

MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ENERGIA
METALURGIA E MATERIAIS - PPGEEMM

ESTUDOS DE PELOTIZAÇÃO E BRIQUETAGEM
DE FINOS DE CARVÃO MINERAL.

por

ALEXIS BIONEL TEJEDOR DE LEÓN
Engenheiro de Minas

*Trabalho realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral
do Departamento de Engenharia de Minas da UFRGS, dentro
do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia,
Metalurgia e Materiais - PPGEEMM.*

Porto Alegre, Dezembro de 1985.

ESTUDOS DE PELOTIZAÇÃO E BRIQUETAGEM
DE FINOS DE CARVÃO MINERAL.

DISSERTAÇÃO.

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da
Energia, Metalurgia e Materiais - PPGEEMM, como parte dos
requisitos para obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa.

por

Alexis Bionel Tejedor De León
Engenheiro de Minas.

1 9 8 5

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovado em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

Prof. Dr. Jorge Rubio R.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jaime A. Solari Saavedra.

Departamento de Engenharia Metalurgica, UFRGS.

Prof. Dr. Jorge Rubio R.

Departamento de Engenharia de Minas, UFRGS.

Prof. Dr. Antonio Eduardo Clark Peres.

Departamento de Engenharia de Minas, UFMG.

Prof. Ivan Guerra Machado.

Coordenador do PPGEEMM.

AGRADECIMENTOS

Antes de mais nada gostaria de agradecer ao Instituto para la Formaci3n y Aprovechamiento de Recursos Humanos (Panam3), pelo aux3lio financeiro concedido.

Ao professor Jorge Rubio pela orienta33o indispens3vel na realiza33o deste trabalho.

3 a Companhia Riograndense de Minera33o pelas amostras cedidas.

Aos colegas Vera L3cia Marques e Carlos Arthur Leas pelo aux3lio nos ensaios de briquetagem.

Aos colegas C3tia Bueno e Paulo Neujahr pelo aux3lio nos ensaios de pelotiza33o.

3s funcion3rias da Biblioteca de Engenharia, da Se33o de Peri3dicos e da CIENTEC pelo aux3lio na pesquisa bibliogr3fica.

Ao Laborat3rio de Mec3nica dos Solos da Engenharia Civil e ao Laborat3rio de Pol3meros do Departamento de Materiais pelo empr3stimo das m3quinas de ensaios.

A todos os demais colegas, professores e funcion3rios do PPGCEMM, e, em especial, do Laborat3rio de Tecnologia Mineral, pelo companheirismo e conv3vio durante a realiza33o deste trabalho.

3 Vera, K3tia Salvado e Daniel, pelo esmero na datilografia, pela ajuda na corre33o do texto em portugu3s e pela execu33o dos desenhos, respectivamente.

Enfim, a todos que de uma forma ou outra contribuíram para a realiza33o e t3rmino deste trabalho, minha eterna gratid3o.

Com carinho a meus pais, minha
querida Lulu e a meu filho Alexis
Manuel.

Í N D I C E

ÍNDICE DAS TABELAS -----	i
ÍNDICE DAS FIGURAS -----	ii
RESUMO -----	v
ABSTRACT -----	vi
1 INTRODUÇÃO -----	vii
1.1 O carvão brasileiro -----	viii
1.2 Caracterização, beneficiamento e utilização de finos de carvão mineral -----	ix
1.3 Justificativas e objetivos -----	xvi
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	1
2.1 Aglomeração de particulados finos -----	2
2.1.1 Sinterização e nodulação -----	3
2.1.2 Extrusão -----	3
2.1.3 Briquetagem -----	4
2.1.4 Pelotização -----	4
2.2 Processos de aglomeração de finos de carvão mineral -----	9
2.2.1 Aglomeração de finos de carvão por extrusão -----	9
2.2.1.1 Definição e generalidades -----	9
2.2.1.2 Aspectos operacionais e aplicações da extrusão -----	11
2.2.2 Pelotização de finos de carvão -----	17
2.2.2.1 Definição e generalidades -----	17
2.2.2.2 Caracterização das pelotas de carvão -----	28
2.2.2.3 Aspectos operacionais e aplicações da pelotização --	36
2.2.3 Briquetagem de finos de carvão -----	42
2.2.3.1 Definição e generalidades -----	42
2.2.3.2 Tipos de briquetagem -----	44
2.2.3.2.1 Briquetagem sem ligante -----	44
2.2.3.2.2 Briquetagem com ligante -----	46
2.2.3.2.3 Briquetagem a quente -----	49
2.2.3.3 Caracterização dos briquetes de carvão -----	49

2.2.3.4 Aspectos operacionais e aplicações da briquetagem -	52
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL -----	59
3.1 Materiais -----	60
3.1.1 Fínos de carvão -----	60
3.1.2 Lígantes empregados -----	63
3.2 Metodologia utilizada -----	66
3.2.1 Estudos de pelotização -----	66
3.2.2 Estudos de briquetagem -----	69
3.2.3 Análise das qualidades dos aglomerados do carvão ----	72
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	76
4.1 Estudos de pelotização em disco -----	77
4.2 Estudos de pelotização por tamboreamento -----	80
4.3 Estudos de briquetagem -----	85
4.4 Estudos econômicos comparativos -----	89
4.4.1 Circuito de pelotização -----	89
4.4.2 Circuito de briquetagem -----	90
5 CONCLUSÕES -----	116
6 SUGESTÕES -----	119
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	121

INDICE DAS TABELAS

TABELA I	- Composição dos recursos/reservas energéticas brasileiras não renováveis -----	ix
TABELA II	- Consumo nacional de carvão energético segundo os tipos e setores de consumo -----	xiv
TABELA III	- Principais utilizações alternativas dos finos de carvão mineral em fase de estudo ----	xv
TABELA IV	- Processos de aglomeração de particulados finos, tipos, usos e generalidades -----	6
TABELA V	- Principais agentes ligantes utilizados na pelotização de finos de carvão -----	28
TABELA VI	- Principais processos de fabricação de coque moldado -----	56
TABELA VII	- Análise granulométrica dos finos do carvão CE 4700 -----	62
TABELA VIII	- Análise granulométrica dos finos do carvão CE 5900 -----	63
TABELA IX	- Pelotização de finos de carvão em disco utilizando amido de milho como ligante -----	77
TABELA X	- Influência do teor de umidade na pelotização de finos utilizando amido de milho como ligante (10% em peso) -----	79
TABELA XI	- Influência da temperatura de cura na resistência das pelotas -----	81
TABELA XII	- Influência do tipo e concentração de ligante na qualidade do aglomerado. Carvão CE 4700 -	88
TABELA XIII	- Planilha básica de custos -----	92

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	-	Localização das principais jazidas de carvão do Sul do Brasil (12) -----	xi
FIGURA 2	-	Extrusora de parafuso sem fim de laboratório utilizada na aglomeração de finos de carvão (51)	10
FIGURA 3	-	Segmento do capilar formado pelo contato entre duas esferas no ponto 0 (51) -----	13
FIGURA 4	-	Variação da pressão capilar em função do teor de umidade e da distribuição granulométrica das partículas (51)	14
FIGURA 5	-	Disco pelotizador -----	18
FIGURA 6	-	Tambor pelotizador -----	19
FIGURA 7	-	Cone pelotizador -----	19
FIGURA 8	-	Estrutura de um aglomerado poroso, com referência à distribuição relativa das fases ar-água-sólido (59) -----	21
FIGURA 9	-	Mecanismos de crescimento do aglomerado na pelotização de particulados finos (25) -----	22
FIGURA 10	-	Esfera comprimida entre placas e fratura sendo iniciada por tensões de tração no centro (72) --	32
FIGURA 11	-	Sistema melhorado para verificar a resistência mecânica em pelotas; composto de três esfera inseridas em cada placa (72)	34
FIGURA 12	-	Representação esquemática de tensão vs deformação para pelotas fortes, médias e fracas, utilizando cilindro e pistão (72) --	34
FIGURA 13	-	Representação esquemática dos fluxos percorridos pela pelota, desde sua formação até a saída do equipamento (66) -----	37
FIGURA 14	-	Representação esquemática da formação do briquete em briquetadores de duplos rolos (30) -----	43
FIGURA 15	-	Formas mais comuns de briquetes de finos de carvão (78) -----	53

FIGURA 16 -	Planta de beneficiamento de carvão da Mina de Leão I (15) -----	61
FIGURA 17 -	Distribuição granulométrica tipo Rosin-Rammler das amostras de finos de carvão de Leão -----	64
FIGURA 18 -	Representação esquemática do disco utilizado nos ensaios de pelotização -----	67
FIGURA 19 -	Representação esquemática do tambor utilizado nos ensaios de pelotização -----	68
FIGURA 20 -	Representação esquemática da prensa hidráulica manual utilizada no ensaios de briquetagem -----	70
FIGURA 21 -	Sistema matriz-punção, utilizados nos ensaios de briquetagem -----	71
FIGURA 22 -	Influência da concentração de amido na alimentação na quantidade de massa pelotizada -----	95
FIGURA 23 -	Influência da concentração de MOGUL na alimentação na quantidade de massa pelotizada -----	96
FIGURA 24 -	Crescimento cinético das pelotas de carvão em função do número de rotações do tambor -----	97
FIGURA 25 -	Influência da concentração de ligante no índice de resistência à compressão das pelotas --	98
FIGURA 26 -	Influência da concentração de ligante e da temperatura de cura das pelotas verdes no índice de resistência à compressão. Finos de carvão CE 5900 -----	99
FIGURA 27 -	Influência da concentração de ligante e da temperatura de cura das pelotas verdes no índice de resistência à compressão. Finos de carvão CE 4700 -----	100
FIGURA 28 -	Influência da concentração de amido no índice de resistência à abrasão das pelotas -----	101
FIGURA 29 -	Influência da concentração de MOGUL no índice de resistência à abrasão das pelotas -----	102
FIGURA 30 -	Influência da concentração e tipo de agente ligante no diâmetro médio das pelotas obtidas para os dois tipos de carvões -----	103
FIGURA 31 -	Influência do tempo de compactação da carga no índice de resistência à compressão dos briquetes -----	104

FIGURA 32 -	Influência da pressão de compactação aplicada na carga, no índice de resistência à compressão dos briquetes -----	105
FIGURA 33 -	Influência da variação da carga de alimentação no índice de resistência à compressão dos briquetes obtidos -----	106
FIGURA 34 -	Influência da concentração e tipo de agente ligante na resistência à compressão dos briquetes do carvão CE 4700 -----	107
FIGURA 35 -	Influência da concentração e tipo de agente ligante na resistência à compressão dos briquetes do carvão CE 5900 -----	108
FIGURA 36 -	Influência do teor de umidade na alimentação no índice de resistência à compressão dos briquetes obtidos com gel de amido (9% em peso) -	109
FIGURA 37 -	Influência do teor de umidade dos finos na resistência à compressão dos briquetes do carvão CE 4700 -----	110
FIGURA 38 -	Influência do teor de umidade dos finos na resistência à compressão dos briquetes do carvão CE 5900 -----	111
FIGURA 39 -	Influência da concentração e tipo de agente ligante na resistência à tração dos briquetes do carvão CE 4700 -----	112
FIGURA 40 -	Influência da concentração e tipo de agente ligante na resistência à tração dos briquetes do carvão CE 5900 -----	113
FIGURA 41 -	Fluxograma conceitual de um circuito de pelotização de finos de carvão mineral -----	114
FIGURA 42 -	Fluxograma conceitual de um circuito de briquetagem de finos de carvão mineral -----	115

R E S U M O

O aumento da produção de carvão previsto para os próximos a nos nas minas da CRM localizadas em Leão, Butiá, RS, originará uma considerável quantidade de finos beneficiados por ciclonagem autôgena. Estes finos caracterizam-se pelos seus altos teores de umidade e granulometria $< 1 \text{ mm}$ o que onera e dificulta os processos de manuseio, estocagem e transporte. O presente estudo visa à análise comparativa dos processos de aglomeração, a briquetagem e a pelotização com o objetivo de obter um produto com melhores características de comercialização do que o atual.

As principais variáveis estudadas na aglomeração por briquetagem foram: teor de umidade, tipo e concentração de agente ligante, relação massa/volume de carvão, tempo e pressão de moldagem. Os melhores resultados em termos de resistência à compressão, foram obtidos utilizando um resíduo de refinaria de petróleo - REVAC - como ligante numa concentração de 10% em peso, uma temperatura de cura de 120°C , um tempo de moldagem de 0,5 minutos e uma pressão de compactação entre 150 e 250 kgf/cm^2 . A pelotização foi estudada utilizando um tambor e um disco de laboratório e as principais variáveis estudadas foram: umidade da alimentação, tipo e concentração de agente ligante, temperatura de cura e outras. Os melhores resultados foram obtidos utilizando como ligante MOGUL (amido de milho pré-gelatinizado em pó) numa concentração de 5% em peso, uma faixa de umidade ótima entre 30 e 40%, uma inclinação do disco entre 45 e 51° e uma temperatura de cura de 80 e 100°C .

Os resultados obtidos para ambos os carvões (CE 5900 e CE 4700) são discutidos em termos dos diversos fenômenos que ocorrem na interface carvão-solução-ligante e algumas considerações econômicas são apresentadas.

A B S T R A C T

The coal production expected for the following years at CRM mines, situated in Leão, Buitã, RS, will increase consistantly the amount of beneficiated fines by autogenous cycloning. These fines are characterized by their moisture content and a size distribution of 100% smaller than 1 mm, which poses severe handling, storage and transportation problems. This study characterises comparatively two agglomeration processes for the CRM fine coals, namely, briquetting and pelletization aiming at producing a more sealable product.

The main variables studied in agglomeration by briquetting were moisture content, type and concentration of binder, mass/volume ratio of fines coals and degree of compaction. The best results in terms of briquette strenght, were obtained by using a by-product of a petroleum refinery (REVAC) as a binder in a 10% of concentration by weight, a curing temperature of 120°C a compressing time of 30 sec. and applied pressure of 150 to 250 kgf/cm².

Pelletization was studied by using either a laboratory drum and/or a disc; the main variables were feed moisture, binder type and concentration and curing temperature. Best results were obtained by using MOGUL as a binder (corn starch pre-gelationous powder) in a concentration of 5% by weight, optimum range moisture of 30-40%, the disc at an angle ranging from 45-51° and curing temperature between 80 and 100°C.

The results obtained for both fines coals (CE 5900 and CE 4700) are discussed in terms of the phenomena occurring at the coal-solution-binder interface. The economic feasibility of these processes is also discussed.

1 INTRODUÇÃO

1.1 O carvão brasileiro

Ao tratar da importância do carvão mineral como recurso energético para o Brasil, torna-se necessário fazer um resumo sobre a evolução do carvão no âmbito nacional.

Consta que a descoberta do carvão mineral no país teria ocorrido no século passado, por volta de 1795, no Rio Grande do Sul, no trecho carbonífero hoje conhecido como Faxinal - Recreio, atualmente município de São Jerônimo(1)(2). Em Santa Catarina a descoberta do carvão, teria ocorrido por volta de 1822/23 na Bacia do Alto Rio Tubarão, onde foram abertas as primeiras minas do Estado. Estas minas foram impulsionadas pela construção da Estrada de Ferro Dona Teresa Cristina que ligava as minas ao Porto de Laguna(3)(4).

Os primeiros estudos referentes ao carvão paranaense datam de 1916, reativado pelo DNPM em 1934, na Bacia Carbonífera dos Rios das Cinzas, Peixe e Tibagi (5).

Quanto à sua origem, os carvões brasileiros, pertencem ao período permiano, constituindo-se de finos leitos de carvão e argilas intercalados, o que lhes conferiu altos teores de cinzas e os torna de difícil beneficiamento devido ao intenso grau de dispersão da matéria mineral na substância carbonosa (6)(7).

Em relação às reservas de carvão nacional, verifica-se que somente o Rio Grande do Sul encerra cerca de 91% das reservas globais brasileiras de carvão mineral. Atualmente, com tal volume

de reservas, o carvão mineral assume um lugar de destaque no contexto energético nacional, como se pode observar na Tabela I.

TABELA I COMPOSIÇÃO DOS RECURSOS/RESERVAS ENERGÉTICAS BRASILEIRAS NÃO RENOVÁVEIS.

ESPECIFICAÇÃO	EQUIVALENTES ENERGÉTICOS 10^3TEP_S	PERCENTUAL (%)
Petróleo	199.660	2,8
Gás natural	54.861	0,8
Óleo de xisto	565.000	7,9
Carvão mineral	4.270.000	59,4
Energia nuclear	1.855.000	25,8
Turfa	240.000	3,3
Total	7.184.521	100,0

TEP = Toneladas Equivalentes de Petróleo.

Fonte: Sumário Mineral 1983, V.3, 1983, MME:DNPM.

Como se observa, as reservas de carvão mineral representam, em termos relativos, cerca de 60% do total de recursos e reservas energéticas brasileiras não renováveis. Por outro lado, em termos absolutos, uma reserva da ordem de 4,2 bilhões de TEP_S , teoricamente, seria suficiente para substituir, por cerca de 30 anos, toda a energia primária consumida atualmente no país(6).

1.2 Caracterização, beneficiamento e utilização de finos de carvão mineral

A indústria de carvão mineral nacional no Rio Grande do Sul tem atividades nas áreas de Candiota, Leão, Butiã e Charqueadas, onde operam duas empresas: uma particular, Companhia de Pesquisas de Lavras Minerais - COPELMI e outra de economia mista, pertencente ao Estado do Rio Grande do Sul, Companhia Riograndense de Mineração - CRM (8)(9)(10).

Em Santa Catarina as atividades carboníferas se concentram no sul do Estado, onde operam sete grupos particulares denominados: Criciúma, Barro Branco, Companhia Brasileira Carbonífera de Araranguá, Companhia Carbonífera de Urussanga, Boa Vista, Catarinense, Treviso, Palermo e Metropolitana-União e uma empresa de economia mista, Próspera-Barão do Rio Branco(8)(11).

No Estado do Paraná, as atividades se concentram na região do Rio Peixe, onde operam a Companhia Carbonífera do Cambuí e a Klabin do Paraná Mineração S/A(5).

Na Figura 1 observa-se a localização das principais jazidas e Minas de Carvão do Brasil Meridional.

Os carvões brasileiros, segundo o seu "rank", são classificados como sendo sub-betuminosos e alto voláteis, para os carvões sulriograndenses e catarinenses respectivamente. Em relação às características químicas, o carvão nacional apresenta uma redução do teor de enxofre e um acréscimo no conteúdo de matéria inorgânica, do Norte para o Sul do país. Deste modo, no Estado do Paraná, o teor médio de enxofre é de 10% e a matéria inorgânica de aproximadamente 36%. Já o carvão catarinense apresenta um teor médio de enxofre de 3% e 40% de matéria inorgânica; finalmente, o carvão riograndense apresenta um teor médio de enxofre de 0,5% e um teor de matéria inorgânica de 52%(7)(13).

Devido a esta associação com o enxofre ou com matérias inorgânicas de maneira geral, o carvão brasileiro necessita ser beneficiado. No Paraná, o beneficiamento do carvão objetiva a obtenção de um concentrado com baixo teor de pirita, tendo em vista a ação corrosiva e poluente deste mineral. Para tanto, o tipo de beneficiamento caracteriza-se como um tratamento de grãos pela lavagem da fração maior que 1 mm em jigues, sendo a fração restante separada antes da lavagem em peneiras e, como tal, normalmente rejeitada.

