRYNIEWICZ, 1997).

A quantidade de aglutinante ou de ligante necessária à produção de briquetes com boa resistência mecânica depende, entre outros fatores, da qualidade do material a ser briquetado, do tipo utilizado, da superfície específica do material e da quantidade de partículas finas ou grossas da mistura. Quanto menor for a quantidade de partículas finas, menor será a quantidade de aglutinante necessária para gerar um briquete de boa qualidade. No caso da briquetagem de carvão, a mistura não pode conter mais de 20% das partículas com tamanho menor do que 0,5 mm e não mais do que 5% de partículas com tamanho menor do que 90  $\mu\text{m}$ .

Outro fator importante é o teor de umidade do material antes da adição do aglutinante. A umidade ideal depende do material e do tipo de aglutinante utilizado, além de influenciar no valor da pressão a ser aplicada. Para estabilizar e otimizar a umidade nos briquetes é importante que sejam tomados cuidados especiais com o controle do processo. O ajuste da quantidade de água na mistura torna-se ainda mais importante quando se aglomera materiais termo-plásticos e também quando são utilizados aglutinantes solúveis em água. Para carvões minerais, o teor de umidade normalmente utilizado é de  $1,5\text{-}2\% \pm 0,5\%$ , sendo que quanto maior for a umidade, menor será o poder calorífico do briquete (DEMIRBA, 1999).

Na briquetagem de carvões não coqueificáveis ou semi-coque (materiais inertes), torna-se necessário o uso de carvões coqueificáveis na mistura. O carvão coqueificável, nesse processo, apresenta a função de aglutinante e necessita de um aquecimento a uma temperatura entre 100 e 350°C, antes de ser misturado. O carvão não coqueificável é aquecido em torno de 600°C, também, antes de sua mistura com o carvão coqueificável. A proporção de carvões na mistura deve ser ajustada, para que a temperatura da mistura situe-se na zona de amolecimento do carvão coqueificável, normalmente entre 420-540°C (SHINZEL, 1981).

## Mistura

A mistura dos componentes do material a ser briquetado é uma das etapas mais importantes da briquetagem. É de fundamental importância que o aglutinante seja distribuído uniformemente por toda superfície do material a ser briquetado.

O misturador deverá ser dimensionado de modo que o tempo de residência da mistura no equipamento não seja elevado. Quando há necessidade de tratamento térmico da mistura, esse pode ser realizado no próprio equipamento por meio da aplicação de vapores saturados ou superaquecidos. Como exemplo, para briquetagem de carvão utilizando piche como aglutinante, a temperatura de descarga da mistura deve estar pelo menos 7°C acima do ponto de amolecimento do piche. A mistura deve apresentar uma temperatura entre 85-90°C na prensa e uma umidade de 3% ± 1% (CASTELÕES e CORREIA, 1995).

Caso a mistura não seja suficientemente seca no condicionador entre o misturador e a prensa, os gases (na maioria das vezes, vapor d'água) presos nos briquetes sofrem uma forte compressão. Quando os briquetes deixarem a prensa e a pressão for relaxada, os gases expandem, causando fraturas no briquete.

No manuseio de materiais com pequena densidade aparente, torna-se necessária a remoção dos grandes volumes de ar antes da alimentação do material na unidade de compactação. Nesses casos torna-se recomendável a utilização de alimentadores por meio de vácuo, de modo a remover o ar presente no alimentador.

## Compactação

A compressão do material se dá na cavidade existente entre os dois rolos que, montados um diante do outro, giram com velocidade de rotação igual e em sentidos contrários.

A pressão exercida sobre o material cresce de forma progressiva ao longo do segmento do rolo, a partir do ponto em que se inicia a ação da força de compressão sobre o material, atingindo o seu valor máximo no ponto de menor distância entre os rolos, caindo de forma abrupta até a liberação e saída do aglomerado (briquete).

O tamanho e a forma das cavidades do rolo do equipamento e, conseqüentemente, do briquete, é função da susceptibilidade do material à compactação. Para materiais que apresentam dificuldade de compactação são utilizadas formas arqueadas, eliminando o plano de divisão dos briquetes e proporcionando uma distribuição mais uniforme da pressão.

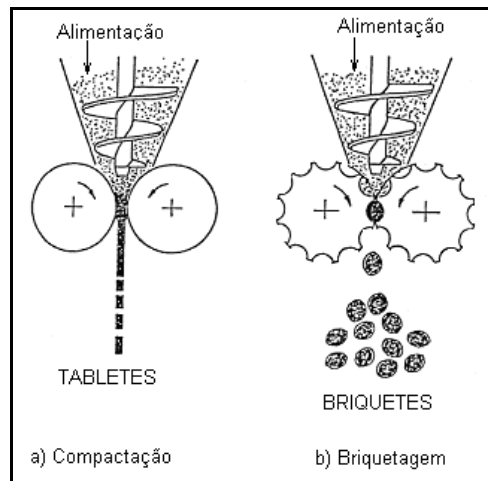
A uniformidade de pressão sobre o material permite que sejam aplicadas pressões mais elevadas sobre a mistura. Tal procedimento gera a redução da vida útil dos elementos de compactação da prensa.