Em Santa Catarina, o carvão minerado recebe uma lavagem pré

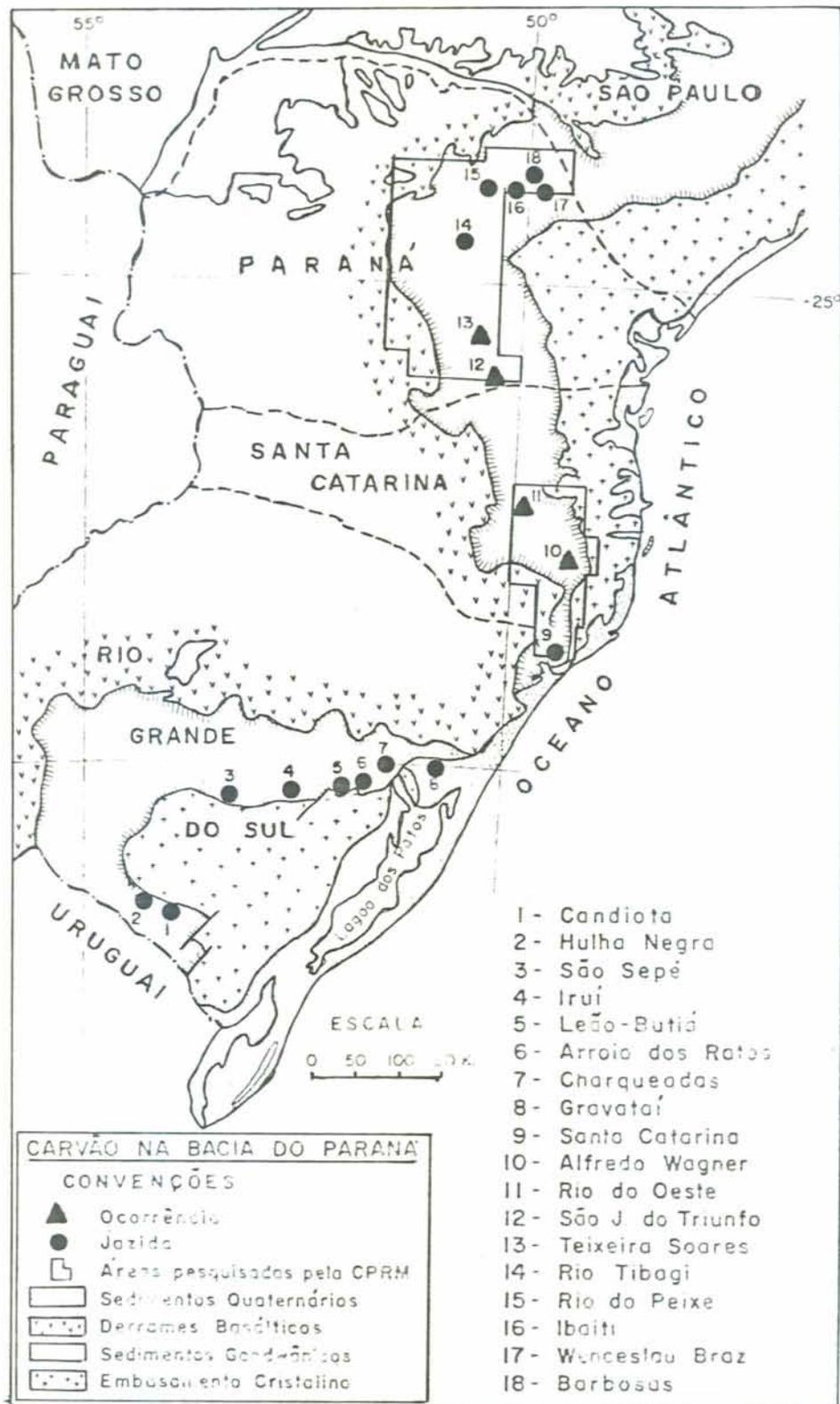


Figura 1 Localização das principais jazidas de carvão do Sul do Brasil (12).

via em jigue junto ao local de extração até um valor aproximado de 30% de cinzas. Beneficiam-se todas as frações granulométricas, inclusive as de granulometria menor que 0,6 mm em células de flotação, ciclones, mesas concentradoras ou combinações destes; e atualmente está sendo testada a utilização de espirais Humphreys(14). O carvão assim pré-lavado é enviado ao Lavador de Capivari onde é re-beneficiado em ciclones de meio denso e obtidas duas frações: metalúrgica (18% de cinzas) e vapor (45%)(13).

No Rio Grande do Sul, o carvão extraído em Candiota não recebe nenhum beneficiamento, apenas uma cominuição, sendo utilizado diretamente na termoelétrica Presidente Médici próxima à mina. Em Recreio e Faxinal, o carvão é beneficiado em jigue tipo Baum até frações de 1 mm. A Mina de Leão I beneficia toda a fração maior que 1 mm em jigue tipo Baum e a fração menor que 1 mm sofre um beneficiamento, em ciclones lavadores(15)(16)(17).

De um modo geral, o beneficiamento das frações graúdas não apresenta problemas técnicos sérios, a não ser a baixa eficiência em função do tipo de carvão nacional, que possui como característica negativa principal o alto teor de cinzas e enxofre, disseminados na matriz orgânica, o que origina uma difícil lavabilidade(13).

Utilização:

A maior e mais nobre utilização dos finos de carvão mineral pelos mercados emergentes está diretamente relacionada com a qualidade do produto, que deve possuir características tais como: baixos teores de umidade, cinzas, enxofre e granulometria adequada. Estas propriedades, no caso do Brasil, serão obtidas após otimização de todos os processos envolvidos no beneficiamento, separação sólido/líquido, e aglomeração dos finos existentes.

A indústria carbonífera, antes excessivamente dependente dos mercados siderúrgicos e termoelétricos, encontra hoje nos mercados industriais emergentes uma aplicação que lhe abre possibili-

dades quanto a novas formas de utilização dos finos de carvão mineral. A Tabela II mostra os tipos de carvão existentes e sua absorção pelo mercado brasileiro.

Ainda, dentro dos planos de utilização de finos de carvão nacional, existem no setor as seguintes alternativas que podem ser citadas(9)(18):

1. - Utilização a curto prazo:

- Substituição do óleo combustível na indústria cimenteira e processos industriais que consomem calor(19).

- Gaseificação do carvão para produção de gás de baixo poder calorífico. Ex. Companhia Riograndense de Nitrogenados.

2. - Utilização a médio prazo:

- Gaseificação do carvão para produção de gás de médio poder calorífico; como redutor na siderurgia; na produção de metanol e como substituto de óleo combustível e obtenção de produtos síntese como amônia e uréia; utilização de misturas combustíveis: água-carvão, óleo-carvão, etc.

3. - Utilização a longo prazo:

- Hidrogenação para produção de combustíveis líquidos e sintéticos: gasolina de alta octanagem e óleo diesel.

- Metanização de gás de carvão.

Os finos de carvão produzidos em Santa Catarina, (coqueificáveis), são utilizados na sua granulometria original; já os produzidos no Rio Grande do Sul são geralmente absorvidos pelo mercado através de misturas com o material mais graúdo. Entretanto, hoje existem outras alternativas emergentes de interesse que deverão ser consideradas referentes à utilização de finos de carvão.

TABELA II CONSUMO NACIONAL DE CARVÃO ENERGÉTICO SEGUNDO OS TIPOS E SETORES DE CONSUMO - ANO 1983.

UNIDADE: t

SETORES DE CONSUMO	TIPOS DE CARVÃO									TOTAL
	CE 6.000	CE 5.900	CE 5.200	CE 4.700	CE 4.500	CE 4.200	CE 3.700	CE 3.300	CE 3.100	
ENERGIA ELÉTRICA	35.322	-	-	-	807.051	48.536	-	689.190	363.631	1.943.730
CIMENTO	8.272	907	1.741.123	317.490	-	-	-	17.916	-	2.086.158
SIDERURGIA	-	-	11.636	83.416	26.818	174	-	-	-	122.044
PAPEL E CELULOSE	143.746	-	24.327	656	3.350	123.041	-	-	-	295.120
TÊXTIL	93	-	4.831	-	20.548	-	-	-	-	25.472
CERÂMICA	1	-	12.503	4.881	9.891	47	-	-	42	27.365
ALIMENTOS	6.744	-	118.438	99.058	46.352	69.554	-	1.081	4.865	364.092
FUMO	-	-	489	5.913	6.367	1.869	-	-	-	14.638
TRANSPORTE	-	-	49.651	-	-	-	-	-	-	49.651
QUÍMICA E GASEIF	-	-	137	2.096	244	2.232	-	-	-	4.709
PETROQUÍMICA	-	-	-	-	-	-	396.999	-	-	396.999
OUTROS	563	-	18.717	782	1.903	6.509	403	4.945	25.047	58.869
T O T A L	194.741	907	1.981.852	514.742	922.524	251.963	397.402	713.132	393.585	5.370.847

FONTE: MME - CNP. Anuário Estatístico Ano 1984.

A Tabela III resume algumas aplicações alternativas dos finos de carvão mineral em fase de pesquisa e experimental a nível industrial.

TABELA III PRINCIPAIS UTILIZAÇÕES ALTERNATIVAS DOS FINOS DE CARVÃO MINERAL EM FASE DE ESTUDO. (20)

CONVERSÃO/PROCESSO	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO
Combustão não convencional (queima direta)	<ul style="list-style-type: none"> - Finos 80% menores que 74 µm suspensos em água (65-35%). Teor de cinzas menor que 20%. - Fluidização de partículas entre 0 a 1 mm.
Injeção em altos fornos	<ul style="list-style-type: none"> - Finos naturais e concentrados de flotação. Teor de cinzas menor que 15%.
Elemento de carga na pelotização de minérios de ferro.	<ul style="list-style-type: none"> - CE 4500 (SC) moído e adicionado na concentração de 2%.
Carboquímica/liquefação, Hidropirólise rápida.	<ul style="list-style-type: none"> - Finos naturais ou aglomerados.
Remoção de metais solúveis presentes em efluentes	<ul style="list-style-type: none"> - Finos naturais ou aglomerados (0,15 - 1,2 mm) em misturas com CaCl₂ (aproximadamente 16%).
Drenagem ácida/Adsorção-absorção de ácidos	<ul style="list-style-type: none"> - Carvão mineral ativado (700 µm).
Coqueificação não convencional	<ul style="list-style-type: none"> - Finos de carvão não coqueificáveis, misturados (na proporção de 50-60%) com finos coqueificáveis.
Segregação de minérios sulfetados de cobre	<ul style="list-style-type: none"> - Finos naturais ou aglomerados em -35+80 malhas.

1.3 Justificativas e objetivos

Os modernos métodos de mineração empregados na extração mineral, associados aos processos de beneficiamento de todas as frações granulométricas, visam obter carvões com melhores qualidades; porém, dadas as características do carvão brasileiro, geram grandes quantidades de finos que dificultarão de diversas formas sua utilização imediata, isto fundamentalmente devido aos fatores econômicos envolvidos. A presença de finos, além de onerar o processo de seu beneficiamento, cria problemas relacionados com o seu manuseio, o seu transporte e sua estocagem(21)(22).

Assim, existe uma necessidade de resolver o problema de processamento dos finos beneficiados, para a obtenção de um produto com as características desejadas pelo mercado e seus processos tecnológicos relativos a sua utilização. Atualmente a maior parte dos finos produzidos nas plantas de beneficiamento são estocados sem dar-lhe uma utilização imediata.

Os problemas citados anteriormente constituem já uma realidade no Brasil com a mecanização das minas de carvão. E a tendência é aumentar cada vez mais a produção de finos, que se geram como decorrência do desmonte mecânico e das transferências sucessivas do material durante o transporte, desde as frentes de produção até a planta de beneficiamento onde também são geradas quantidades apreciáveis de finos de carvão. Por outro lado, dentro de uma conjuntura restritiva ao consumo de combustíveis derivados do petróleo, impõe-se que seja otimizado o transporte dos finos, secando-os previamente e acondicionando-os adequadamente, ou aglomerando-os sob a forma de briquetes ou pelotas.

Uma das possibilidades de obtenção de um produto manuseável de fácil transporte, e aproveitável nos processos descritos na Tabela III, seria através da aglomeração das partículas finas de carvão, em unidades maiores e mais resistentes ao trabalho mecânico (23). Dentro das principais alternativas de aglomeração de finos de carvão, destacam-se os processos de pelotização e bri-

quetagem (24)(25)(26)(27).

A escolha de um determinado processo será função das características tecnológicas e econômicas, nas quais influem inúmeras variáveis físicas e físico-químicas do produto e sua interação com a água e/ou ligante (28)(29).

Basicamente, os processos diferem quanto ao tipo de "energia" empregada na obtenção dos aglomerados (30)(31) e no caso específico do carvão, existem estudos teóricos e aplicações industriais em países onde a tecnologia do carvão é mais desenvolvida (25)(32)(33)(34).

Em função destes antecedentes o presente estudo visa a análise técnica e econômica dos processos de pelotização e briquetagem de finos de carvão tomando como modelo os finos beneficiados da CRM por possuir um teor baixo de matéria inorgânica, e, eventualmente, resolver os problemas de manuseio e transporte, fatores que atualmente limitam sua comercialização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aglomeração de particulados finos

O termo aglomeração ou aumento de tamanho é definido como sendo qualquer processo no qual os particulados finos são transformados em corpos maiores (35)(36), visando melhorar sua densidade ou propriedades particulares(37). São diversas as razões pelas quais os processos de aglomeração são utilizados hoje em dia, ENGELLEITNER (37), BROWNING (38) e LEAVER (39) descrevem como principais as seguintes:

- Redução das perdas de finos na forma de poeiras, maior controle na poluição ambiental e resolver os problemas relativos ao manuseio.

- Obtenção de um produto final com formato definido, com razão superfície/volume controlada, produção de unidades quantitativas definidas e possibilidade de aumento da densidade aparente dos sólidos.

- Melhorar as qualidades de fluidez e de solubilidade do produto obtido: indústria cerâmica, farmacêutica, de fertilizantes, etc.

Quanto à classificação dos processos de aglomeração, BROWNING (38) divide-os segundo os tipos de energia empregada: aglomeração por compactação, aglomeração por agitação e aglomeração térmica.

Uma segunda classificação, embora dentro da anterior, mais específica e mais comumente utilizada, descreve a aglomeração de

particulados finos por processos: sinterização e nodulação, extrusão, briquetagem e pelotização. De um modo geral, as principais características destes processos são:

2.1.1 Sinterização e nodulação

Estes processos de aglomeração caracterizam-se pelo emprego de altas temperaturas na obtenção dos aglomerados e, geralmente, operam em conjunto com outros processos de aglomeração. O produto obtido, chamado sinter, é formado, principalmente, pela fusão parcial de uns dos elementos da carga com adição ou não de agentes ligantes.

O sinter, que têm como principal característica sua superfície vidrosa, apresenta uma ampla variação na granulometria, auxiliada, fundamentalmente, pela distribuição do material nas esteiras ou grelhas de sinterização. Como a nodulação ocorre em fornos rotativos os aglomerados obtidos neste processo, apresentam um aspecto arredondado, como é o caso do clínquer de cimento(38).

Estes processos são utilizados principalmente para aglomerar particulados finos que possam ser tratados a altas temperaturas, tais como: minérios de ferro, níquel, "fly ash", argilas, etc.

2.1.2 Extrusão

A extrusão é definida como sendo um processo de aglomeração por modelação, caracterizado pela aplicação de uma pressão externa adequada para a obtenção dos aglomerados. Este processo têm sido utilizado desde o século passado na aglomeração de finos que apresentem boa plasticidade e fluidez, embora estas características possam ser obtidas pela adição de agentes ligantes apropriados (29)(39)(40).

O equipamento comumente utilizado é o parafuso extrusor, que transporta o material a ser aglomerado, empurrando-o e obrigando-o a passar através dos orifícios de um disco, os quais têm como

finalidade determinar a granulometria do aglomerado.

Sua principal aplicação industrial, atualmente, é na aglomeração de ração animal (35), na indústria cerâmica, farmacêutica e na indústria de fertilizantes(38).

2.1.3 Briquetagem

A briquetagem é um dos processos mais antigos de aglomeração (36) e caracteriza-se pela aplicação de pressões externas com conseqüente redução de volume do material fino, com adição ou não de agentes ligantes para obtenção dos aglomerados.

Existem vários tipos de briquetadores, porém, o mais utilizado é o briquetador de rolos. A granulometria e o formado do produto obtido, chamado briquete, dependem, fundamentalmente, do formato e granulometria das cavidades na superfície dos rolos compactadores (30).

A briquetagem é utilizada industrialmente, hoje em dia, na aglomeração de produtos farmacêuticos (38), produtos e sub-produtos industriais, fertilizantes, aglomeração de minérios, e na indústria do carvão vegetal (41).

2.1.4 Pelotização

A pelotização é um processo de aglomeração caracterizado pela formação de aglomerados esféricos, devido ao constante movimento circular do material dentro de aparelhos adequados, sem aplicação de forças externas ao processo na presença ou não de agentes ligantes (31).

Entre os aparelhos comumente utilizados figuram: o cone, o tambor e o disco pelotizador. A granulometria das pelotas é governada por variáveis inerentes ao processo e ao material a ser aglomerado (42).

A maior aplicação industrial da pelotização, atualmente, é na aglomeração de minérios de ferro (43)(44) e na indústria de fertilizantes (granulação) (38). Também estuda-se sua viabilidade e aplicação na aglomeração de finos de carvão mineral(45)(46).

A Tabela IV apresenta um resumo dos principais processos de aglomeração de particulados finos, suas limitações operacionais e utilização industrial. Uma caracterização mais detalhada desses processos de aglomeração, com particular referência à extrusão, pelotização e briquetagem de finos de carvão, é oferecida nos itens que seguem.

TABELA IV PROCESSOS DE AGLOMERAÇÃO DE PARTICULADOS FINOS,
TIPOS, USOS E GENERALIDADES (35)(37)(38)(47)(48)(49).

M E C A N I S M O		EQUIPAMENTO	GENERALIDADES	FORMA DO PRODUTO	APLICAÇÃO INDUSTRIAL
C O M P A C T A Ç Ã O	<u>Briquetagem:</u> Uso de duas matrizes para compactar o material.	Prensa de punção simples.	O material deve ter boas características de fluidez e propriedades coesivas; podem ser utilizados ligantes e lubrificantes externos.	Cilíndricos.	Indústria farmacêutica, química, cerâmica, metalurgia do pó, etc.
		Prensa de Modelagem.	Requer um excelente controle na qualidade e na quantidade da alimentação. Alto desgaste na matriz; sistema de compressão multidirecional.	Dependem da forma das cavidades da matriz.	Pré-formas plásticas, na obtenção de pequenas peças a partir de pós metálicos (camas, engrenagens, vedação, etc.)
		Compactador de Rolos	O material deve ser ligável sob pressão; necessidade no uso de ligantes; o produto é frágil após a compactação.	Dependem da forma das cavidades na superfície dos rolos.	Minerais argilosos, plásticos, metais, compostos orgânicos, minérios, carvão vegetal, pós metálicos, etc.
	<u>Extrusão:</u> Passagem do material através dos orifícios de uma matriz.	Extrusor de rolos internos. Parafuso extrusor.	Material deve apresentar boa fluidez e plasticidade; necessidade de agentes ligantes externos.	Produto tipo Spaghetti, con ^o torno depende da forma dos orifícios. Cortadores externos determinam o comprimento.	Indústria farmacêutica, plástica, argilas, fertilizantes, produtos químicos, produtos revestidos, etc.

Pelotização:	Tambor.	O material tende a se aderir nas paredes do tambor; maior quantidade de material recirculado; muita umidade afeta o tamanho e resistência dos aglomerados.	Agglomerados esféricos. Produto mais resistente é obtido com uma boa umidade na alimentação.	Minérios de ferro de baixo teor, minérios não ferrosos, produtos argilosos, fertilizantes, etc.
	Disco.	Não é adequado para processos que envolvem reações químicas.	Idem.	Idem.
	Cone.	Idem. A quantidade de material recirculado é média.	Idem.	Magnetita.
Granulação:	Tambor	Para usos gerais de granulação, pouco estudado para sais altamente solúveis.	Esferas de boa resistência.	Fosfato diamônio, fosfato nítrico, superfosfato granular, composto de fertilizantes, etc.
	Disco e "Pug Mill"	Para granulação de sais altamente solúveis, pouco adequado para amoniação.	Idem.	Nitrato de amônio, uréia, nitro-fosfato de amônio, superfosfato granular, etc.

AGITIAÇÃO	<u>Agrupamento:</u> Produto com pouca resistência, formados pela colisão e coesão em sistemas turbulentos.	Misturador Cônico.	Adequada para pós secos, dando uma estrutura esponjosa, capaz de se dissolver rapidamente, formando uma dispersão coloidal num solvente apropriado.	Formas irregulares e esféricas.	Café, produtos de dextrina, amidos, leite em pó, etc.
TÉRMICA	<u>Sinterização:</u> Produto formado pela fusão parcial do próprio material ou do ligante adicionado.	Leito móvel, Grelha horizontal.	O sinter é altamente abrasivo e adequado para materiais que possam ser aglomerados a altas temperaturas.	Formas irregulares e aglomerados de partículas.	Minério de ferro e não ferroso, níquel, "fly ash", etc.
AGLOMERAÇÃO	<u>Nodulação:</u> Formação de massa dura pela fusão parcial de partículas, individuais, pode ser acompanhada de reação química.	Forno Rotativo.	Produto altamente abrasivo.	Áspero, arredondado, formas irregulares.	Clínquer de cimento.

2.2 Processos de aglomeração de finos de carvão mineral

Como consequência direta da problemática energética nacional e mundial, caracterizada por diversas oscilações, estudos vêm sendo realizados em busca de fontes alternativas de energia e outros visam otimizar o aproveitamento racional das fontes já existentes.

No caso do carvão, a extração, o processamento e um melhor aproveitamento dos finos, tornaram-se atrativos a partir da crescente valorização do carvão como fonte de energia primária e além disso, devido ao aumento crescente da produção das frações de menor tamanho.

Na indústria carbonífera, a aglomeração dos finos pode ser realizada normalmente através dos seguintes processos: extrusão (50)(51), briquetagem (26)(52) e pelotização (53)(54).

2.2.1 Aglomeração de finos de carvão por extrusão

2.2.1.1 Definição e generalidades

Como foi definido anteriormente, a extrusão é um processo de aglomeração caracterizado pela aplicação de uma pressão externa ao processo, que obriga aos finos de carvão a passar através dos orifícios de uma matriz, ocorrendo, deste modo, o fenômeno de compactação dos particulados finos.

Na extrusão de finos de carvão é fundamental a adição de agentes ligantes apropriados para dar à massa de carvão a ser aglomerada, características de fluidez e plasticidade necessárias neste processo de aglomeração (55). O equipamento geralmente utilizado para finos de carvão é a extrusora de parafuso sem fim.

Na figura 2 está representada uma extrusora de parafuso sem fim utilizada na extrusão de finos de carvão.

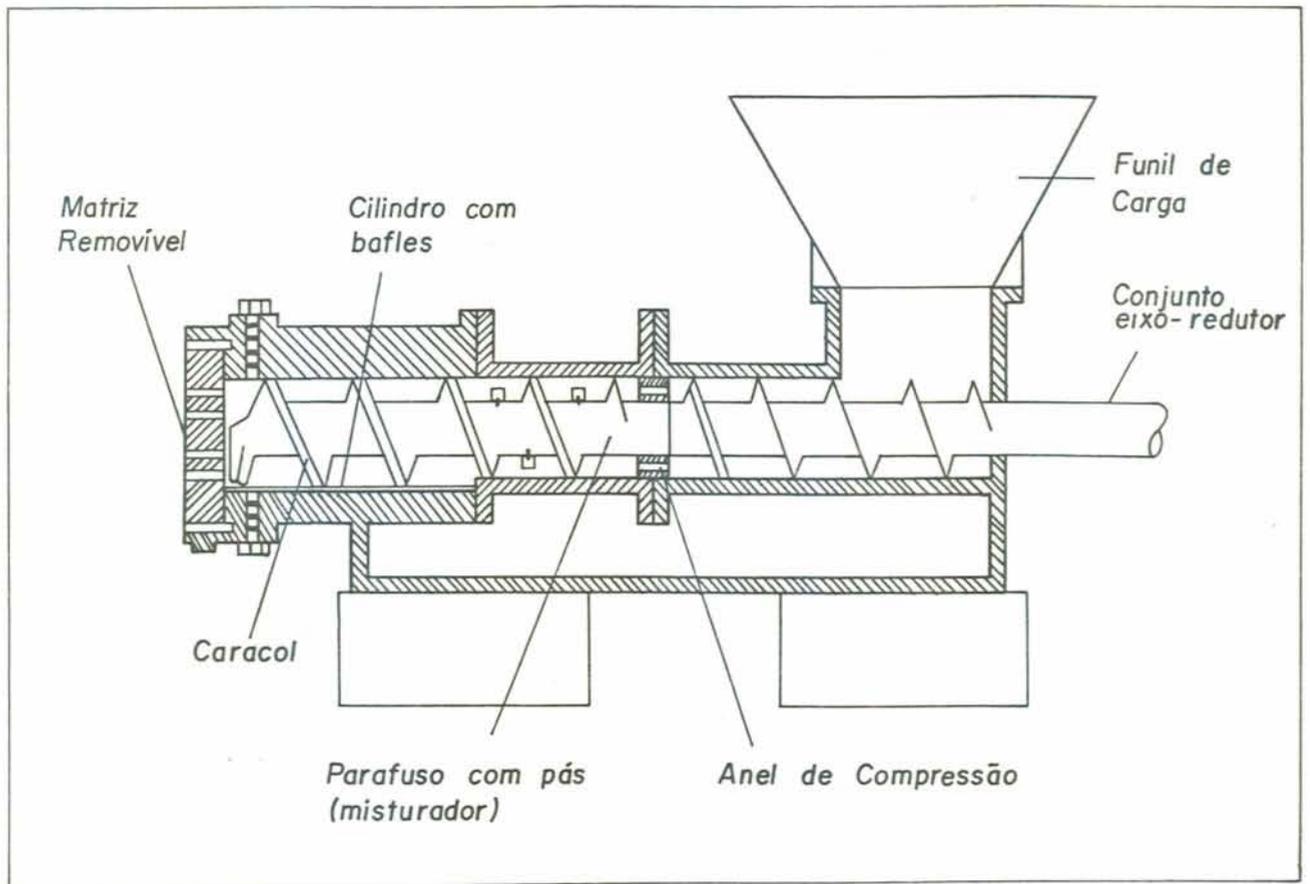


Figura 2 Extrusora de parafusos sem fim de laboratório utilizada na aglomeração de finos de carvão [51].

SCHWZEIZER (40) define como principais características da extrusão por parafuso sem fim de finos de carvão, as seguintes:

- Possibilidade de aglomerar finos de carvão com mais de 30% de umidade.

- A adição de agentes ligantes é fundamental para facilitar a compactação, devido à impossibilidade de serem aplicadas grandes pressões externas.

- O produto extrudado, de um modo geral, não é muito resistente.

Ainda, segundo o próprio SCHWZEIZER, o investimento inicial relativamente pequeno é uma das vantagens, além disso, pode-se alcançar uma produção de até 60 tph de extrudados de finos de carvão utilizando-se equipamentos de dois estágios e com aplicação de vácuo. A manutenção pode ter custos menores devido à possibilidade de se utilizar partes intercambiáveis no equipamento, como é o caso do caracol e das pás do parafuso que sofrem grande desgaste. A forma e o tamanho dos aglomerados obtidos podem ser facilmente mudados pela simples mudança da matriz (40).

2.2.1.2 Aspectos operacionais e aplicações da extrusão

Além das próprias características construtivas da extrusora, há uma série de variáveis que influem acentuadamente nas qualidades físicas dos aglomerados extrudados de finos de carvão, entre as principais figuram: teor de umidade da alimentação, distribuição granulométrica da alimentação, homogeneização e mistura, adição de agentes ligantes e lubrificantes.

Teor de umidade da alimentação: DAY e WRIGHT (51) estudaram a aglomeração de finos de antracito via extrusão, afirmaram que a principal força responsável pelas ligações entre as partículas úmidas individuais de carvão eram dadas pelas forças capilares, cuja magnitude calcularam segundo a seguinte equação, para partí

culas esféricas completamente molhadas - ângulo de contato $\theta = 0$, vide figura 3.

$$P_c = \gamma (1/r - 1/R) \quad (1)$$

onde:

P_c = Pressão capilar em unidades apropriadas

γ = Tensão superficial.

r = Raio de curvatura do menisco.

R = Distância entre os pontos de contato das esferas.

A partir desta equação e dos dados obtidos, DAY e WRIGHT construíram uma série de curvas, que são apresentadas na figura 4, mostrando a relação que existe entre o teor de umidade, granulometria e pressão capilar entre as partículas de finos de carvão.

Observa-se nesta figura que, com a diminuição no teor de umidade ocorre um aumento na pressão capilar e, ao diminuir a umidade, ocorre uma diminuição na área sobre a qual atuarão as forças capilares. O teor de umidade na alimentação influe fundamentalmente na energia de compactação a ser aplicada aos finos de carvão; se o teor de umidade for tão alto como para preencher todos os vazios entre as partículas, será necessária uma força de compactação maior, originando duas coisas: ou o excesso será expelido da massa, ou este excesso d'água impedirá dar ao material uma compactação satisfatória. Por outro lado, se o teor de umidade for muito baixo, bolhas de ar poderão ficar presas durante a compactação e, quando do alívio da pressão aplicada, estas bolhas de ar se expandirão destruindo o aglomerado formado.

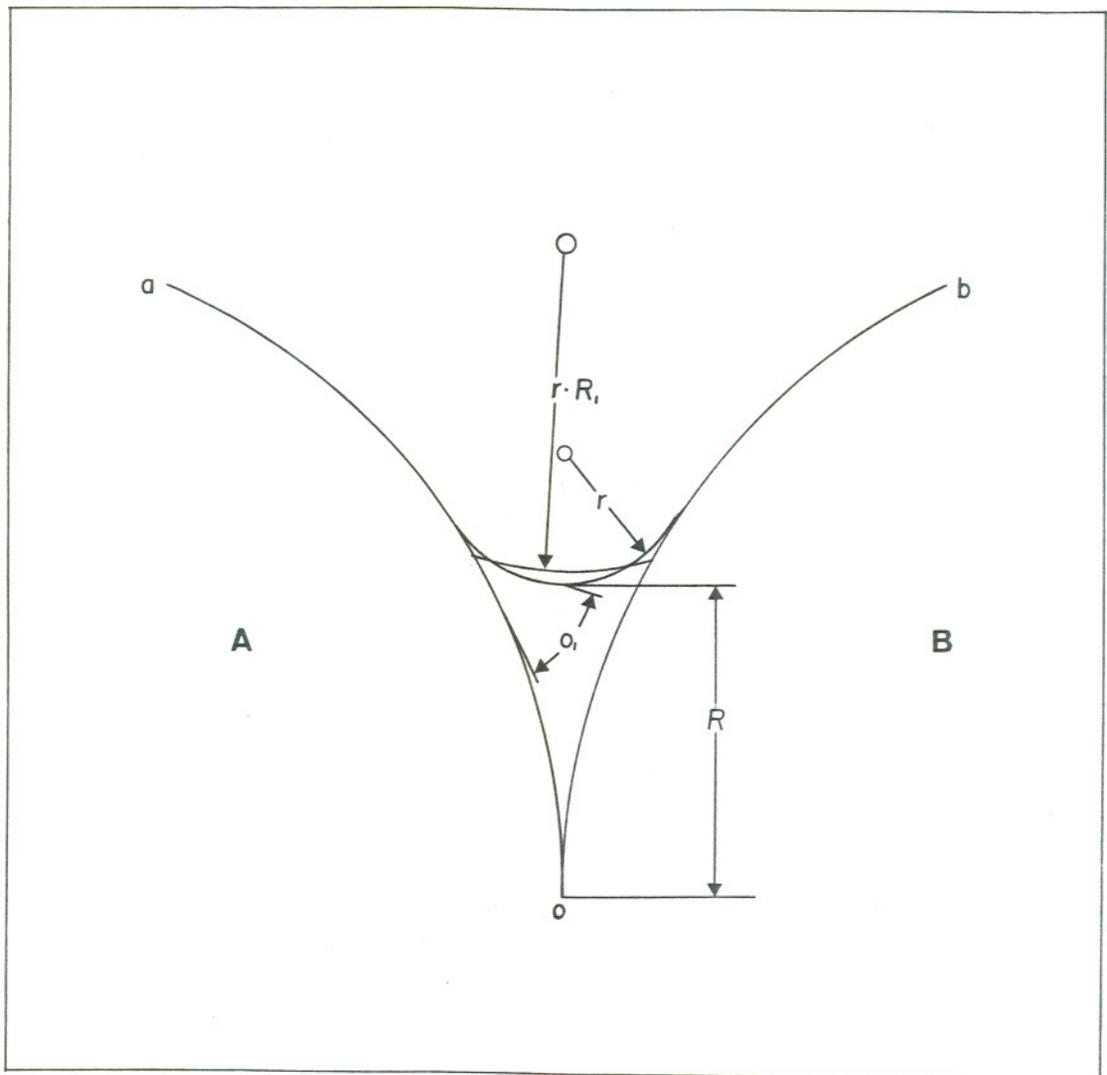


Figura 3 Segmento do capilar formado pelo contato entre duas esferas no ponto O (51).

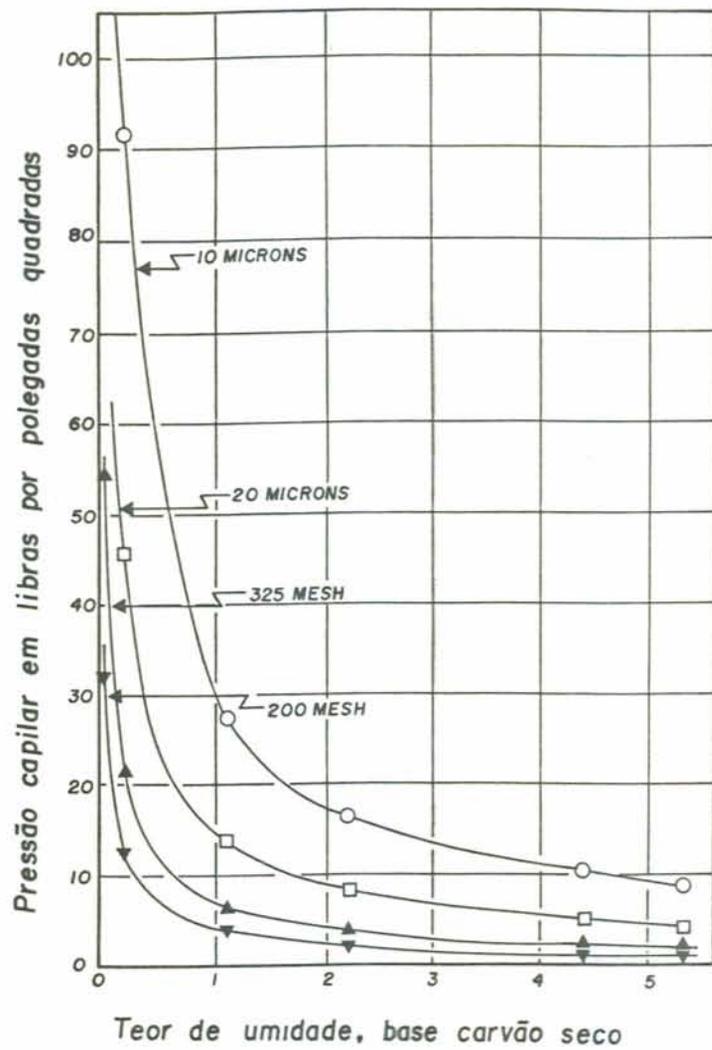


Figura 4 Variação da pressão capilar em função do teor de umidade e da distribuição granulométrica das partículas (51).

Homogeneização: DAY e WRIGHT reportaram que uma boa mistura do material a ser aglomerado junto com o ligante adicionado, resulta em aglomerados de boas características de resistência mecânica. No caso da extrusão de finos de carvão com certa umidade e sem uso de ligantes, esta mistura se faz necessária para eliminar os possíveis filmes de ar adsorvidos nas superfícies das partículas que irão prejudicar posteriormente a resistência dos aglomerados.

Distribuição granulométrica da alimentação: De um modo geral, na aglomeração de um material, uma baixa proporção de finos na alimentação produz aglomerados de baixa densidade e conseqüentemente de baixa resistência; por outro lado, muitos finos aumentam a quantidade de ligante a ser adicionado e necessitam de uma maior energia de compactação para serem extrudados (40). No que se refere à alimentação, um fator importante seria a forma das partículas individuais, pois partículas de finos de carvão de formas irregulares poderão ser compactadas com maior facilidade e os aglomerados obtidos terão maiores resistências mecânicas, devido ao melhor efeito de interpenetração das partículas e conseqüentemente um aumento na densidade do aglomerado (51).

Agentes ligantes e lubrificantes: KOMARECK (29) define os ligantes como aditivos que ajudam na aglomeração de particulados finos e que de certa forma aumentam a resistência mecânica dos aglomerados. Os lubrificantes, por sua vez, diminuem o atrito entre as partículas que constituem o aglomerado ou entre a superfície do aglomerado e as paredes da matriz, facilitando a compactação do material.

No que se refere à aglomeração de finos de carvão por extrusão a frio, é fundamental a adição de agentes ligantes para conferir à massa propriedades de fluidez e plasticidade e, também, para dar ao material uma compactação satisfatória como a aplicação de menor pressão daquela necessária para extrudar finos sem a adição de ligantes (55). No entanto, a escolha por um determinado agente ligante é governada fundamentalmente por fato-

res econômicos, ambientais e estes não devem alterar as características do carvão, principalmente os teores de cinzas e enxofre (28).

Quanto às aplicações da extrusão de finos de carvão, os primeiros trabalhos realizados foram feitos por DAY e WRIGHT. Estes pesquisadores estudaram a extrusão de finos de antracito, finos de carvão betuminoso e uma de mistura destes carvões. A granulometria dos finos utilizada foi de 27% menor que 14 malhas e de 100% menor que 200 malhas. Os melhores resultados foram obtidos com os finos de antracito; já a extrusão dos finos de carvão betuminoso apresentaram diversos problemas operacionais, principalmente o entupimento do equipamento e os aglomerados obtidos apresentaram pouca resistência ao manuseio. Os testes foram realizados sem o uso de agentes ligantes externos, e os extrudados após submetidos a uma secagem térmica, eram tratados com emulsões de óleos, pulverizados sobre as pilhas de estocagem visando protegê-los da penetração d'água, principalmente.

FURNAM (56), por sua vez, estudou a extrusão a quente de finos de carvão, visando à alimentação contínua de um gaseificador de leito fixo. A granulometria utilizada foi de 30 - 40% menor que 60 malhas. No início, FURNAM não obteve sucesso nas tentativas de aquecer os finos de carvão antes de serem aglomerados, devido à formação de voláteis e à variação na fluidez do material. Posteriormente, constatou que, com a adição de 10% de pichado próprio gaseificador como ligante, a extrusão poderia ser feita a baixa temperatura - 93°C -, obtendo-se aglomerados de resistência mecânica razoável.

Por outro lado, OLDAKER (57) estudou a extrusão a quente de misturas de finos de carvão com pequeno ou nenhum poder aglomerante, e finos de carvão altamente aglomerantes, para produção de um combustível metalúrgico. Do mesmo modo que FURNAM, OLDAKER teve problemas com a formação de voláteis e conseqüente variação na fluidez do material com o aumento da temperatura.

2.2.2 Pelotização de finos de carvão

2.2.2.1 Definição e generalidades

Segundo SASTRY e MEHROTRA (24), até 1981, existiam aproximadamente umas 20 publicações referentes à pelotização de finos de carvão, sendo que a maioria delas trata, principalmente, sobre os aspectos operacionais envolvidos e pouca atenção tem-se dado aos aspectos fundamentais.

Como foi definida anteriormente, a pelotização ou granulação, como é comumente chamada, é um processo de aglomeração caracterizado pela formação de corpos de formatos esféricos, devido ao constante movimento rotacional do material úmido fino (na presença ou não de agentes ligantes) em aparelhos apropriados.

As figuras 5, 6 e 7 apresentam, respectivamente, exemplos de disco, de tambor e de cone pelotizador, equipamentos utilizados na aglomeração de particulados finos, inclusive na pelotização de finos de carvão.

Os processos de pelotização ocorrem sem a aplicação de forças externas para a obtenção dos aglomerados. Por isso, as forças responsáveis pelas ligações entre as partículas de carvão, e que proporcionam resistências mecânicas aos aglomerados, são classificadas em dois tipos: forças físicas e forças aplicadas (25).

As forças físicas envolvem:

- Ligações sólidas: endurecimento de ligantes, cristalização, etc.

- Forças interfaciais (pressão capilar) em sistemas sólido/líquido.

- Forças adesivas e coesivas que ocorrem na presença de ligantes viscosos.