Quando se deseja um produto aglomerado com um tamanho menor que 8 mm, realiza-se normalmente uma primeira compactação do material, seguida da fragmentação e posterior classificação granulométrica, recuperando a fração que apresente o tamanho desejado. A compactação inicial pode ser realizada por meio da briquetagem convencional ou na compressão de partículas na forma de barras ou de folhas, podendo essas serem do tipo lisas ou onduladas.

As tiras de material aglomerado são removidas horizontalmente da prensa. Dessa forma, o material pode alimentar diretamente etapas subsequentes como por exemplo os fornos utilizados para secagem ou cura do material aglomerado. Cimento Portland, ferro esponja, coque, metais e ligas, minérios sinterizados, partículas finas provenientes da fabricação do aço e de outros processos metalúrgicos e muitos outros produtos são processados em forma de tiras, observando-se um ganho na eficiência térmica do processo, devido à redução das perdas com partículas finas.

Se os rolos possuírem superfícies lisas, o material adquire uma forma tabular, ou de uma barra e é denominado tablete, fita, barra etc.

Quando as superfícies dos rolos possuem cavidades, ou moldes, de mesma forma e tamanho, a rotação dos rolos faz com que essas cavidades se situem em uma posição simétrica; o material aglomerado é denominado briquete e tem a forma e o tamanho dos moldes, como ilustrado na Figura 5.



**Figura 5.** Formas diferentes de aglomeração de partículas finas, com aplicação de pressão.

No processo de compactação (Figura 5a), a vazão de tabletas gerados,  $m$ , pode ser obtida pela seguinte relação:

$$m = B \times S \times V_p \times d_a \quad [1]$$

onde:

B largura do rolo;  $V_p$  velocidade periférica do rolo;  
S espessura do tablete;  $d_a$  densidade do aglomerado.

Já no processo de briquetagem (Figura 5b), a vazão de briquetes,  $M$ , é calculada em função do volume de um briquete ( $V_b$ ), do número de moldes em uma coluna ( $Z$ ) na circunferência do rolo, do número de colunas ao longo da largura do rolo ( $R$ ), da velocidade dos rolos ( $N$ , em rpm) e da densidade do briquete ( $d_b$ ).

$$M = V_b \times Z \times R \times N \times d_b \quad [2]$$

### Tratamento Térmico

Para evitar a fratura devida à choques térmicos e também permitir o manuseio, os briquetes ou tabletes devem ser imediatamente aquecidos após a sua formação e em seguida resfriados lentamente, segundo uma velocidade controlada.

Na aglomeração de finos de carvões coqueificáveis, os briquetes produzidos devem ser aquecidos até 600°C, a fim de recuperar todo o alcatrão ainda presente no processo. Após esse tratamento térmico, a quantidade de materiais voláteis é reduzida de tal forma, que permite a utilização dos briquetes como material redutor em altos fornos. A utilização de briquetes na câmara de coqueificação, além da maior otimização da densidade da carga, permite a obtenção de um coque de melhor qualidade.

### AGLUTINANTES

---

Os aglutinantes, também chamados de ligantes, são utilizados quando o material a ser aglomerado não possui resistência à compressão e ao impacto, após a compactação. Além de permitirem uma maior adesão das partículas finas, os aglutinantes podem aumentar ou diminuir as propriedades coqueificantes do material a ser briquetado.

Existem diversos tipos de aglutinantes (graxas, amidos, látex, plásticos, etc.), no entanto; a escolha depende principalmente do uso final do produto. Apesar do alcatrão ser considerado um dos melhores aglutinantes, o mesmo pode conter toxinas que podem ser transmitidas para o solo e para as plantas, não podendo ser utilizado quando pretende-se utilizar o briquete como insumo agrícola. O mesmo ocorre com o cimento, que pode proporcionar boas propriedades mecânicas ao briquete, mas quando utilizado como produto agrícola pode não quebrar, não gerando as propriedades desejadas.

Os aglutinantes podem ser divididos de acordo com sua função na mistura, podendo ser do tipo: matriz, filme ou aglutinantes químicos (Quadro 1).

**Quadro 1.** Exemplos de tipos diferentes de aglutinantes.

Tipo Matriz	Tipo Filme	Aglutinantes Químicos
Alcatrão	Água	Ca(OH) <sub>2</sub> + melação
Asfalto de petróleo	Silicato de sódio	Silicato de sódio + CO <sub>2</sub>
Cimento Portland	Lignosulfonatos	Epóxies

Os aglutinantes do tipo matriz provocam um embutimento das partículas dentro de uma fase substancialmente contínua, sendo as propriedades dos briquetes determinadas pelas características do aglutinante.