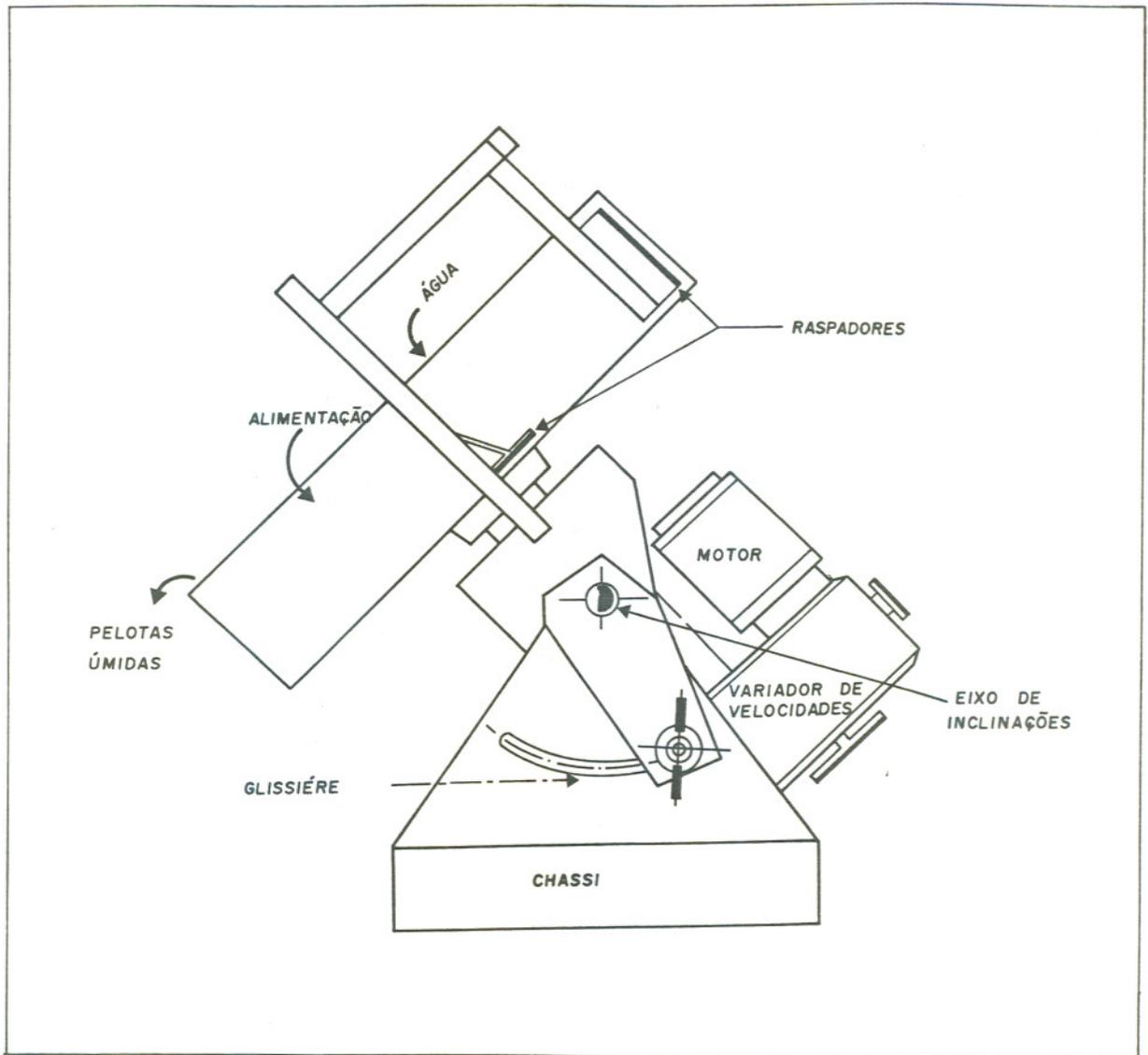


Figura 5 Disco pelletizador.

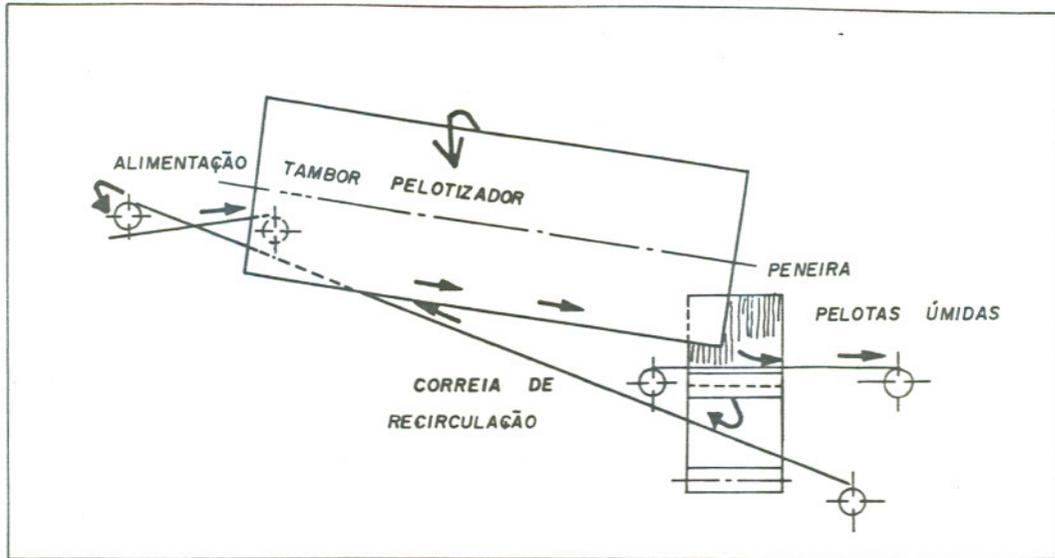


Figura 6 Tambor pelotizador.

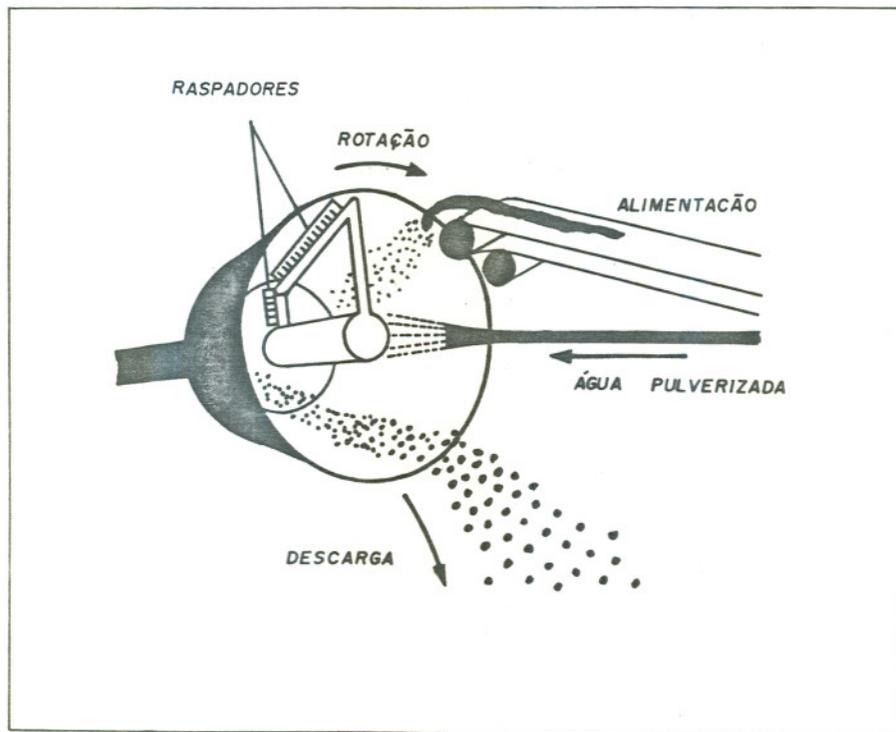


Figura 7 Cone pelotizador

- Atração entre partículas sólidas (forças de Van der Waals, eletrostáticas e eletromagnéticas).

- Entrelaçamento de partículas de formas irregulares.

O segundo tipo de forças refere-se às forças aplicadas, ou seja, aos efeitos originados durante a ação do regime de cascata que propicia a aproximação das partículas individuais, onde as forças físicas começam a atuar (25).

Nos processos de aglomeração em que as partículas individuais estão completamente molhadas, como é o caso da pelotização de finos de carvão beneficiados, as principais forças físicas envolvidas provêm do efeito capilar e da tensão superficial(51)(58). A magnitude das forças capilares dependem do tipo de ligação entre as partículas de carvão, e podem ser: pendular, funicular e capilar - vide figura 8.

Crescimento cinético das pelotas:

Na análise cinética dos processos de pelotização de materiais particulados é comum, na prática, citar-se os mecanismos de crescimento como sendo os responsáveis exclusivos pela formação dos aglomerados, em lugar de descrever-se o processo em termos das forças físicas e forças mecânicas envolvidas.

Assim, os mecanismos de crescimento das pelotas são classificados em quatro tipos: nucleação, coalescência, recobrimento e transferência de massa por abrasão (25)(59).

A figura 9 apresenta, de forma esquemática, os mecanismos de crescimento do aglomerado na pelotização de particulados finos.

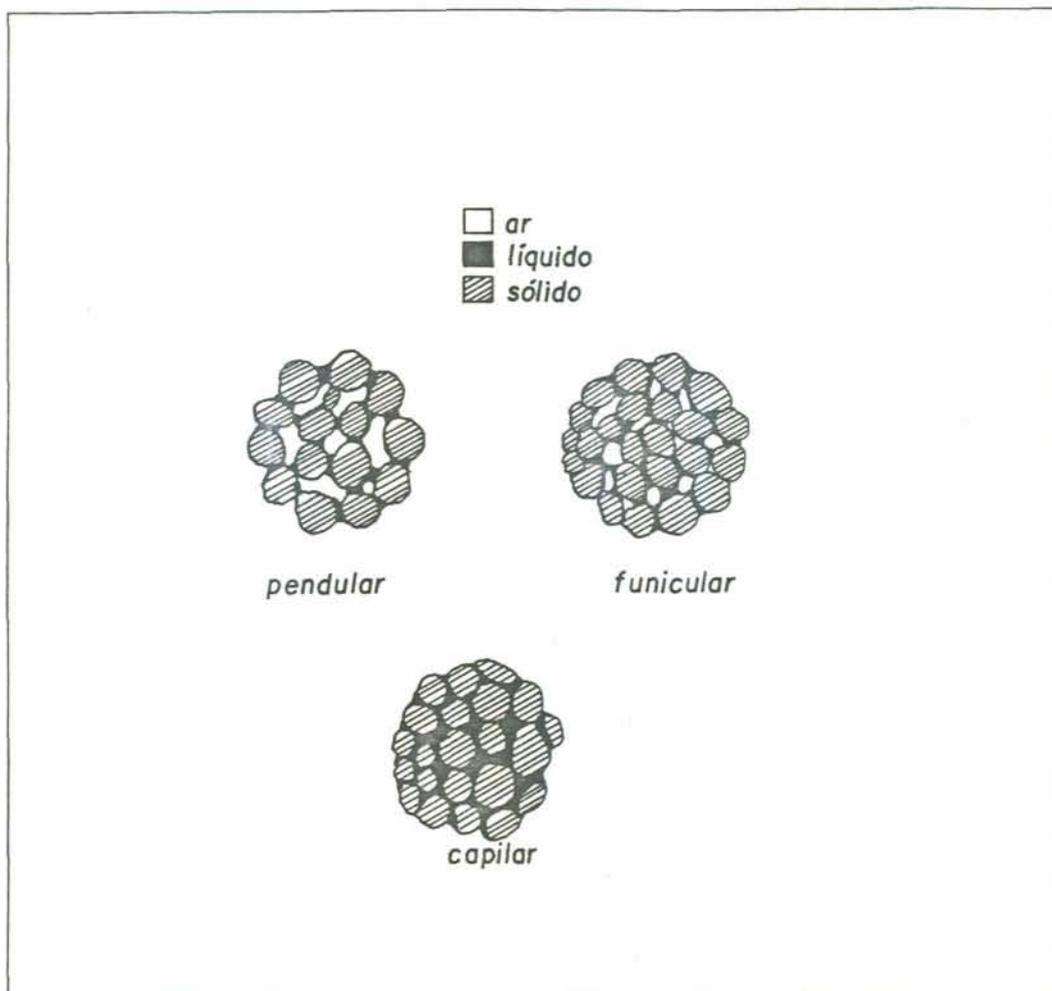


Figura 8 Estrutura de um aglomerado poroso, com referência à distribuição relativa das fases ar-
-água-sólido (59).

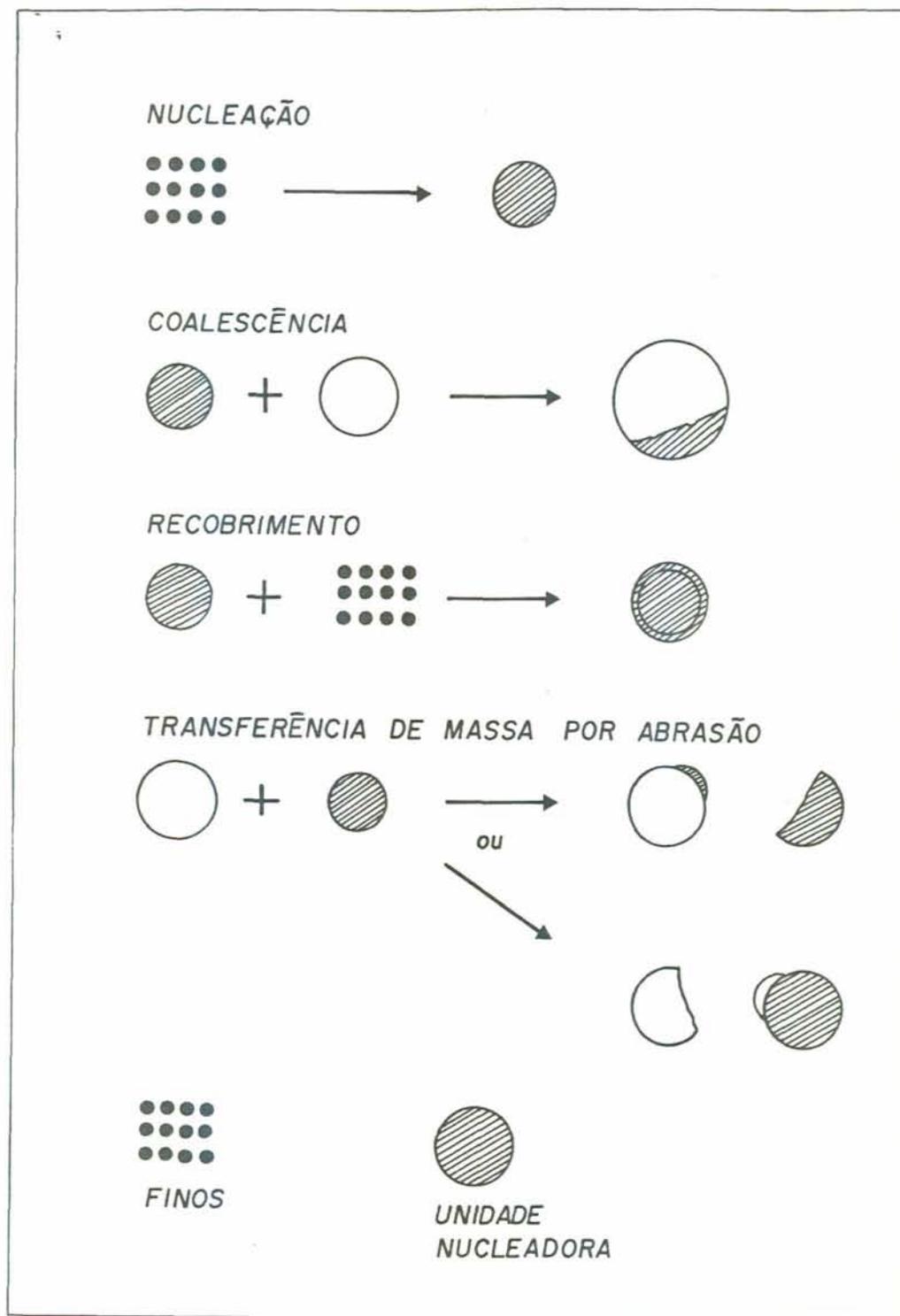


Figura 9 Mecanismos de crescimento do aglomerado na pelotização de particulados finos [25].

A nucleação de novas espécies resulta da atração capilar entre as partículas individuais de carvão úmidas. Nos ensaios de pelotização, a formação do núcleo da pelota ocorre logo nas primeiras rotações do pelotizador, causando mudanças tanto na massa, como na quantidade de pelotas formadas.

A coalescência refere-se ao fenômeno de crescimento das pelotas devido à agregação de dois ou mais grânulos que colidem entre si. Este mecanismo origina uma diminuição do número total de pelotas formadas, mas não causa mudanças na massa total do sistema.

O rompimento ou a desintegração das pelotas causam a formação de uma série de fragmentos de menor tamanho que irão se redistribuir nas superfícies das outras pelotas devido ao efeito do princípio da bola de neve. O efeito da bola de neve também ocorre quando adicionamos ao sistema uma nova alimentação úmida, as pelotas anteriormente formadas atuam como "sementes" e coletam os particulados finos adicionados, devido, principalmente, ao movimento de rotação proporcionado pelo pelotizador. Deste fenômeno resultam mudanças contínuas no tamanho das pelotas, o que resulta num aumento da massa total do sistema.

O fenômeno de crescimento das pelotas devido à transferência de massa por abrasão ocorre tanto pela iteração, como pela abrasão entre as pelotas durante a pelotização, já que, certa quantidade de material é transferida de uma pelota para outra durante o momento da iteração. A transferência de massa por abrasão é um tipo de crescimento que não causa mudanças na massa total do sistema, porém produz mudanças contínuas no diâmetro das pelotas.

Estes mecanismos de crescimento podem atuar sozinhos ou em conjunto na formação de pelotas, porém, eles dependem fundamentalmente das características de alimentação a ser pelotizada. Por exemplo, no caso da pelotização de finos de carvão mineral com distribuição granulométrica estreita, o crescimento das pelotas

ocorre por recobrimento das partículas finas nos núcleos já formados. Por outro lado, a pelletização de material particulado com ampla distribuição granulométrica, o crescimento dos aglomerados ocorre por coalescência e transferência de massa por abrasão, principalmente (60)(61).

Ensaio de laboratório realizados por KAPUR, SASTRY e FUERS TENAU (60)(62), para estudar a cinética de pelletização de materiais particulados, seus resultados concluíram que o comportamento da variação do diâmetro das pelotas obtidas em relação ao número total de rotações do pelletizador, descreve uma curva típica com formato aproximado de S. Essas curvas, assim obtidas, apresentam três regiões definidas de crescimento dos aglomerados, denominadas: região de nucleação, região de transição e região de crescimento da pelota propriamente dita (63). O tamanho destas regiões depende fundamentalmente das condições operacionais do processo de pelletização e das características do carvão a ser aglomerado (42)(63).

Na região de formação do núcleo da pelota, as partículas individuais de carvão agregam-se devido ao efeito pendular e atingem um formato esférico (60). Dependendo das condições operacionais - teor de umidade, quantidade de finos na alimentação, etc. - a formação do núcleo ocorre logo após as primeiras rotações do pelletizador.

O núcleo que é relativamente poroso (sistema de três fases: ar/líquido/sólido)(60), cresce pela coalescência com outros núcleos, os quais são compactados pelo constante rolamento do material. O compactamento do núcleo faz com que a água intraparticu- lar seja expelida para a superfície do núcleo, ponto no qual as pelotas passam de semi-secas para completamente molhadas. A presença de água na superfície da pelota indica o fim da região de nucleação e o início da região de transição (63).

Na região de transição, por causa do aparecimento da água na superfície, torna-se fácil a deformação das pelotas de carvão e a razão de crescimento das pelotas por coalescência aumen-

ta acentuadamente (63).

Na zona de crescimento da pelota, vários mecanismos, tais como: transferência de massa entre as pelotas e recobrimento - contribuem em diferentes graus no processo de crescimento; as pelotas formadas são maiores, mais densas e menos deformáveis e, conseqüentemente, a eficiência dos mecanismos de coalescência é menor e a velocidade de crescimento da pelota também é menor; nesta região a curva de crescimento do aglomerado tende a alcançar um platô (63).

- Fatores que controlam o crescimento cinético e a pelotização de finos de carvão:

As variáveis que controlam o crescimento cinético dos aglomerados no processo de pelotização de finos de carvão são inúmeras, entre as principais pode-se mencionar: distribuição granulométrica, teor de umidade da alimentação, velocidade de rotação e inclinação do pelotizador e efeito da adição de agentes ligantes.