Os aglutinantes do tipo filme apresentam função parecida com as colas adesivas e dependem, principalmente, da evaporação da água ou de algum solvente para desenvolver uma maior resistência mecânica.

Os aglutinantes químicos podem ser utilizados tanto como matriz, ou como filme. Um bom exemplo são os aglutinantes químicos utilizados em areias de fundição.

Alguns autores costumam utilizar outra forma de classificação, dividindo os aglutinantes em líquidos, sólidos, solúveis e insolúveis em água. O Quadro 2 apresenta alguns exemplos de aglutinantes utilizados na briquetagem de partículas finas.

**Quadro 2.** Exemplos de aglutinantes utilizados na briquetagem de partículas finas.

Material	Aglutinante
Minério de ferro	Cal e melação
Cromita	Cal e melação
Fluorita	Cal, melação ou silicato de sódio
Bauxita	Cimento Portland
Carvão	Melação
Cobre	Lignosulfonatos
Magnesita	Lignosulfonatos
Areia de quartzo	Água e NaOH
Barita	Melação e <i>black-ash</i> *

\*cinzas constituídas de uma mistura de carbonato de sódio e sulfeto de cálcio, geradas durante a produção de barrilha, pelo processo de Leblanc

## BRIQUETAGEM SEM AGLUTINANTES

---

Os briquetes produzidos com aglutinantes são normalmente comprimidos em baixas pressões, de modo a evitar uma nova fragmentação das partículas. Quando é necessário produzir briquetes sem aglutinantes, o sucesso da operação depende de como ocorreu a cominuição ou a deformação plástica das partículas. Tal dependência deve-se à necessidade das partículas estarem situadas o mais próximo possível uma das outras, compensando assim a ausência de uma substância aglutinante. Muitos materiais orgânicos e inorgânicos podem ser briquetados sem a utilização de aglutinantes. As forças, que mantêm esses cristais unidos, não são necessariamente fortes, nem específicas, devendo apenas fazer com que os cristais individuais estejam suficientemente próximos uns dos outros.

As variáveis mais importantes na produção de briquetes sem aglutinantes são:

- umidade do material;
- capacidade de compressão das partículas;
- porosidade do briquete;
- tratamento térmico posterior à briquetagem.

No caso da aglomeração de finos de carvão, o uso ou não do aglutinante depende principalmente do tipo de carvão utilizado. Nos carvões betuminosos, a necessidade de aglutinantes é muito rara, enquanto que nos carvões semi-betuminosos, a utilização do aglutinante é bastante comum, podendo ser substituído por carvões de características coqueificantes (CASTELÕES e CORREIA, 1995).

Em estudo realizado no CETEM por Silva e Schinzel, para que o briquete de lignina (subproduto da fabricação do álcool com base em madeira seca, bagaço da cana e outras substâncias vegetais) apresentasse uma boa resistência mecânica, foi necessário o uso de pressão capaz de elevar a densidade aparente de  $0,366 \text{ g/cm}^3$  para  $0,95\text{-}1,1 \text{ g/cm}^3$ . No entanto, a maior densidade aparente ocasionou a redução da porosidade, prejudicando a reatividade da lignina.

Apesar da grande maioria dos processos de briquetagem sem aglutinantes utilizar baixas pressões para a compactação, na produção de briquetes de óxido de cálcio e hidróxido de magnésio torna-se necessária a utilização de pressões mais elevadas. É comum a utilização de lubrificantes (água, grafite e outros) para redução do atrito entre as partículas e também entre os briquetes e os rolos.

## BRIQUETAGEM A QUENTE

---

Utilizada quando o material a ser aglomerado possui elevada resistência mecânica. A elevação da temperatura da mistura tem como objetivo prático o alcance do regime plástico do material, o que permite o uso de pressões menores na compactação. Um exemplo prático ocorre na briquetagem de minério de ferro e dos pós gerados nos altos fornos, onde as partículas são aquecidas a uma temperatura da ordem de 1.000°C.

O limite máximo da temperatura a ser utilizada na briquetagem a quente é definido pela temperatura de fusão das partículas em conjunto.

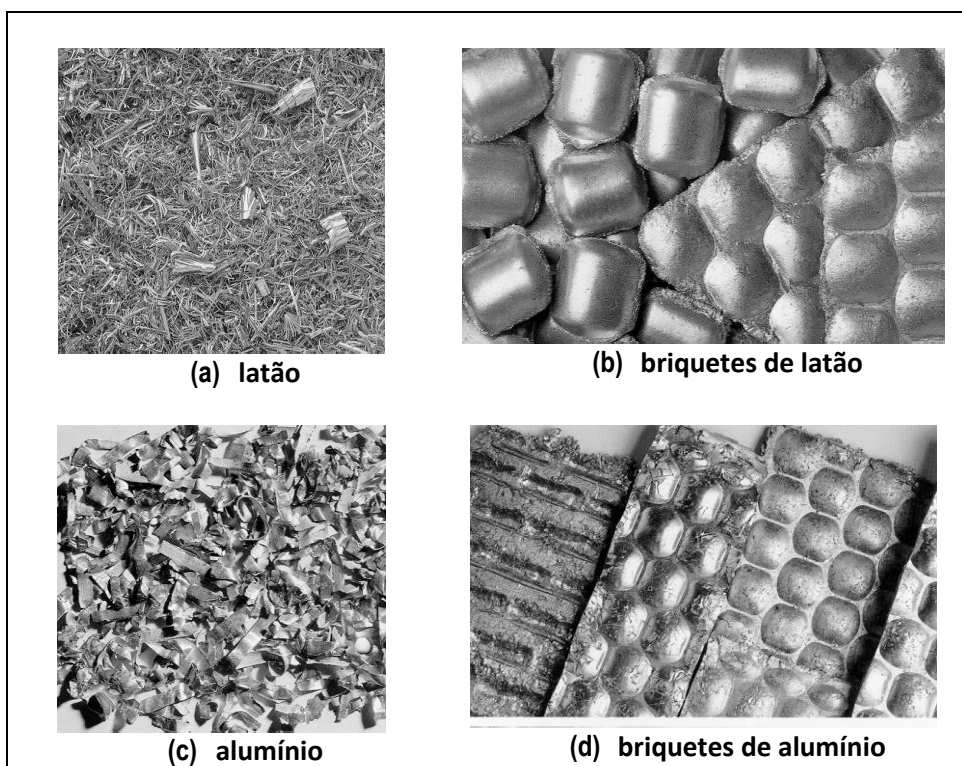
A briquetagem a quente, também, é fortemente influenciada pelo tratamento térmico utilizado logo após a compactação. Alguns materiais necessitam de resfriamento lento, em tambores, com materiais resfriados, de modo a recuperar parte de seu calor sensível. Esse processo é utilizado para permitir a recristalização do briquete, aliviando as tensões internas geradas durante a deformação plástica.

A produção de fibras de carbono ativado, com densidade aparente elevada, permite o uso do processo de briquetagem a quente, sem a necessidade do uso de qualquer tipo de aglutinante. O método consiste na compactação de fibras estabilizadas, utilizando pressão mecânica de até 204 kg/cm<sup>2</sup> e aquecimento entre 100 e 250°C para a fibra piche (piche isotrópico de petróleo) e 200-600°C para a fibra estabilizada. Sendo assim, é possível controlar facilmente a densidade aparente da fibra de carbono em uma faixa que vai de 0,2 a 0,86 g/cm<sup>3</sup>. A função da briquetagem a quente, nesse método, é iniciar a carbonização da fibra, aumentando a sua dureza o suficiente para que não haja mudança em sua forma. Quando a pressão mecânica é aliviada, a fibra formada apresenta densidade e dureza mais elevadas (MIURA, NAKAGAWA e OKAMOTO, 2000).

A briquetagem a quente torna possível reciclar, de maneira econômica, resíduos de metais (Figura 6) oriundos de tornos ou de máquinas de furar. Os resíduos metálicos são aquecidos a 725°C, antes de serem encaminhados para prensa do tipo rolo, onde são comprimidos a uma pressão de aproximadamente 3.000 kg/cm<sup>2</sup>. Após a compactação, os briquetes são imediatamente resfriados em água. Grande parte do combustível necessário para aquecer os resíduos metálicos é obtido no óleo presente nos próprios resíduos.

Uma das principais vantagens da briquetagem dos resíduos metálicos é a ausência de óleo no briquete do metal, evitando dessa forma a formação de fumaça durante a queima nos fornos.





**Figura 6.** Resíduos metálicos e os respectivos briquetes produzidos.

## ATIVIDADES DE PESQUISA & DESENVOLVIMENTO

---

Na pesquisa e desenvolvimento para obtenção de briquetes de qualidade é importante levar em consideração os seguintes fatores:

- *trabalhabilidade*, ou seja avaliar as características físicas e químicas do material aglomerado e também das condições técnicas necessárias para a briquetagem (a quente, a frio, sem aglutinante, com aglutinante, composição e umidade da mistura, forma e tamanho dos briquetes);
- *condições operacionais* necessárias para aglomeração do material, ou sejam, a pressão e a velocidade de trabalho, além do ajuste dos teores de umidade da mistura para obtenção de briquetes com a resistência mecânica necessária à aplicação desejada;
- *operações complementares* necessárias para melhorar a qualidade do briquete, tais como a secagem ou ajuste da temperatura dos finos antes de serem aglomerados, classificação por tamanho dos diferentes componentes da mistura, a pré-mistura, a pré-prensagem, cura a frio ou a quente do produto obtido, as suas condições de embalagem/estocagem, etc.