Efeito da umidade da alimentação: Nos processos de pelotização de finos de carvão a taxa de crescimento das pelotas é influenciada significativamente pela quantidade de umidade na alimentação. De modo geral, com o aumento do teor de umidade, temos um aumento na taxa de crescimento do aglomerado devido à maior eficiência dos mecanismos de coalescência (58).

A faixa de umidade necessária para a pelotização de finos de carvão é muito estreita. As partículas fora desta faixa estão muito secas e não aglomeram ou estão muito molhadas e formam massas pastosas com pouca ou nenhuma característica de resistência mecânica (24).

Em relação ao teor de umidade ótimo para a pelotização de finos de carvão, a bibliografia registra dois critérios. O primeiro critério, desenvolvido por CAPES e DANKWERTS (64), sugere

que a quantidade de água necessária para a pelotização de finos de carvão corresponde de 95 a 105% do volume total de vazios na alimentação. O segundo, desenvolvido por MEHROTRA e SASTRY (42), através de uma análise estatística entre a umidade requerida para a pelotização e as características físicas e químicas do carvão, indica que existe uma forte correlação entre a umidade e o teor de cinza dos finos, independente do "rank" e da origem geográfica do carvão, dada pela seguinte equação:

$$M_w = 44 \exp(-0,017A) \quad (2)$$

onde:

M_w = percentagem em peso da umidade necessária para a pelotização.

A = teor de cinzas dos finos de carvão na alimentação.

Esta equação indica que quanto menor for o teor de cinzas na alimentação, maior será a quantidade de água necessária para a pelotização e vice-versa; esta afirmação é explicada em termos de natureza hidrofóbica do carvão (25).

Distribuição granulométrica da alimentação: Nos processos de pelotização de finos de carvão a qualidade e o crescimento das pelotas obtidas dependem muito da distribuição granulométrica da alimentação (24).

Para um mesmo teor de umidade da alimentação, a taxa de crescimento das pelotas diminui com o aumento da área superficial da alimentação, quando comparado com a pelotização de particulados mais grosseiros, cuja taxa de crescimento é maior. Por outro lado, uma ampla distribuição granulométrica, constituída por particulados finos e grosseiros em determinadas proporções, facilita grandemente a ação dos mecanismos de crescimento dos aglomerados (65).

Uma distribuição granulométrica típica, e que têm sido utilizada satisfatoriamente em plantas industriais de pelotização, refere-se à distribuição de tamanhos usada nas plantas de beneficiamento de carvão por flotação, (28x0#) (23)(33).

Variáveis operacionais do pelotizador: As variáveis operacionais do pelotizador, tais como: velocidade de rotação e inclinação, têm relação direta com o tempo de retenção do material dentro do equipamento, e este, por sua vez, influi na taxa de crescimento e no tamanho da pelota do carvão obtida (66).

No caso da utilização do disco pelotizador, o local da aplicação da alimentação também influi no tamanho e na quantidade de pelotas formadas, visto que, ele controla a quantidade de material que irá para a zona de nucleação do equipamento (66).

Efeito da adição de ligantes: Na maioria dos processos de aglomeração de finos de carvão, se faz necessária a adição de agentes ligantes para induzir a ação dos mecanismos de crescimento, bem como, também, para melhorar as características de resistência dos aglomerados obtidos (24).

Todas as pesquisas anteriormente realizadas, concordam que, após a adição de um ligante adequado, obtêm-se aglomerados de carvão com melhores qualidades de resistência do que aqueles obtidos sem o uso de ligantes (28)(58).

No entanto, os ligantes devem cumprir certos requisitos para poderem ser utilizados na pelotização de finos de carvão, tais como (24)(28):

- baixo custo;
- utilizado em pequenas quantidades;
- fácil de ser misturado com os finos de carvão;

- não ser poluente: baixos teores de enxofre, principalmente, e

- não devem alterar as propriedades químicas do carvão.

Em relação à pelletização de finos de carvão, a literatura indica um grande número de agentes ligantes que podem ser utilizados (23)(47)(55) - vide Tabela V.

TABELA V PRINCIPAIS AGENTES LIGANTES UTILIZADOS NA PELOTIZAÇÃO DE FINOS DE CARVÃO (55)(67).

L I G A N T E	TIPO DE CARVÃO
píche	Antracito
água	
amido de milho	
amido de mandioca	Betuminoso
alcatrão de carvão	
grafita	Sub-betuminoso
lignosulfunatos	
lignina	Linhito
bentonita	
resinas	
sub-produtos orgânicos	
cal hidratada	
combinações destes	

2.2.2.2 Caracterização das pelotas de carvão

Um dos principais objetivos da pelletização de finos de carvão é a obtenção de um produto aglomerado com adequadas qualidades de resistência, de modo a facilitar o seu manuseio.

A maioria dos circuitos de pelletização de finos de carvão apresentam uma etapa de endurecimento, (cura), das pelotas ver-

des. Esta etapa de endurecimento pode ser uma simples secagem térmica, ou uma carbonização a altas temperaturas (58)(65).

Nas etapas de secagem térmica das pelotas de carvão verdes obtidas sem a adição de agentes ligantes, observa-se um aumento gradual da resistência das pelotas nos primeiros estágios. Isto acontece devido à evaporação do excesso de água da superfície da pelota; e segundo PEARSE e colaboradores(68) à medida que a secagem vai-se processando, a pelota apresenta-se cada vez mais porosa e a resistência remanescente apresenta valores insignificantes originados pela completa eliminação das forças capilares de ligação entre as partículas.

Quando se utiliza agentes ligantes para pelletizar finos de carvão, a cura das pelotas verdes é fundamental, pois, dependendo do tipo de ligante empregado, após a cura, estes atuarão de modo diferente nas ligações entre as partículas finas. Por exemplo, ligantes coloidais tendem a endurecer quando secos e podem formar pontes sólidas entre as partículas, atuando como argamas sa ou cola (58).

Embora ainda não se tenha padronizado quais devam ser as qualidades de resistência mecânica que as pelotas de finos de carvão devem apresentar, existem vários ensaios para verificar as resistências mecânicas nos aglomerados, e que servem também como parâmetros comparativos entre um teste de pelletização e outro.

Entre os principais ensaios descritos para caracterização das pelotas de finos de carvão, destacam-se (25)(28)(67)(69):

- distribuição granulométrica das pelotas;
- resistência à compressão;
- resistência ao impacto;

- resistência à abrasão; e
- resistência às condições ambientais.

Distribuição granulométrica das pelotas:

A distribuição do tamanho do produto obtido na pelotização de finos de carvão é um parâmetro fundamental para avaliar a "performance" do pelotizador e verificar como afetam as variáveis estudadas no crescimento cinético das pelotas.

A determinação do diâmetro médio das pelotas de carvão para cada ensaio de pelotização pode ser realizada através de um "counter size" (25), ou através da análise individual de um lote de pelotas.

No primeiro caso, muito utilizado nos ensaios de caracterização das pelotas de finos de carvão por SASTRY e FUERSTENAU (25), o diâmetro médio das pelotas é calculado pela seguinte equação:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{N_i \times D_i}{N_i} \quad (3)$$

onde:

N_i = pelota "i"

D_i = diâmetro da pelota "i"

n = número de pelotas testadas

D = diâmetro médio do conjunto de pelotas.

Como as pelotas obtidas nem sempre são totalmente esféricas, e para uma mesma pelota pode-se medir dois diâmetros, conforme a posição de referência, o segundo método que determina o diâmetro médio das pelotas leva em conta o peso de cada pelota e é calculado pela seguinte expressão:

$$GWMD = \sum_{i=1}^n \frac{W_i \times D_i}{W_i} \quad (4)$$

onde:

W_i = peso da pelota "i"

D_i = diâmetro da pelota "i"

n = número total de pelotas testadas

GWMD = "Geometric Weight Main Diameter", é o diâmetro médio do conjunto de pelotas.

Por esta expressão, tenta-se minimizar o efeito da não uniformidade da forma superficial da pelota.

Ensaio de resistência à compressão:

Através deste ensaio trata-se de verificar as características de resistência das pelotas de carvão submetidas a trabalho mecânico de compressão.

Este ensaio é bem conhecido na análise de pelotas de minérios de ferro (70), porém, no caso das pelotas de finos de carvão, este teste ainda não é muito bem definido. O ensaio consiste em colocar a pelota a ser analisada entre duas placas paralelas e aplicar uma carga de compressão até se verificar a ruptura do aglomerado, vide figura 10.

Em pesquisas realizadas anteriormente por KAPUR e FUERSTENAU (71), concluiu-se que existe uma relação de potência entre a massa da pelota de carvão testada e a carga de ruptura aplicada, dada pela seguinte equação:

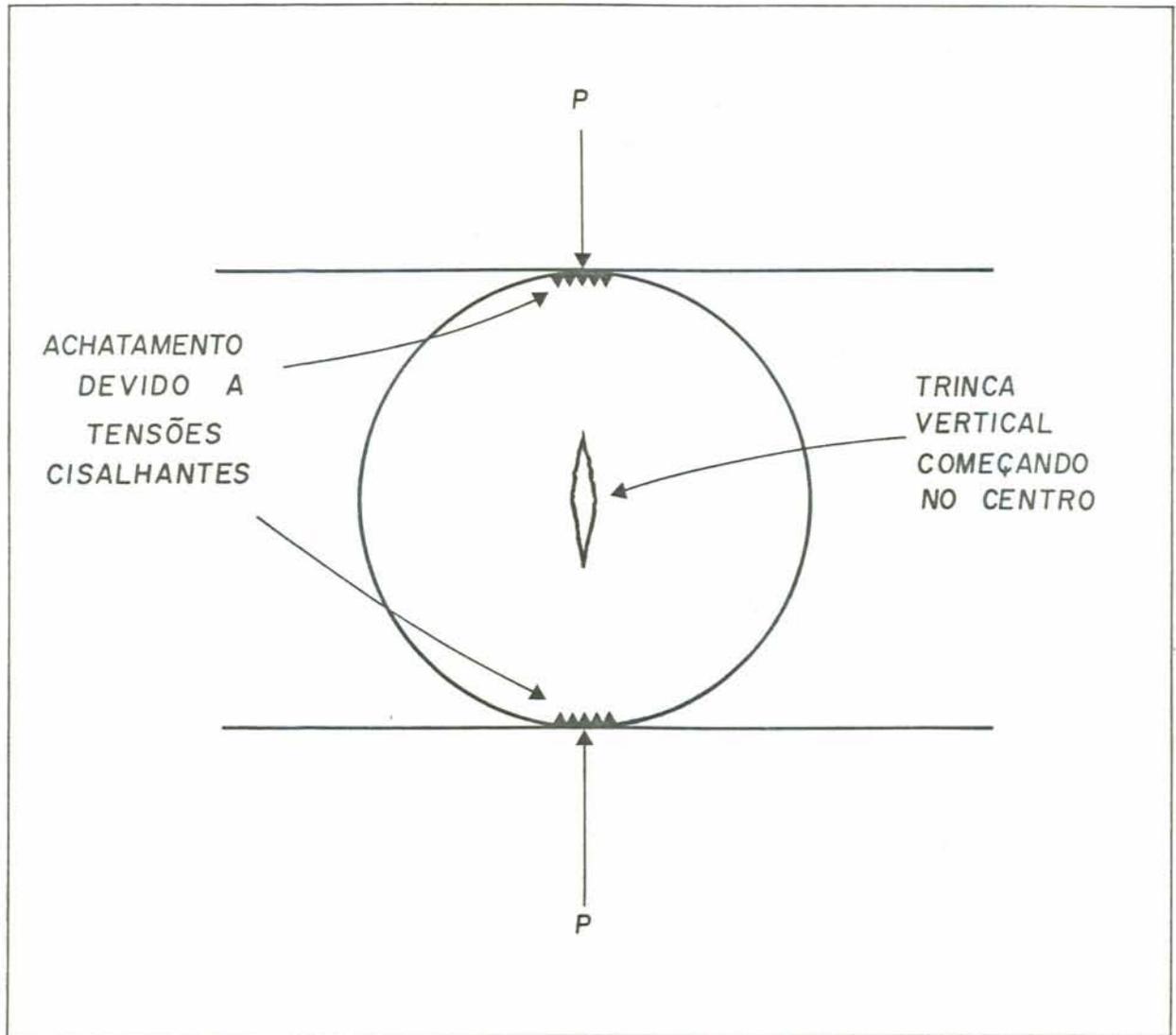


Figura 10 Esfera comprimida entre placas e fratura sendo indicada por tensões de tração no centro (72).

$$L_f = K_s \times M^a \quad (5)$$

onde:

L_f = carga de ruptura aplicada, kgf.

M = massa da pelota de carvão testada, g.

K_s e a = são parâmetros da equação.

Os parâmetros são determinados para cada ensaio de compressão através de uma regressão de potências, e o índice de resistência à compressão é calculado para uma pelota de massa unitária, ($L_f = K_s$).

Com o objetivo de reproduzir o ambiente real encontrado pela pelota, como por exemplo, numa pilha ou dentro de um forno, MEYERS e MEYERS (72)(73) propõem dois novos métodos para determinar a resistência à compressão, e que podem ser aplicados a pelotas de carvão. O primeiro método é o "Método das Seis Esferas"; neste ensaio cada pelota é cercada por várias outras pelotas e os pontos de contato não são apenas dois como no ensaio anterior - vide figura 11.

Através deste ensaio verifica-se que a pelota é aproximadamente 30% mais resistente em seu ambiente real do que no ensaio anteriormente descrito.

O segundo é o "Método do Cilindro e Pistão". Este ensaio consiste em carregar as pelotas para dentro de um cilindro, até uma determinada altura. Após, o pistão é comprimido (figura 12).

Neste método, grande quantidade de pelotas são esmagadas num único ensaio e através da curva tensão versus deformação determina-se o comportamento à compressão das pelotas (73).

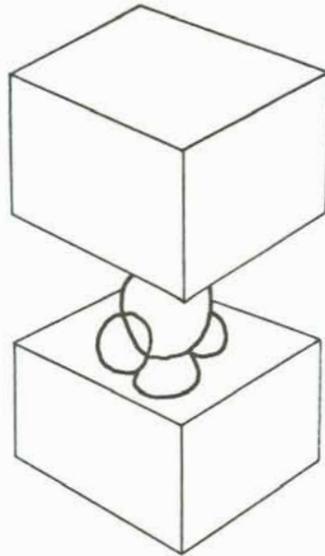


Figura 11 Sistema melhorado para verificar a resistência mecânica em pelotas; composto por três esferas inseridas em cada placa (72).

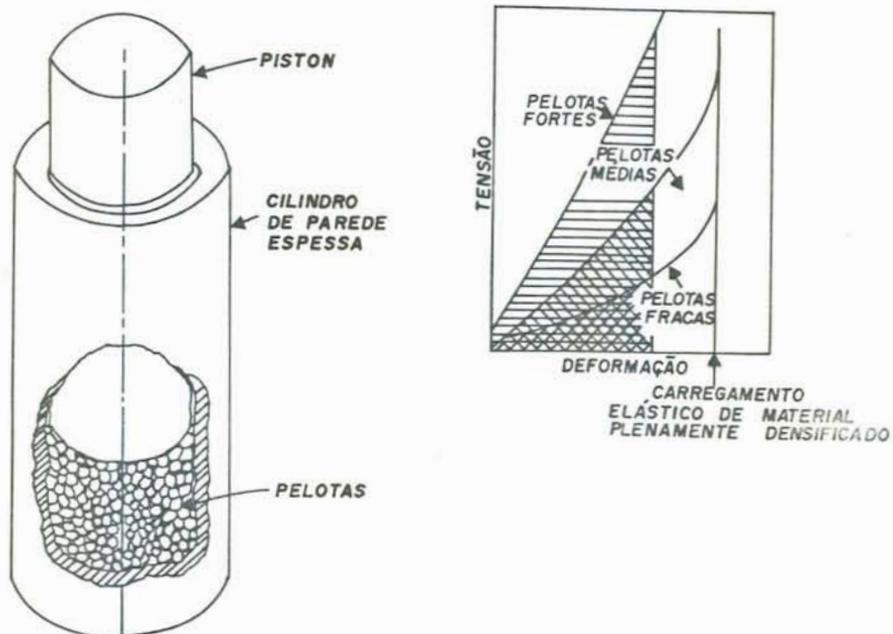


Figura 12 Representação esquemática de tensão versus deformação para pelotas fortes, médias e fracas, utilizando-se ensaio de cilindro e pistão (72).

Ensaio de resistência ao impacto:

Este ensaio é uma simulação para verificar a resistência das pelotas de carvão ao impacto, como consequência direta das sucessivas manobras durante o manuseio e o transporte. O ensaio consiste em deixar cair a pelota desde uma altura determinada (45 ou 90 cm) sobre uma placa de aço e registra-se o número de quedas que cada pelota suporta até se desintegrar (25). O índice de resistência ao impacto obtido serve como parâmetro comparativo entre ensaios de pelotização, para observar como afetam as variáveis estudadas nas resistências dos aglomerados de carvão obtidos.

Ensaio de resistência à abrasão:

Este ensaio determina as características de friabilidade e a tendência de geração de fins das pelotas de carvão, quando submetidas a movimentos de rotação. É fundamental saber-se a magnitude desta resistência, porque através dela podemos prever qual seria o comportamento das pelotas quando expostas a constante movimentação, como por exemplo, durante o carregamento e o transporte.

O ensaio é realizado em equipamentos apropriados e consiste em colocar as amostras de carvão dentro de um tambor, e após um certo período de tamboreamento, todo o material é peneirado (74). O índice de resistência à abrasão é calculado pela seguinte relação (75):

$$I_a = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (6)$$

onde:

M_f = massa remanescente após o peneiramento do material.

M_i = massa inicial das pelotas carregadas no tambor.

I_a = índice de resistência à abrasão, dado em percentual.

Ensaio de resistência às condições ambientais:

Este ensaio trata de simular qual seria o comportamento dos aglomerados de finos de carvão quando expostos a intempéries, no qual estarão sujeitos à ação dos fenômenos ambientais, tais como: chuva e ação dos raios solares principalmente.

De acordo com SASTRY e MEHROTRA (28) o índice de resistência à penetração da água é dado pelo número de horas que os aglomerados de finos de carvão levariam para desintegrar-se completamente, quando colocados em recipientes contendo água à temperatura ambiente.

Já GÖKSEL (67), por sua vez, propõe uma modificação neste ensaio, verificando qual é a resistência remanescente do aglomerado de carvão após exposição à chuva e à ação do sol.

2.2.2.3 Aspectos operacionais e aplicações da pelotização

A pelotização de particulados finos têm sido definida, não como uma ciência, mas como uma arte, (23), devido às inúmeras variáveis que controlam este processo de aglomeração. A formação das pelotas de carvão e suas características de resistência mecânica são governadas fundamentalmente por: granulometria e teor de umidade da alimentação, tempo de residência do material no equipamento e adição de agentes ligantes, os quais foram anteriormente descritos.

Nesta parte da revisão bibliográfica, procurou-se mencionar as variáveis operacionais envolvidas na pelotização de finos de carvão em disco. Essas variáveis são os parâmetros utilizados para avaliar a eficiência do processo e do equipamento na aglomeração de particulados finos. Uma ótima operação do disco pelotizador é caracterizada pela formação de um produto aglomerado livre de particulados finos.

A figura 13 apresenta os fluxos normais que uma pelota percorre dentro do disco até a sua saída do equipamento.