Essas informações são fundamentais para elaboração do projeto de instalação industrial e também para análise preliminar de viabilidade técnica e econômica do empreendimento, dentro dos níveis desejados de risco.

## AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS BRIQUETES

Para avaliação das propriedades físicas, os ensaios padronizados e os mais utilizados, consiste na avaliação da resistência dos briquetes à compressão, ao impacto, à abrasão e à penetração de água (THOMS, SNAPE e TAYLOR, 1999). Em alguns casos é feita a avaliação da temperatura de choque.

As propriedades que determinam a qualidade de um briquete são apresentadas no Quadro 3.

**Quadro 3.** Propriedades dos materiais, do processo e dos equipamentos responsáveis pela qualidade de um briquete.

Propriedades geométricas das partículas	Tamanho de partícula Distribuição granulométrica Forma da partícula	Estrutura Densidade
Propriedades mecânicas das partículas	Ângulo de repouso Ângulo de atrito interno	Tensão cisalhante Tensão axial
Propriedades químicas das partículas	Contaminação superficial Natureza da fase gasosa Fenômeno de superfície Coesão entre as partículas e adesão à superfície externa	Fenômeno eletrostático Energia superficial
Propriedades estruturais dos sólidos	Deslocamentos Estrutura cristalina	Geometria molecular Densidade
Propriedades mecânicas dos sólidos	Tensão cisalhante Tensão axial Resistência à compressão	Limite de escoamento Módulo de elasticidade Dureza
Propriedades químicas dos sólidos	Atrito Composição Impurezas	Tipo de ligação química Método de preparação
Condições de Processo:	Pressão Taxa de deformação Velocidade dos rolos Temperatura	Teor de umidade Aglutinantes Lubrificantes
Características do Equipamento:	Rolos	Diâmetro Tamanho e forma das cavidades dos briquetes Composição dos rolos
	Alimentador	Efeitos da pressão Pré-compressão dos materiais no alimentador
	Sistema Hidráulico	Rigidez dos rolos
	Mancais	Orientação dos rolos Localização
	Estrutura	Rigidez dos rolos

### **Resistência à Compressão**

Ensaio utilizado para determinar a resistência do briquete aos esforços compressivos, durante a sua estocagem.

No ensaio, o briquete é submetido à pressão contínua e progressiva até que o mesmo fracture. A resistência à compressão é um parâmetro bastante significativo na avaliação da resistência do briquete ao manuseio, empilhamento, condições de trabalho, entre outros. Uma resistência de  $3,57 \text{ kg/cm}^2$  é considerada como um valor ideal (THOMS, SNAPE e TAYLOR, 1999).

### **Resistência ao Impacto**

Ensaio que determina a resistência do briquete ao suportar repetidas quedas, simulando aquelas que ocorrem durante o manuseio e transporte.

Antes do tratamento térmico (cura), a resistência ao impacto dos briquetes pode ser determinada por meio de ensaios de queda livre, a partir de uma altura de 0,3 m. Nesse ensaio é utilizado como anteparo, uma placa de aço com espessura de 10 mm. Se o briquete for submetido a um tratamento térmico para aumentar sua resistência mecânica, a altura do ensaio de queda livre deverá passar para 1,5 m.

A resistência ao impacto é determinada pelo número de quedas consecutivas que o briquete consegue resistir sem fragmentar. Para briquetes sem cura, consideram-se 3 quedas como um número razoável, enquanto que para briquetes submetidos a um tratamento térmico, esse número passa para 10.

Castelões e Campos (1994) mencionam outra forma de avaliação da resistência ao impacto, utilizando metodologia diferente para o ensaio de queda. A resistência ao impacto passa a ser avaliada em função da quantidade de partículas do briquete com tamanho inferior a 3,3 mm, após 20 quedas consecutivas de uma altura de 2,3 m de altura. Em alguns casos é determinado o número de quedas que o briquete resiste. Uma perda em peso de até 5% é considerada um valor ótimo. Os resultados são considerados ruins quando as perdas são superiores a 10%.

### **Resistência à Ação da Água**

Consiste na avaliação do ganho de massa obtido pelo briquete, após a imersão em recipiente com água. É comum determinar a variação do peso, ao longo do tempo, sendo muito importante para os casos em que os briquetes são estocados em ambientes externos.

### **Temperatura de Choque**

A temperatura de choque é definida como a temperatura na qual 90% do briquete resiste, sem fragmentos, ao impacto de uma rápida elevação da temperatura.

Essa propriedade é de fundamental importância para avaliação da qualidade dos briquetes que serão utilizados como combustível em fornos.

### Resistência à Abrasão (Atrito)

Consiste na avaliação da degradação física sofrida por um briquete durante o seu transporte. Alguns pesquisadores avaliam a resistência à abrasão, quantificando a perda de peso de um briquete, devido à geração de partículas com tamanho inferior a 3,3 mm, após 15 min de peneiramento em peneirador vibratório do tipo *Ro-Tap* (Figura 7).

Os parâmetros de avaliação são semelhantes ao ensaio de resistência ao impacto, sendo que o briquete é considerado de excelente qualidade, quando menos de 5% das partículas do seu peso inicial apresentam tamanho inferior à malha teste após o ensaio. Outros ensaios, baseados nas normas do antigo *Bureau of Mines* (EUA), utilizam uma peneira de abertura de 4,7 mm e um tempo de peneiramento de 10 min, com peneirador vibratório, também, do tipo *ro-tap*. Os critérios de avaliação são semelhantes ao descrito anteriormente. Quando a perda em peso na malha teste é superior a 15%, o briquete é considerado de péssima qualidade (CASTELÕES, 1995).



**Figura 7.** Peneirador vibratório, do tipo *ro-tap*, utilizado nos ensaios de resistência à abrasão.

Castelões e Campos (1994) utilizaram outra forma de avaliar a resistência à abrasão de briquetes de barita, procurando trabalhar em condições próximas às utilizadas nos fornos rotativos das indústrias. Os pesquisadores colocaram os briquetes em um tambor rotativo, com velocidade de 30 rpm, durante um período de 2h, onde a peneira, com abertura de 4,8 mm, foi usada para avaliar a perda em peso.

### Densidade

Trata-se de um dos parâmetros mais importantes para avaliar a qualidade do briquete. Pode ser determinado pelo quociente entre o peso do briquete e o volume obtido a partir de suas dimensões. Uma outra forma de determinação do volume, consiste no método clássico de medir o volume deslocado pelo briquete, quando o mesmo é imerso em um líquido.

## EQUIPAMENTOS DE BRIQUETAGEM

O equipamento mais utilizado na briquetagem de materiais finos é a prensa de rolos. O equipamento é constituído, basicamente, de um sistema de alimentação, um par de rolos de prensagem, (montados sobre um chassi), um sistema hidráulico que possibilita o ajuste e o controle da pressão exercida pelos rolos sobre o material e um sistema motor-redutor, responsável pelo movimento de rotação dos rolos. As principais características do equipamento são:

- tamanho dos rolos (diâmetro e largura);
- forma, tamanho e número das cavidades ou moldes nos rolos;
- força de compressão específica máxima dos rolos ou seja a força máxima exercida por centímetro, ao longo da largura do rolo; e
- velocidade de rotação dos rolos.

Experimentalmente, a força mínima de compressão exercida pelos rolos, para um determinado material, é função das características do material, do diâmetro dos rolos, da forma e do tamanho do briquete. Para um diâmetro de rolo de 1.000 mm, a pressão de compressão pode variar de 10 a 140 kN/cm<sup>2</sup>. A Tabela 1 mostra a força necessária para compressão de alguns materiais em uma prensa com rolo de 1.000 mm.

**Tabela 1.** Força necessária para compressão de alguns materiais, utilizando uma prensa com diâmetro de rolo de 1.000 mm.

Material	Pressão de comp. Específica (kN/cm <sup>2</sup> )
Carvão mineral	10 a 30
Material cerâmico	40
Sal gema	60 a 80
Fertilizantes ( com uréia)	40 a 60
Adubo (s/ fosfato e escória Thomas)	50 a 80
Adubo (c/ fosfato e escória Thomas)	≥ 80
Cal nitrogenada	60
Cloreto de potássio (120°C)	50
Cloreto de potássio (20°C)	70
Sulfato de potássio (70 –100°C)	70
Gipsita	95
MgO (fria e aquecida)	110 a 130
Cal virgem	130
Ferro esponja	130 a 140
Minérios (aquecidos, sem aglutinante)	120 a 140

A velocidade periférica  $V_p$  de um rolo é definida pelo seu diâmetro e sua velocidade de rotação. Assim, para um rolo com diâmetro  $R$  em m e velocidade de rotação  $N$  em rpm, a velocidade periférica será:

$$V_p = \pi RN/30 \text{ m/s} \quad [3]$$

Essa velocidade determina o tempo de residência do material sob a ação da força de compressão dos rolos. Quanto mais fino for o material, maior será a quantidade de volume de vazios a serem eliminados, provocando maior redução de volume durante a compactação. A redução de volume (Equação 4) faz com que a densidade aparente dos finos cresça assintoticamente e se aproxime da densidade real do material.

$$\frac{V_a}{V_p} = \frac{d_p}{d_a} \approx 1 \text{ a } 3 \quad [4]$$

onde:

$V_a$  volume alimentado                       $d_a$  densidade da alimentação;  
 $V_p$  volume do produto                       $d_p$  densidade do produto

A redução de volume do material ocorre devido à eliminação dos vazios existentes no mesmo. A remoção dos gases existentes no interior do material depende de suas características físicas e químicas. Em alguns casos, esse pode ser o fator limitante da velocidade de rotação de uma prensa de rolos.