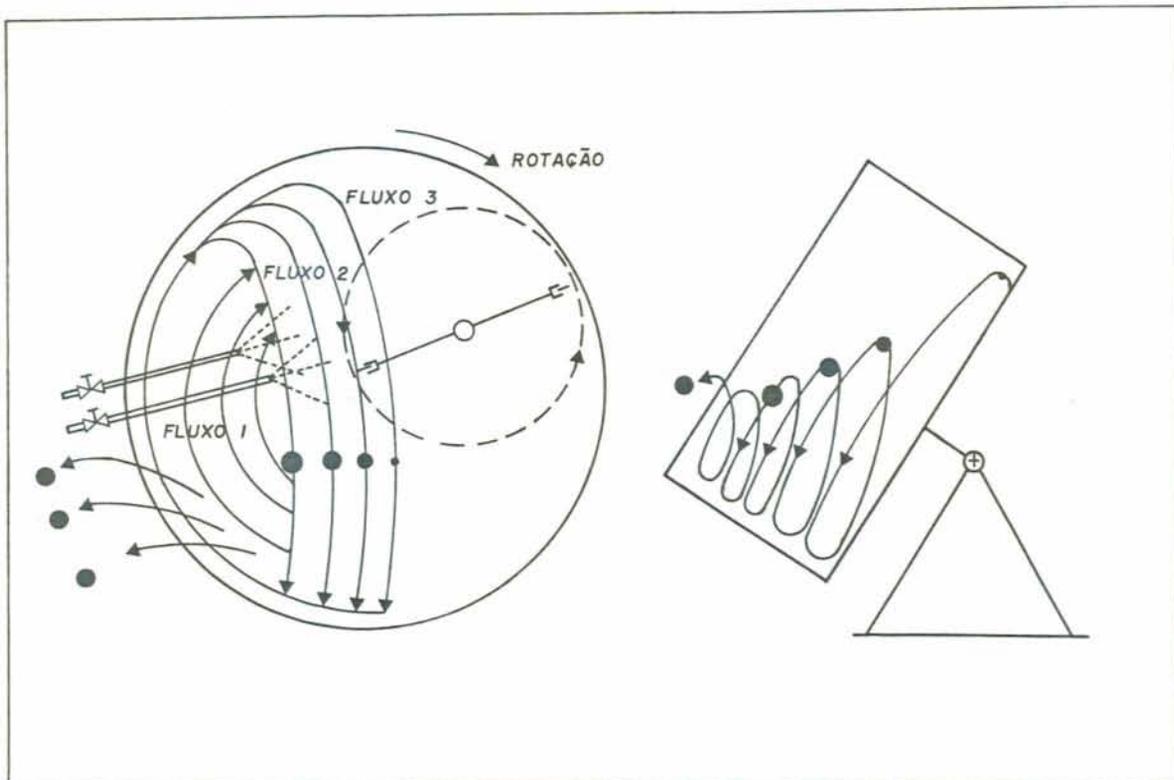


Figura 13 Representação esquemática dos fluxos percorridos pela pelota, desde sua formação até a saída do equipamento (66).

Devido à inclinação do disco e ao movimento do material, as pelotas maiores saem à superfície à medida que o material não aglomerado vai sendo pelletizado nas camadas inferiores do disco.

FLOYD (66) divide a superfície do disco em três regiões, nas quais ocorrem diferentes mecanismos de crescimento das pelotas de carvão.

Tipicamente na primeira região ou fluxo, têm-se a formação completa das pelotas que estarão prontas para serem descarregadas. Por outro lado, no terceiro fluxo estão localizados o material fino ainda não aglomerado e os pequenos núcleos de pelotas já constituídos. E o fluxo intermediário contém amostras representativas dos dois fluxos anteriormente mencionados.

Com a utilização do disco pelletizador na aglomeração de particulados finos, pode-se obter uma ampla distribuição de tamanhos do produto para uma dada alimentação.

Entre os fatores que controlam o tamanho das pelotas, pode-se mencionar:

- inclinação do disco;
- velocidade de rotação;
- local de aplicação da alimentação;
- localização do jato de água pulverizada no equipamento.

As variações na velocidade do pelletizador são necessárias, por exemplo, para produzir um certo grau de rolamento no material e proporcionar uma adequada formação dos fluxos que serão percorridos pelas pelotas em formação. A inclinação do disco, por sua vez, controla a quantidade de material contido em cada um dos fluxos (66). Através destes dois parâmetros pode-se influir na quantidade de material que está sendo pelletizado em ca

da operação do disco, pois eles controlam também o tempo de retenção do material do equipamento (32).

Nos processos contínuos de pelotização de finos de carvão, o tamanho do produto é função, primeiramente, tanto do local de aplicação da alimentação, como da localização do jato de água pulverizada no equipamento. De modo geral, o lugar de aplicação da alimentação no disco determina a quantidade de material que irá para a região de nucleação, a qual, por sua vez, controla o número de pelotas de carvão formadas no pelotizador.

FLOYD (66) propõe que o melhor local para aplicação da ali mentação é diretamente no terceiro fluxo. E quando se fizer necessário adição de água, esta deve ser aplicada um pouco mais acima em relação à alimentação, mas no mesmo fluxo. Ainda segundo o mesmo pesquisador, produtos de diâmetro maior poderão ser obtidos pela simples mudança na posição do carregamento da alimentação, do lado direito para o lado esquerdo do disco, pegando-se parte do primeiro fluxo. Contudo, observa-se que esta mudança de posição depende basicamente das características do carvão a ser aglomerado (63).

Uma vez fixado o local de carregamento da alimentação, a pelotização dos finos de carvão será controlada pela adição de água na forma de "spray". Por esta razão, a quantidade e a posi ção da adição de água têm uma relação direta com o tamanho do produto final, a eficiência na operação do disco e a qualidade das pelotas verdes de carvão obtidas (42). Pode-se acrescentar, ainda, que o controle no teor de umidade da alimentação é um fa tor primordial para variar o diâmetro das pelotas e para manter a eficiência de operação do pelotizador, apesar das possíveis variações na alimentação (42).

Em relação às aplicações práticas da pelotização de finos de carvão, o primeiro trabalho referente ao assunto foi realizado em 1951 por LANG e CARVETH (24). Estes pesquisadores realizaram os ensaios de pelotização utilizando finos de carvão com gra

nulometria menor que 6 mm e como ligante asfalto. O equipamento utilizado foi um tambor pelotizador de 120 cm de diâmetro, o qual era aquecido externamente a uma temperatura de aproximadamente 100°C. As pelotas obtidas apresentaram diâmetros em torno de 25 a 50 mm e com boas características de resistência; porém, o processo não se tornou viável industrialmente tanto pelo alto consumo de asfalto requerido, como pelos custos referentes à energia de aquecimento aplicada.

A British Coal Utilization Research Association (25), por sua vez, realizou estudos de pelotização de finos de carvão a partir de lamas de rejeito sem o uso de ligantes externos. O equipamento utilizado foi um cone oscilatório, o qual era aquecido externamente a uma temperatura entre 120 e 150°C, tentando evitar a aderência do material nas paredes do cone, bem como auxiliar na secagem térmica das pelotas. O principal problema encontrado foi a baixa resistência apresentada pelas pelotas de carvão.

Já, OPPEL e colaboradores(24), realizaram os primeiros estudos de laboratório, para explicar as variáveis que influem na pelotização de finos de linhito (granulometria menor que 5 mm). O equipamento utilizado foi um tambor (80 x 40 cm) e diversos ligantes foram testados, entre eles: piche, licor de lignina, amido e alcatrão, visando à obtenção de pelotas com altas características de resistência. Os melhores resultados foram obtidos utilizando amido como ligante e as principais conclusões da pesquisa referem-se à distribuição granulométrica como principal variável determinante na resistência das pelotas e na quantidade de ligante a ser adicionado, já que este, por sua vez, influi tanto nos mecanismos de crescimento das pelotas, como nas propriedades de resistência destas.

Outro trabalho realizado na pelotização de finos de carvão, foi feito por RIVA et alii (66), visando à alimentação de pelotas de carvão em processos de carbonização em fornos verticais. Os testes foram realizados utilizando um disco de 60 cm

de diâmetro, um tambor de escala piloto (120 x 90 cm) e um tambor de escala industrial (2,5 x 1,5 m). Estes pesquisadores concluíram que é possível pelotizar material graúdo de carvão, (granulometria de 1,2 mm) sempre que a alimentação contenha pelo menos 50% em peso, de material menor que 74 μ m. Os melhores resultados foram obtidos utilizando bentonita como ligante, na concentração de 2%. A faixa ótima de umidade da alimentação necessária à pelotização foi entre 18 e 23%.

Por outro lado, SAITO (32) realizou estudos de pelotização de finos de carvão a partir de lamas de rejeito, com granulometria menor que 0,6 mm. Os testes foram realizados utilizando um disco de 1,6 m de diâmetro e um tambor (3 x 1 m). Os ligantes empregados foram licor de lignina e alcatrão de carvão em concentrações variando entre 5 e 10%. As pelotas obtidas apresentaram diâmetros entre 5 - 50 mm e com boas características de resistência mecânica. As principais conclusões de SAITO estão relacionadas com as variáveis que influem na resistência das pelotas de carvão, tais como: o teor de umidade da alimentação, inclinação e velocidade do equipamento e da quantidade de material menor que 100 malhas presentes na alimentação.

HOLLEY e ANTONETTI (50) estudaram a viabilidade econômica de uma planta de pelotização de finos de carvão em escala piloto. A granulometria da alimentação era menor que 74 μ m e um teor de umidade ótimo para pelotização em torno de 30%. Os melhores resultados foram obtidos utilizando lignosulfonatos como ligantes na concentração de 5%. As pelotas obtidas apresentam diâmetros em torno de 12 mm, porém, a resistência mecânica das pelotas era baixa.

Quanto à aplicação industrial dos processos de pelotização de finos de carvão, houve até hoje, duas plantas. A primeira planta a "Rochester and Pittsburgh Coal Co." (23)(76), pelotizava finos de carvão recuperados de lamas de rejeito de flotação. O concentrado flotado (50% de sólidos e finos com granulometria menor que 325 malhas) era desaguado por meio de filtros até

26% de umidade e descarregado para dentro de um tambor pelotizador (10 x 3 m). O ligante utilizado foi a lignina em concentrações entre 0,5 e 1% em peso. As pelotas obtidas, com diâmetro variando entre 6 e 20 mm, eram posteriormente tratadas termicamente a 105°C até apresentarem uma umidade final em torno de 3%. A planta funcionou sem problemas por vários anos até a exaustão do carvão nas minas da companhia. Não existem referências sobre o estado atual desta planta.

Outra planta de pelotização de finos de carvão, pertencente à "Eastern Coal Company" (46), processo de partículas menores que 28 malhas, concentrados de flotação (de lamas de rejeito) com umidade em torno de 25% eram pelotizados num disco de 6 m de diâmetro, utilizando licor de lignina como ligante na concentração de 1,5%. As pelotas obtidas apresentaram diâmetros variando entre 9 a 20 mm e com boas características de resistência. Porém, a planta teve sérios problemas durante a secagem térmica das pelotas, as quais com teor de umidade abaixo de 1% sofriam combustão com relativa facilidade.

2.2.3 Briquetagem de finos de carvão

2.2.3.1 Definição e generalidades

A briquetagem pode ser definida como sendo um processo de compactação que visa a transformação de materiais particulados em aglomerados coerentes, com ajuda ou não de agentes ligantes.

O processo de briquetagem pode ser realizado em diferentes equipamentos. O mais utilizado na aglomeração de finos de carvão, entretanto, é o briquetador de rolos (vide figura 14).

Quanto aos objetivos de briquetagem de finos de carvão, BERKOWITZ (26) enumera os principais:

- utilização dos finos de carvão na forma de briquetes como combustível, mais fáceis de manusear e transportar;

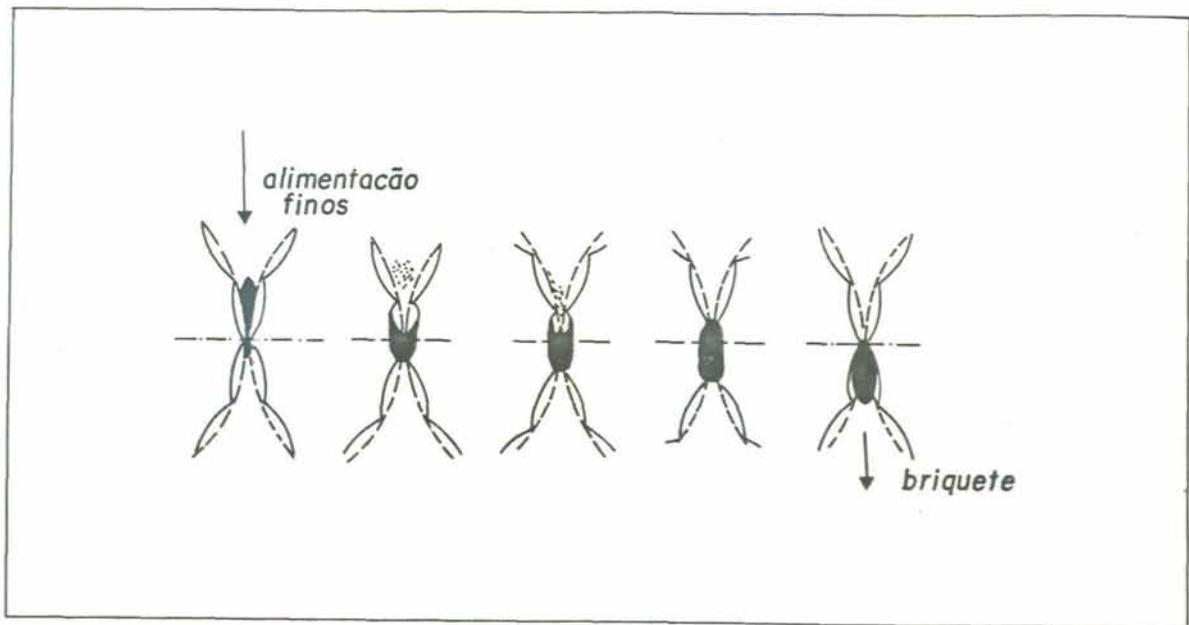


Figura 14 Representação esquemática da formação do briquete em briquetadores de duplos rolos (30).

- aumento do poder calorífico dos finos, pelo tratamento térmico após briquetagem de carvões imaturos;

- facilidades de estocagem dos briquetes, devido à diminuição da densidade "bulk" dos finos; e

- em relação ao produto briquetado deve satisfazer as seguintes características: qualidade uniforme, boas propriedades de combustão, ser denso e resistente a trabalhos mecânicos.

2.2.3.2 Tipos de briquetagem

A briquetagem pode ser realizada basicamente de três maneiras distintas: com ou sem adição de agentes ligantes a temperatura ambiente e briquetagem a quente.

2.2.3.2.1 Briquetagem sem ligante

Nos processos de briquetagem sem ligante, normalmente se faz necessária a aplicação de altas pressões para se obter briquetes de boa qualidade em termos de resistência mecânica (55).

Devido a este fato, as partículas do material são colocadas em íntimo contato, para criar áreas em comum aos grãos e minimizar os espaços vazios. Através desta operação, obtém-se um aumento nas forças superficiais de ligação entre as partículas, já que estas forças são proporcionais à área de contato entre as superfícies e são forças de curto alcance, do tipo van der Waals (58). A resistência das forças coesivas do aglomerado pode ser diretamente influenciada tanto pelo grau de compactação fornecido - via pressão aplicada -, como pela constante elástica do material (77).

Variáveis que controlam a Briquetagem sem ligante: Entre as variáveis que controlam a obtenção de aglomerados de carvão resistentes na briquetagem sem ligante, podemos mencionar: pressão e temperatura aplicadas, tempo de aplicação, granulometria e unidade de alimentação.

Como consequência da aplicação de altas pressões na briquetagem de finos sem ligante, observa-se concomitantemente o aumento da temperatura do material. Estas duas variáveis, pressão e temperatura, controlam por sua vez o grau de deformação das partículas sólidas (77).

Em relação ao tempo de aplicação da pressão, tem-se por definição que qualquer processo que envolve a deformação de um sólido, necessita de deslocamentos finitos tanto no espaço como no tempo. Pode-se observar que o grau de compactação oferecido a um dado material particulado, sob condições constantes de pressão e temperatura, poderá ser significativamente afetado pelo tempo de compactação (77). A princípio, quanto maior for o tempo de compactação da carga, maior será a resistência dos briquetes, porém, na prática, este período é governado fundamentalmente por fatores econômicos.

Quanto à distribuição granulométrica da alimentação, podemos dizer que a resistência dos briquetes é proporcional à densidade de empacotamento do material (26). Conseqüentemente, uma distribuição granulométrica ótima seria aquela distribuição em que se teria uma máxima densidade de empacotamento. É sabido que a presença de finos na alimentação permite obter uma maior densidade de empacotamento no briquete (78), e de acordo com BERKOWITZ (26) a adesão mútua entre partículas sólidas aumenta quando o tamanho das partículas diminui.

A distribuição granulométrica ótima para a briquetagem de finos sem ligante, denominada OPSC ("optimum particule size consist") por KOMARECK (29), deve ser constituída por uma mistura de partículas graúdas com suficiente quantidade de partículas finas, para preencher os interstícios entre os grãos, e, conseqüentemente, maximizar o efeito da compactação aplicada no material.

Na briquetagem de finos de carvão sem ligante, o conteúdo de umidade na alimentação é um fator importante. Quando é aplicada uma alta pressão externa no material, a água contida nos mi-

croporos é forçada a sair para a superfície das partículas. Uma vez aliviada a pressão aplicada, nem toda água expelida volta para o seu lugar, uma camada remanescente de líquido fica na superfície das partículas. A adsorção deste filme líquido influi no grau de compactação dos sólidos de três maneiras diferentes(26):

- reduz a energia livre superficial do sólido e, conseqüentemente, aumenta sua deformabilidade sob altas pressões;

- filmes líquidos adsorvidos podem atuar como lubrificantes, permitindo que as partículas tenham maior mobilidade e tenham uma maior e mais estável densidade de empacotamento;

- reforçam as forças coesivas entre sólido-sólido devido à presença de forças capilares.

No caso do carvão, a briquetagem sem ligantes dos finos depende fundamentalmente do seu "rank". Briquetes sem ligante podem ser obtidos com carvão que contém menos de 75% de carbono, base seca; porém, carvões com certo grau de maturidade necessitam da adição de um ligante adequado para produzirem briquetes resistentes (26). A variação da briquetabilidade sem ligante do carvão em função do seu "rank" está relacionado, principalmente, com as variações da constante elástica, do grau de hidrofobicidade e da dureza intrínseca do carvão, à medida que varia seu grau de maturidade (26).

2.2.3.2.2 Briquetagem com ligante

Na briquetagem com ligante de finos de carvão, obtém-se a coesão das partículas através da adição de um aglomerante externo, que cobre com um filme a maioria das partículas do carvão a ser compactado.

A eficiência da ligação entre as partículas depende fundamentalmente, da adesão do filme e conseqüentemente da tensão superficial entre os grãos do material e o ligante utilizado (55).

Neste tipo de briquetagem, a compactação e a deformação plástica das partículas são variáveis secundárias, já que as pressões utilizadas neste processo são até 10 vezes inferiores às sem ligante (26)(78). Por isso, a qualidade do briquete do carvão depende grandemente da escolha adequada do ligante.

Variáveis que controlam a briquetagem com ligante: Entre as variáveis que influem na obtenção de briquetes de carvão resistentes na briquetagem com ligante podemos citar: natureza do ligante utilizado, pressão aplicada e tempo de compactação, granulometria e umidade da alimentação.

Natureza do ligante utilizado: um ligante pode ser definido como uma substância através da qual se atinge uma compactação satisfatória, sob menor pressão aplicada, que a necessária correspondente à aglomeração sem ligante (29). A principal característica que um ligante deve apresentar é ter uma boa propriedade adesiva e uma certa viscosidade, permitindo uma maior distribuição entre as partículas, facilitando a obtenção de briquetes com melhores características de resistência mecânica (55).

No caso do carvão, o ligante a ser utilizado deve ter certas propriedades além das mencionadas acima, como por exemplo: ser barato, proporcionar aos briquetes boas características de resistência, não aumentar substancialmente os teores de cinza e enxofre e não diminuir o poder calorífico dos finos de carvão (25).

A literatura enumera uma ampla variedade de ligantes que podem ser utilizados na briquetagem de finos de carvão e classifica-os em quatro tipos principais (29)(17)(55):

Tipo matriz: os ligantes tipo matriz engastam as partículas de carvão numa estrutura mais ou menos contínua, reduzindo os espaços vazios na estrutura do aglomerado. Exemplo: briquetagem de finos de carvão com asfalto (78).

Tipo filme: estes ligantes normalmente são soluções ou dispersões, onde a água é o solvente mais frequente. Exemplo: briquetagem de carvão com géis de amido (45).

Tipo químico: nestes podem ocorrer reações químicas entre seus componentes ou entre o ligante e o material a ser compactado. Exemplo: briquetagem com cimento Portland e com bentonita(75).

Tipo lubrificante: estes ligantes têm a finalidade de reduzir o atrito entre as partículas facilitando sua compactação, o exemplo mais comum é a água (26).