Na Tabela 2 encontram-se exemplos de valores limites de velocidade periférica para alguns materiais em função de parâmetros da máquina.

**Tabela 2.** Limites de velocidade periférica para alguns materiais.

Material	Velocidade periférica máxima (m/s)	Volume do briquete (cm <sup>3</sup> )	Diâmetro do rolo (mm)	Largura do rolo (mm)
Gipsita	0,35	5 a 10	750	600
KCl	0,70	-	1000	1250
Poeira de LD	0,25	20	650	220
MgO	0,40	5 a 7	650/750	320
Óxido Pb, Zn	0,27	100	750	265
ZrCl <sub>4</sub>	0,17	-	500	200
Finos de dolomita	0,17	6,5	650	250
Cal virgem	0,50	10	650/1000	250/540

### Tipos de Rolos

Nas primeiras prensas fabricadas, os eixos dos rolos eram dispostos sempre na horizontal, sendo os centros fixos na estrutura. A alimentação era realizada por gravidade, sendo a mesma colocada em simples caixa de alimentação ou em tremonha montadas acima dos rolos.

Nos equipamentos mais recentes, normalmente, um dos rolos se apresenta fixo na estrutura, enquanto o outro rolo se apresenta móvel, no entanto, com movimento limitado por cilindros hidráulicos. Anteparos localizados entre os blocos suspensos impedem que os rolos entrem em contato, permitindo a passagem do material que se deseja aglomerar.

Durante o processo de aglomeração, os cilindros hidráulicos resistem aos esforços até que a força exercida pelo material supere a dos cilindros. O rolo móvel é movimentado e, em seguida, desloca os pistões nos cilindros hidráulicos até que ambos os esforços voltem a ser iguais. O óleo deslocado pelos pistões é armazenado sobre pressão em um acumulador cheio de gás. Para que o rolo móvel retorne à posição inicial é necessário que o óleo deslocado retorne aos pistões. O sistema hidráulico funciona como uma balança. A força inicial que mantém os rolos juntos pode ser ajustada pela pressão de óleo dos cilindros. A força adicional necessária para deslocar o rolo móvel é também controlada pelo volume de gás no acumulador.

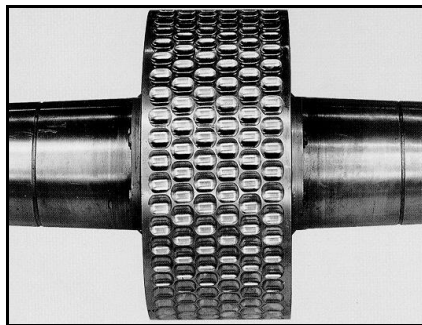
A maior eficiência dos novos equipamentos se deve, em grande parte, à capacidade do sistema hidráulico em administrar a inclinação da curva força-deslocamento do rolo, de acordo com as necessidades do processo de briquetagem.

Os rolos podem se apresentar dispostos horizontalmente, lado a lado na estrutura, ou também sobrepostos como um britador de rolo. Além disso, podem ser colocados, simetricamente, entre os pontos de apoio ou podem ser montados externamente aos pontos de apoio no final dos eixos. Cada forma de colocação dos rolos apresenta um fim específico. Outras formas de colocação podem ser estudadas de forma a atender as condições de um processo especial (CASTELÕES e CAMPOS, 1994).

Os rolos são classificados em integrais, sólidos ou segmentados. Todos apresentam cavidades que dão forma aos briquetes. Os rolos normalmente apresentam uma faixa de aço inoxidável, ou de algum material resistente à abrasão ou à corrosão, soldada à sua circunferência ou superfície de trabalho.

Quando os rolos integrais (Figura 8) não apresentam juntas ou superfícies unidas, esses são normalmente utilizados para briquetagem de produtos farmacêuticos ou alimentícios, já que não há aglomeração de materiais em regiões de difícil limpeza.

Os rolos integrais podem ser facilmente aquecidos ou resfriados com água, no entanto, não é recomendada a sua utilização na compactação de materiais abrasivos.



**Figura 8.** Rolos integrais com revestimento de uma liga especial.

Fonte: CASTELÕES, 1995

Grande parte dos equipamentos existentes utilizam rolos do tipo sólidos (Figura 9), que apresentam anéis substituíveis chavetados ou ajustados ao eixo. Ao contrário dos rolos integrais que precisam de materiais específicos para sua construção, os rolos sólidos e os seus eixos podem ser fabricados com diferentes tipos de materiais, apenas com a condição que sejam resistentes à corrosão e à abrasão.

Os rolos segmentados (Figura 10) são produzidos em uma série de seções ou segmentos, presos mecanicamente aos eixos. Os rolos segmentados são recomendados para briquetagem a quente ou de materiais abrasivos. Da mesma forma que os rolos sólidos, podem ser produzidos com o material que mais se adapte ao processo.



**Figura 9.** Rolos sólidos, que permitem a substituição das tiras que dão forma aos briquetes.



**Figura 10.** Rolos segmentados para aplicações de materiais altamente abrasivos.

Na construção mecânica dos rolos deve ser levado em consideração aspectos como confiabilidade, facilidade de manutenção e custos de operação. O efeito que os rolos exercem sobre o material a ser aglomerado depende, acima de tudo, da geometria do mesmo.



## Tipos de Alimentador

Quando se trabalha com materiais que necessitam de aglutinante, a alimentação da prensa deve ser realizada com um alimentador por gravidade. Nesse caso, o processo de briquetagem é um processo simples de moldagem, sendo observado uma pequena alteração na densidade do produto, após a passagem no equipamento. A pressão necessária para essa aplicação é normalmente mais baixa.

Os alimentadores do tipo rosca ou broca são utilizados quando os materiais se encontram secos ou com grande quantidade de partículas finas. São capazes de gerar efeitos secundários importantes no processo, podendo pré-comprimir o material antes dos rolos, além de possibilitar a fragmentação de partículas permitindo alcançar um tamanho mais favorável para aglomeração. Existe suposição de que a mobilidade das partículas, em um alimentador do tipo rosca, permite que os eixos dos cristais se alinhem sozinhos, gerando briquetes com melhores propriedades. Esse tipo de alimentador permite a obtenção de produtos de melhor qualidade, indiferentemente do uso ou não de aglutinante.

## BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

---

CASTELÕES, R. C. M.; CAMPOS, A. R. Briquetagem de finos de barita da Bahia – CETEM, CT 02/75, nov., 1994.

CASTELÕES, R.C.M. Estudos de briquetagem em escala piloto de finos produzidos na Cia. Metalúrgica Barbará. CETEM, Relatório Técnico, RT 20/95, set., 1995.

CASTELÕES, R.C.M.; CORREIA, J.C.G. Briquetagem de finos de carvão mineral da mina de São Roque da Carbonífera Criciúma-SC. XVI Encontro nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, Rio de Janeiro, set., 1995, v.1, p. 80-87.

DEMIRBA, A. Briquetting waste paper and wheat straw mixtures. *Fuel Processing Technology*, Elsevier Science B.V., v. 55, n. 2, may, 1998, p. 175-183.

DEMIRBA, A. Physical properties of briquettes from waste paper and wheat straw mixtures. *Energy Conversion and Management*, v. 40, mar., 1999, p. 437-445.

DIAS et al. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. *Embrapa Agroenergia*, 2012, p.103

DRZYMALA, Z.; HRYNIEWICZ, M. Problem of selection of roll presses for biquetting fine-grained raw minerals, XX IMPC, Aachen, sept., 1997, p. 397-404.

FEECO INTERNATIONAL – The Agglomeration Handbook, Green Bay, USA. 2018.

GRANDIN, F.H. Compacting and Briquetting in environmental technology applications. Powder Handling & Processing, v. 6, n. 1, jan/march, 1994.

MIURA, K.; NAKAGAWA, H.; OKAMOTO, H. Production of high density activated carbon fiber by a hot briquetting method. Carbon, Elsevier Science Ltd., v. 38, 2000, p. 119-125.

SCHINZEL, W. The briquetting of coal. General information regarding. The possibilities and requirements. CETEM. Relatório Informativo. RI 61/81, may, 1981.

TECNOMETAL – Home-page: <http://www.tecnometal.com.br>, 2012.

THOMS, L.J.; SNAPE, C.E.; TAYLOR, D. Physical characteristics of cold cured anthracite/coke breeze briquettes prepared from a coal tar acid resin. Fuel, v. 78, nov., p. 1691-1695, 1999.

TRAJANO, R.B. Princípios de Tratamento de Minérios – PUC, Rio de Janeiro, cap. 8, 1966, p. 158-169.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

---

HOSOKAWA BEPEX – MS Séries Roll Compactors, Machine Specifically Designed for Demanding Applications – (Prospectos).

K.R. KOMAREK INC. Home - Page: [www.komarek.com](http://www.komarek.com).

KOPPERN GROUP. Briquetting with Roller Presses. Disponível em: <http://www.koeppern-international.com>. Published 07/2017.

LEITE, F.A.D. Briquetagem de fluorita. CETEM, Relatório de Projeto, RP 33/83, jun., 1983.