Pressão aplicada: a pressão exercida e o tempo de compactação do material particulado devem ser de tal magnitude que proporcione aos briquetes de carvão obtidos boas características de resistência mecânica. No caso de briquetagem com ligante, a pressão aplicada é bem menor que na briquetagem sem ligante (26), justamente para evitar que um excesso de pressão propicie a saída do ligante para a superfície do aglomerado, comprometendo, desta forma, a resistência dos briquetes.

Granulometria da alimentação: a granulometria da alimentação tem uma influência acentuada neste tipo de briquetagem. Sabe-se que a presença de material fino até, um certo limite, na alimentação, aumenta a resistência dos briquetes obtidos, devido a uma melhor densidade de empacotamento no aglomerado (78). Contudo, isto implica na utilização de maior quantidade de ligante; por outro lado, verifica-se que a porosidade do material também influi na quantidade de ligante a ser empregado.

Umidade: se a presença de água na briquetagem sem ligante é benéfica, na briquetagem de finos de carvão com ligante é totalmente prejudicial. Isto ocorre, principalmente, porque a presença de água em quantidades apreciáveis reduz substancialmente a energia de adesão entre o ligante e as partículas sólidas de carvão, obtendo-se briquetes de pouca resistência mecânica (26).

Na briquetagem com ligante de finos de carvão, a umidade livre tem seu valor controlado; o teor ótimo de umidade depende do tamanho das partículas do carvão, do ligante utilizado e da temperatura na qual é realizada a mistura carvão-ligante (27). Normalmente procura-se a aglomeração por briquetagem de finos de carvão já secos devido a economicidade do processo.

2.2.3.2.3 Briquetagem a quente

A briquetagem a temperatura elevada é um tipo de briquetagem sem ligante, baseada nas propriedades plásticas de carvões aglomerantes que mantêm este comportamento em um certo intervalo de temperatura. Com o aumento da temperatura, o carvão torna-se progressivamente menos elástico e mais plástico, embora esta mudança não ocorra de forma regular. Numa faixa de temperatura em torno de 400°C a maioria dos carvões exibe uma marcada mudança na sua plasticidade, e é nessa região que a briquetagem a quente se torna praticável (78).

A aglomeração a quente de finos de carvão ocorre pelo fato de que as superfícies das partículas tornam-se fluídas e viscosas e, devido à compactação aplicada, aderem-se uma as outras.

Pelos motivos acima mencionados, a plasticidade do carvão é um fator muito importante na briquetagem a quente; e as condições operacionais do processo dependem da natureza do carvão, de sua plasticidade, do poder aglomerante e do teor de matéria volátil (78).

2.2.3.3 Caracterização dos briquetes de carvão

Tal como na pelotização, a briquetagem de finos de carvão tem como objetivo principal a obtenção de um produto aglomerado com adequadas características de resistência mecânica de modo a facilitar seu manuseio e transporte. Normalmente, após o processo de briquetagem, é comum ter-se uma etapa de endurecimento dos aglomerados, que poderá dar-se por uma simples secagem térmica,

ou mediante uma carbonização a altas temperaturas (27)(34)(79).

A caracterização dos briquetes de finos de carvão é realizada em termos das resistências mecânicas apresentadas nos aglomerados após os processos de prensagem e endurecimento - cura - dos mesmos. Estas propriedades nos aglomerados são determinadas por meio de ensaios, tais como: ensaio de resistência à compressão, ensaios de resistência ao impacto e abrasão e ensaio de resistência às condições ambientais.

Através da realização destes ensaios e a partir dos dados obtidos, poderemos prever qual será o comportamento dos aglomerados quando submetidos à ação de trabalhos mecânicos durante o transporte e o manuseio, principalmente.

Ensaio de resistência à compressão: Através de ensaios de compressão simples pode-se prever qual será o comportamento dos briquetes de carvão quando submetidos a trabalhos mecânicos de amassamento. O ensaio consiste em colocar-se o corpo de prova - briquete - entre duas placas paralelas e aplicar-se uma força de compressão até a ruptura do aglomerado. Este ensaio foi muito utilizado na caracterização mecânica dos briquetes de coque por VEECK (27) e por SILVA e colaboradores (79) nos briquetes obtidos a partir de misturas de finos de carvão com baixo e alto poder coqueificante. O índice de resistência à compressão pode ser calculado pela seguinte relação:

$$\sigma_{cs} = \frac{P}{A} \quad (7)$$

onde:

P = carga máxima de ruptura, kgf.

A = área da secção transversal da amostra, cm².

σ_{cs} = limite de resistência à compressão simples, kgf/cm².

No caso de aglomerados de finos de carvão com formato cilíndrico, ainda pode-se realizar o ensaio de tração simples.

Este ensaio consiste em colocar-se a amostra em posição horizontal entre duas placas paralelas, e aplicar-se uma carga até que se dê a ruptura, por brusca separação das duas metades do corpo de prova. A resistência à tração simples é calculada pela expressão (80):

$$\sigma_{ts} = \frac{2}{\pi} \times \frac{P}{DL} \quad (8)$$

onde:

P = carga máxima de ruptura aplicada, kgf.

D = diâmetro do corpo de prova, cm.

L = largura do corpo de prova, cm.

σ_{ts} = limite de resistência à tração simples, kgf/cm².

Um novo método se sugere na determinação dessas resistências em briquetes de finos de carvão, visto que, os ensaios utilizados até agora, são ensaios destrutivos, ou seja, não há como recuperar o corpo de prova testado; e com este novo método se obteriam resultados mais precisos. Este método, desenvolvido por KOERNER (81), consiste na determinação das emissões acústicas do corpo de prova, baseando-se no fato do aglomerado emitir este fenômeno próximo à carga de ruptura.

Ensaio de tombamento: Este teste é realizado para medir a resistência ao impacto dos briquetes de finos de carvão. O ensaio consiste em deixar cair os briquete, individualmente, desde uma altura de 5 metros, e registrar-se o número de quedas que o aglomerado agüenta até se desintegrar. O ensaio simula as forças de impacto a que o briquete estará sujeito como decorrência das sucessivas transferências de material durante o transporte (27).

Ensaio de tamboreamento: O uso de ensaios de tamboreamento, para avaliação da resistência dos briquetes de finos de carvão, foi desenvolvido nos últimos anos, visto que, são mais fáceis do que os de compressão, e por representarem melhor o comportamento dos aglomerados durante o manuseio, já que este ensaio mede a coesão superficial entre as partículas. O ensaio consiste em colocar uma amostra de briquetes de carvão dentro de um tambor, e após certo período de tamboreamento, todo o material é peneirado. Através do material remanescente na peneira, calcula-se o índice de resistência à abrasão (67).

Ensaio de resistência à intempérie: Este ensaio trata de simular qual seria a resistência remanescente do briquete, quando exposto a condições de chuva e sol por tempo determinado; como por exemplo, numa pilha de estocagem (67). Para aumentar a resistência à penetração d'água nos briquetes, é comum utilizar-se ligantes a prova de água durante sua compactação.

2.2.3.4 Aspectos operacionais e aplicações da briquetagem

Na briquetagem de finos de carvão, além dos fatores que afetam a resistência dos briquetes, anteriormente mencionados, as variáveis operacionais do processo controlam grandemente estas resistências.

A principal variável operacional envolvida refere-se ao formato do briquete, visto que este facilitará a saída do aglomerado dos moldes uma vez aliviada a carga de compressão aplicada, comprometendo ou não, desta maneira, a resistência mecânica do aglomerado obtido (30). É por isso que na briquetagem de finos de carvão por meio de briquetadores de rolos, as cavidades - moldes -, nas superfícies dos mesmos, devem estar distribuídas de tal modo a facilitar esta operação.

A figura 15 apresenta os formatos típicos de briquetagem obtidos a partir de finos de carvão.

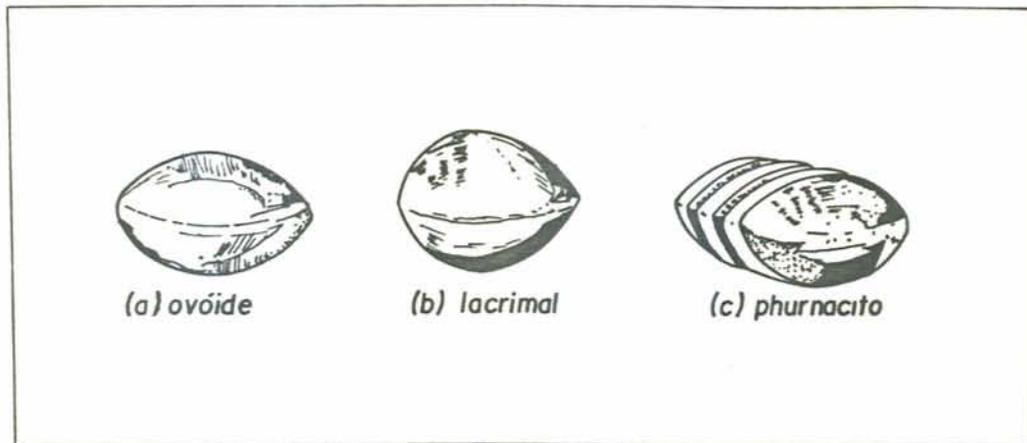


Figura 15 Formas mais comuns de briquetes de finos de carvão (78).

O processo de briquetagem sem ligante, envolve, normalmente, a aplicação de altas pressões na compactação dos finos. Por isso, o desgaste nas cavidades dos rolos é muito grande, devido à alta abrasividade causada pelo material (78). Este processo de compactação é recomendável quando se quer compactar um material sem ser contaminado por outro.

Quanto à aplicação da briquetagem de finos de carvão sem ligante, o linhito é o carvão mais facilmente briquetado por este processo, e, em geral, seus briquetes possuem alta resistência inicial, e não necessitam ser tratados em processos de endurecimento posterior (27). Por outro lado, RHYS JONES (78) enumera os principais processos que têm sido desenvolvidos nesta área, porém, com exceção do Processo Sutcliffe, nenhum dos outros é economicamente viável. O Processo Sutcliffe é utilizado na fabricação de briquetes de carvão puro, os quais são posteriormente carbonizados visando à obtenção de briquetes de carvão ativado (78).

Uma outra alternativa sugerida por MILLER e colaboradores (82) para briquetar finos de carvão sem ligante externos (e com baixa pressão de moldagem) consiste na adição de um solvente volátil que extrai do próprio carvão substâncias que atuarão posteriormente como ligantes na hora da prensagem.

Nos processos de briquetagem com ligante as pressões envolvidas são baixas, conseqüentemente o desgaste dos moldes na superfície dos rolos é menor. São diversos os ligantes utilizados na briquetagem de finos de carvão; entre os principais cabe mencionar: piche, betume, ligantes de licor sulfito, resinas fenólicas, amidos e outros (27). Em relação à aplicação deste processo a finos de carvão, FIELDNER e colaboradores (83) estudaram a briquetagem de finos visando à obtenção de aglomerados de carvão ativado. Os melhores resultados foram obtidos utilizando alcatrão de carvão como ligante na concentração de 25-40% (em peso) e uma temperatura de carbonização dos briquetes em torno de 900°C.

Nos estudos de briquetagem de finos de carvão com ligante

realizados por SILVA e outros (79), para a obtenção de um combustível metalúrgico; utilizaram como ligantes: alcatrão bruto, alcatrão para aciaria e piche. Os briquetes com melhores características de resistência foram obtidos usando alcatrão bruto numa concentração de 6%.

CONKLE (75), por sua vez, estudou a briquetagem de finos de carvão betuminoso com elevado teor de enxofre, para serem utilizados como combustível industrial. Os melhores resultados foram obtidos com o ligante resíduo da destilação do óleo de soja (5% em peso), ao qual foi adicionada cal hidratada na proporção: Ca/S = 2,8 (S é o teor de enxofre dos finos na alimentação). A pressão de moldagem aplicava variava entre 280 e 2.000 kgf/cm²; o objetivo da adição da cal hidratada visava diminuir as emissões de enxofre da carga, quando da combustão dos briquetes.

Outra aplicação da briquetagem de finos de carvão com ligante é apresentada por SCHINZEL (52) na obtenção do "EXTRAZIT". Neste processo, os finos de antracito são misturados com lixívia de sulfito de amônia como ligante. Através de determinadas condições como temperatura e umidade constante dos finos, o qual é conseguido com o uso de leito fluidizado, e com um controle da desvaporização da mistura, são obtidos briquetes de carvão com altas características de resistência mecânica. O tratamento térmico dos briquetes se dá a 250°C, os quais são, posteriormente, tratados superficialmente visando protegê-los contra a penetração da água, principalmente.

Uma outra aplicação da briquetagem seria a produção de coque pré-moldado para agir como redutor na siderurgia de alto forno. A briquetagem parcial de carvões para coqueificação melhora a qualidade do coque e facilita a utilização de carvões fracamente coqueificáveis ou não coqueificáveis em forma de briquetes como complemento da carga a ser coqueificada (79). Existe um grande número de processos de fabricação de coque pré-moldado; na Tabela VI estão apresentados os mais importantes.

TABELA VI PRINCIPAIS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE COQUE MOLDADO (27) (52)

PROCESSOS	PROPRIEDADE INDUSTRIAL	ESTÁGIOS DO PROCESSO			USINAS
		PRÉ TRATAMENTO	BRIQUETAGEM	PÓS TRATAMENTO	
BRIQUETAGEM TRADICIONAL DKS	DIDIER, ENG.G.M.B.H. KEIHAN RENTAN KONYOCO LTD. SUMITOMO METAL IND. LTD.	Pré Aquecimento (eventual)	Briquetagem com breu de alcatrão	Coqueificação em forno de câmaras	Osaka Wakayma
H B N	MOUILLÈRES DU BASSIN DU NORD ET DU PAS - DE CALAIS.	Oxidação(eventual) ou Coqueificação incompleta.	Briquetagem com breu de alcatrão	Coqueificação	Drocourt
F M C	F M C CORP.	Oxidação, coqueificação incompleta, coqueificação em leito fluidizado.	Briquetagem com breu de alcatrão	Oxidação em forno contínuo, coqueificação em forno de câmaras.	Kemmerer
AUSCOKE	THE BROKEN HILL PROPRIETARY COMP. LTD.		Briquetagem com breu de alcatrão	Coqueificação incompleta em forno de areia, coqueificação em forno de câmaras.	Port Kembla
BRIQUETAGEM A ALTA TEMPERATURAS ANCIT	ESCHWEILER BERGWERKSVEREIN	Coqueificação incompleta em reator de leito fluidizado.	Briquetagem a altas temperaturas com carvão coqueificável.	Coqueificação incompleta auto-térmica.	Alsdorf
B F L	BERGAU FORSCHUNG GMBH LURGI, GMBH	Coqueificação incompleta em leito fluidizado.	Briquetagem a altas temperaturas com carvão coqueificável.	Coqueificação incompleta para reduzir matéria volátil (eventual).	Prosper Sunthorpe

PROCESSOS	PROPRIEDADE INDUSTRIAL	ESTÁGIOS DO PROCESSO			U S I N A S
		PRÉ TRATAMENTO	BRIQUETAGEM	PÓS TRATAMENTO	
SAPOZNIKOV ^v	GIPROKOKS	Coqueificação incompleta em leito fluidizado.	Briquetagem a altas temperaturas.	Coqueificação em fornos de câmaras verticais.	Charkow

Na briquetagem a quente mistura-se normalmente um material inerte (como, por exemplo, um carvão não coqueificável ou semi-coque) com um carvão coqueificável. A relação de mistura e as temperaturas devem ser reguladas, de tal modo que a temperatura de mistura deve estar na zona de amolecimento do carvão coqueificável, que tem a função de ligante (79). No caso de um carvão fracamente coqueificável o alcatrão obtido no próprio processo deve ser recirculado no mesmo e os briquetes produzidos devem ser aquecidos até 600°C , visando recuperar o resto do alcatrão contido nesses briquetes (52).

Dos processos mencionados por RHYS JONES (78) para briquetagem de finos de carvão a altas temperaturas, nenhum deles foi reportado como sendo economicamente viável, isto, provavelmente, devido ao alto consumo de energia envolvido, e por outro lado, em função de uma certa dificuldade no controle do aquecimento dos finos de carvão.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

3.1.1 Finos de carvão

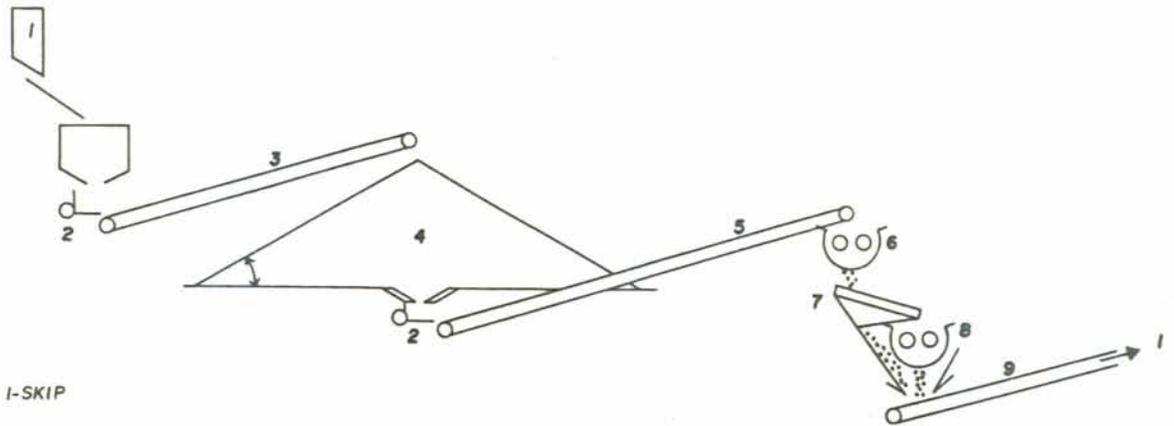
Os finos de carvão utilizados no presente estudo são produtos do circuito de beneficiamento do lavador da mina de Leão I da CRM (vide figura 16). Estes finos são codificados como CE 4700 e CE 5900 cujos números correspondem aos respectivos poderes caloríficos expressados em kcal/kg.

Amostragem do carvão: A amostragem dos finos de carvão foi realizada segundo o roteiro seguido pela CRM, da seguinte maneira:

Durante a operação de um turno de 8 horas, que antecedia o horário de expedição da amostra, foram coletados aproximadamente 20 kg de finos de carvão em intervalos de 10 minutos. Destes, cerca de 8 kg foram utilizados para os ensaios de aglomeração, e o restante da coleta ficou nos laboratórios da usina de beneficiamento da CRM, para análise de cinza, umidade total e ensaio granulométrico completo. Tal procedimento foi adotado para os dois tipos de carvão fino ciclonado, CE 4700 e CE 5900 separadamente.

O material recebido foi quarteado sucessivamente até a obtenção de amostras representativas de aproximadamente 0,5 kg. Após o quarteamento, os finos de carvão foram guardados em sacos plásticos com o objetivo de evitar uma possível oxidação parcial do carvão e a perda de umidade original com que saem da usina de beneficiamento.

As principais características dos finos em termos de análise



1-SKIP

2-ALIMENTADOR

3-TC 1

4-CARVÃO ROM 20''x0

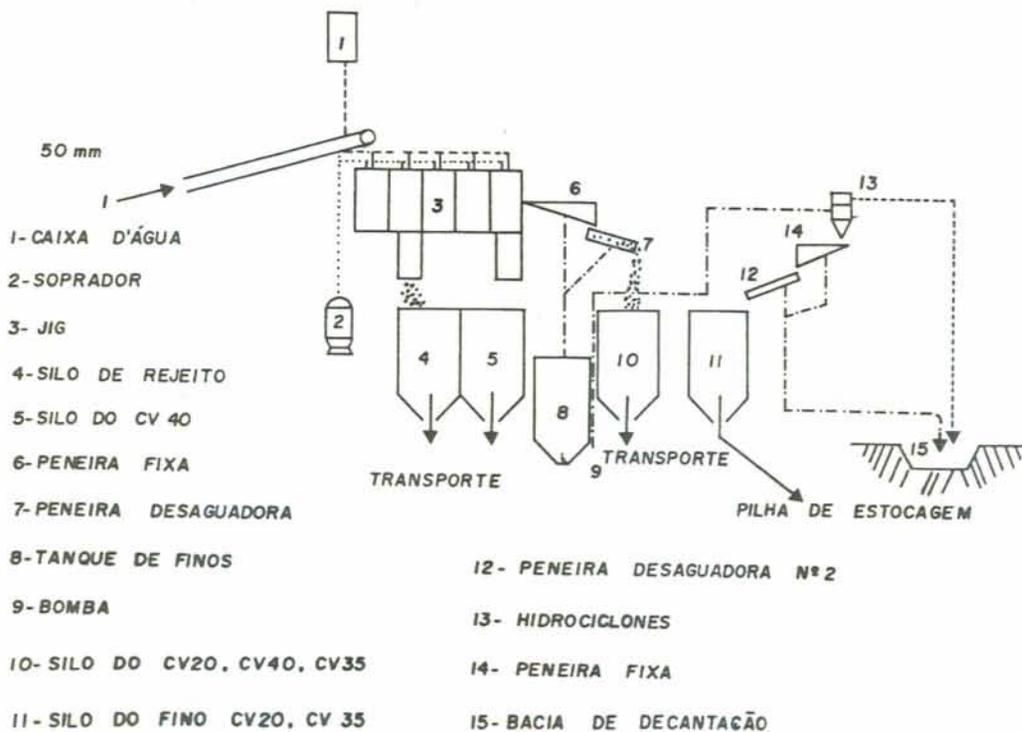
5-TC 2

6-BRITADOR N°1

7- PENEIRA VIBRATÓRIA

8- BRITADOR N°2

9- TC3 (2''x0)



1-CAIXA D'ÁGUA

2-SOPRADOR

3- JIG

4-SILO DE REJEITO

5-SILO DO CV 40

6-PENEIRA FIXA

7-PENEIRA DESAGUADORA

8-TANQUE DE FINOS

9-BOMBA

10-SILO DO CV20, CV40, CV35

11-SILO DO FINO CV20, CV 35

12- PENEIRA DESAGUADORA N°2

13- HIDROCICLONES

14- PENEIRA FIXA

15- BACIA DE DECANTAÇÃO

Figura 16 Planta de beneficiamento de carvão da Mina de Leão I (15).

se imediata, densidade e análise granulométrica foram as seguintes.

	Carvão CE 4700	Carvão CE 5900
Teor de cinzas	(24,11 \pm 2,56)%	(20,16 \pm 0,86)%
Umidade total	(21,75 \pm 3,51)%	(24,05 \pm 1,81)%
Densidade	(1,32 \pm 0,07)g/cm ³	(1,38 \pm 0,09)g/cm ³

A análise granulométrica dos finos está representada nas Tabelas VII e VIII para os carvões CE 4700 e CE 5900, respectivamente.

TABELA VII ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS FINOS DO CARVÃO
CE 4700

FAIXA GRANULOMÉTRICA mm	MASSA DA FRAÇÃO g	RETIDO SIMPLES %	RETIDO ACUMULADO %
2,83 x 1,00	4,963	39,45	39,45
1,00 x 0,50	6,023	47,87	87,32
0,50 x 0,250	1,018	8,09	95,41
0,250 x 0,149	0,281	2,23	97,64
0,149 x 0,105	0,187	1,49	99,13
0,105 x 0,074	0,064	0,51	99,64
0,074 x 0,000	0,045	0,36	100,00
T O T A L	12,581	100,00	-

TABELA VIII ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS FINOS DO CARVÃO
CE 5900

FAIXA GRANULOMÉTRICA mm	MASSA DA FRAÇÃO g	RETIDO SIMPLES %	RETIDO ACUMULADO %
2,83 x 1,00	2,738	22,67	22,67
1,00 x 0,50	4,051	33,55	56,22
0,50 x 0,250	2,703	22,38	78,60
0,250 x 0,149	1,396	11,56	90,16
0,149 x 0,105	0,597	4,94	95,10
0,105 x 0,074	0,292	2,42	97,52
0,074 x 0,000	0,299	2,48	100,00
T O T A L	12,076	100,00	-

O diâmetro médio dos finos, obtidos a partir da equação de Rosin-Rammler-Bennett (84) fornece os seguintes valores aproximados: 1,30 mm para o carvão CE 4700 e 0,85 mm para o CE 5900 (vide figura 17).

3.1.2 Ligantes empregados

Vários ligantes foram testados com o objetivo de verificar qual deles fornecia ao aglomerado de carvão as melhores qualidades de resistência mecânica.

Amido de milho: O amido de milho utilizado - Collamil -, é um produto comercial da Refinações de Milho, Brasil Ltda., e segundo seus fabricantes apresenta as seguintes características(85):

Umidade	13,5%
Granulometria	
menor que 200 malhas	98,0%
Densidade Bulk	500 g/l
pH (solução a 10%)	5,0
Peso molecular médio	343.000

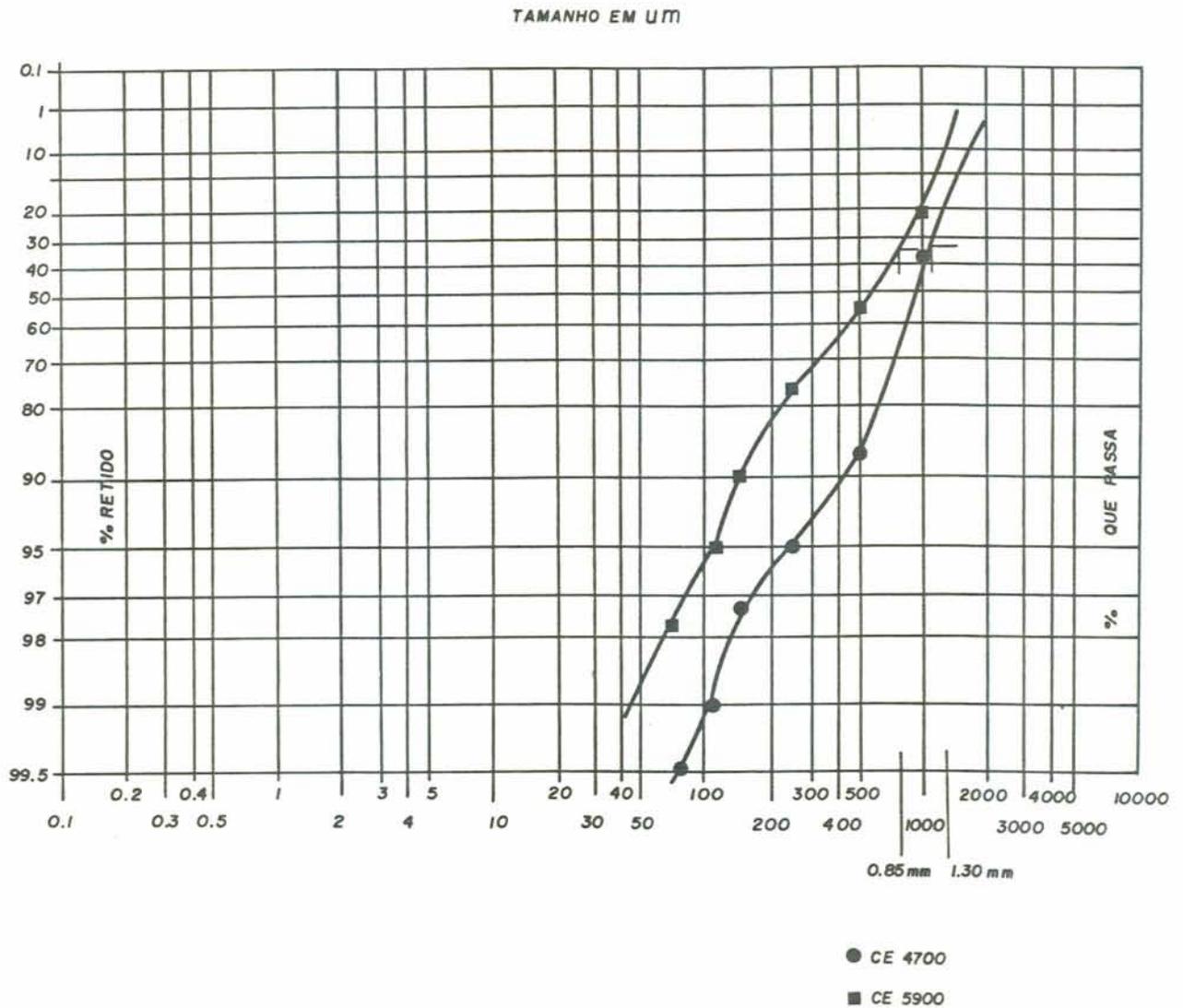


Figura 17 Distribuição granulométrica tipo Rosin-Rammler das amostras de finos de carvão de Leão.

Mogul: O mogul é um amido de milho pré-gelatinizado fabricado pela Refinações de Milho, Brasil Ltda. A propriedade mais notável do mogul é a sua capacidade de absorver grandes quantidades de água à temperatura ambiente, formando um gel. As principais características do mogul são:

Granulometria	
menor que 100 malhas	100,0%
Densidade Bulk	350 - 600 g/l
Absorção de água	3 - 11 ml/g
Proteínas	7 - 10%
Solúveis	40 - 50%
Peso molecular médio	150.000

Alcatrão bruto: O alcatrão utilizado nos testes de aglomeração é um sub-produto da Companhia Riograndense de Nitrogenados. Este sub-produto apresenta as seguintes características:

Densidade 20-40°C	1,086
Poder calorífico superior b.s.	8965 cal/g
Poder calorífico inferior b.s.	8579 cal/g
Poder de fluidez	19°C
pH	5,7
Viscosidade Say-bolt-Furol	
a 65°C	568,40
Teor de enxofre	0,38%

Resíduo de refinação de petróleo: A amostra de REVAC (resíduo de vácuo) utilizada foi fornecida pela Refinaria Alberto Pasqualini de Canoas, com as seguintes características:

Densidade 4-20°C	1,0339
Viscosidade Say bolt	
Furol a 135°C	275,00

Outros ligantes utilizados nos ensaios de aglomeração, sem qualquer resultados positivos foram: licor negro (resíduo da indústria de papel), lignosulfonato produzido pela MELBAR - São Pau

lo e melaço de cana-de-açúcar.

3.2 Metodologia utilizada

3.2.1 Estudos de pelotização

Equipamentos utilizados: na realização dos ensaios de pelotização de finos de carvão, foram utilizados basicamente dois equipamentos: o disco e o tambor pelotizador.

Disco pelotizador: o disco utilizado nos ensaios de pelotização está representado de forma esquemática na figura 18. Previamente à pelotização dos finos de carvão, a superfície interna do disco foi cromada, visando protegê-la do desgaste que as partículas sólidas causariam. O uso dos raspadores se fez necessário para ajudar na formação do regime de cascata e evitar que parte do material aderisse às paredes do disco.

Por meio do eixo de inclinações, localizando no chassi do disco, pode-se variar a inclinação do equipamento a valores entre 35 e 65°. A variação da velocidade de rotação do disco é realizada através de um sistema redutor de três posições de correia, fornecendo velocidades de rotação de 19, 35 e 65 RPM.

Tambor pelotizador: o tambor utilizado nos testes de aglomeração está representado na figura 19.

Na superfície interna do equipamento - de aço inox - estão distribuídos de forma simétrica uma série de "baffles", que junto com o raspador acoplado, ajudam na formação do regime de cascata e evitam a aderência do material nas paredes do tambor.

A variação da velocidade de rotação do tambor é realizada através de um variavolt, que fornece valores de rotação, variando desde 0 a 240 RPM.

Amostras de 400 g de carvão úmido foram misturadas - manual

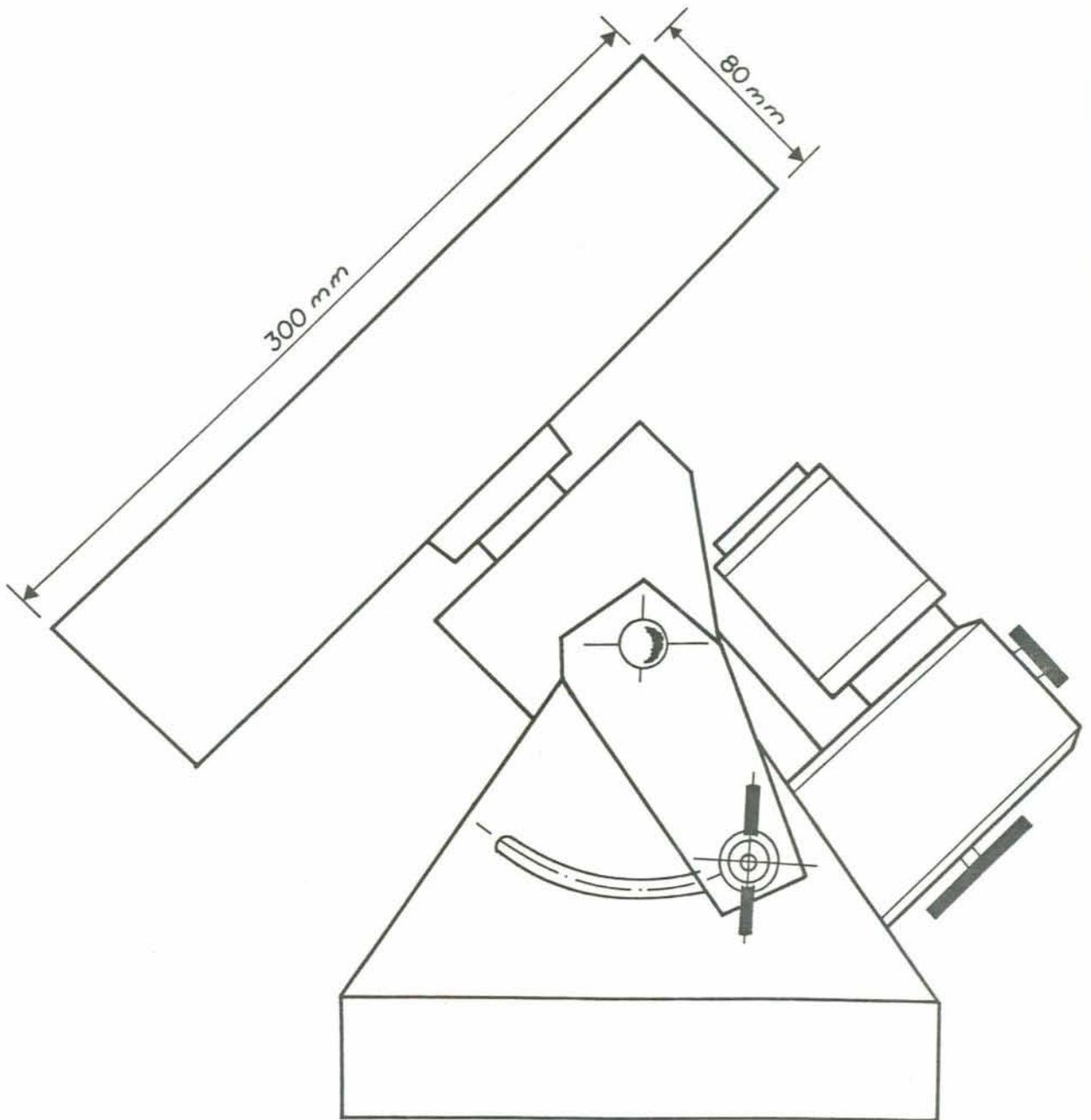


Figura 18 Representação esquemática do disco utilizado nos ensaios de pelotização.

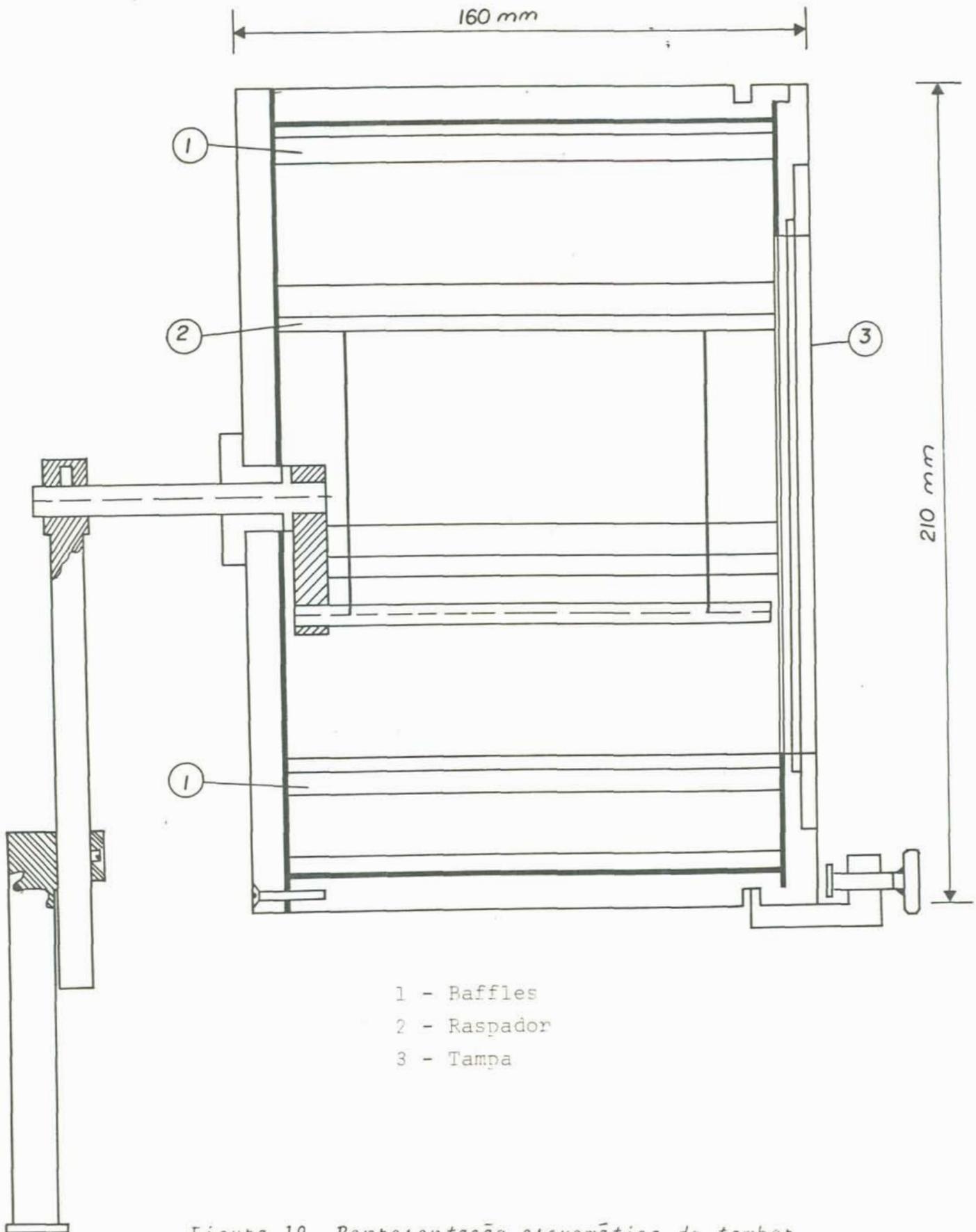


Figura 19 Representação esquemática do tambor utilizado nos ensaios de pelotização.

ou mecanicamente - com o ligante na concentração desejada durante aproximadamente 10 minutos. Ao fim do período de mistura, todo o material foi peneirado, 12 malhas, para se obter uma alimentação o mais homogênea possível. Posteriormente, a alimentação foi colocada dentro do disco ou dentro do tambor anteriormente descritos.

Após diversos testes preliminares foram estabelecidas as seguintes condições operacionais:

- pelotização em disco:

tempo de pelotização: 10-30 minutos; rotação do disco: 35 RPM; inclinação do equipamento: $45-51^{\circ}$; umidade dos finos: livre natural. Outros parâmetros estudados foram tipo e a concentração de agente ligante utilizado.

- pelotização por tamboreamento:

tempo de pelotização: 10-30 minutos; rotação do tambor: 42 RPM; umidade dos finos: livre natural. Outros parâmetros verificados neste estudo foram o tipo e a concentração de agente ligante.

3.2.2 Estudos de briquetagem

Equipamento utilizado: nos ensaios de briquetagem de finos de carvão, foi utilizada uma prensa hidráulica manual, cujo princípio de funcionamento está representado na figura 20. A magnitude da pressão de compactação aplicada é lida diretamente no manômetro acoplado na base da prensa. Este manômetro tem uma escala de leitura variando desde 0 até 1000 kgf/cm^2 . O cilindro de moldagem utilizado foi um sistema constituído por uma matriz e um punção, os quais estão representados na figura 21.

Os finos de carvão com a granulometria original são misturados com o ligante na concentração desejada e, logo após, são in

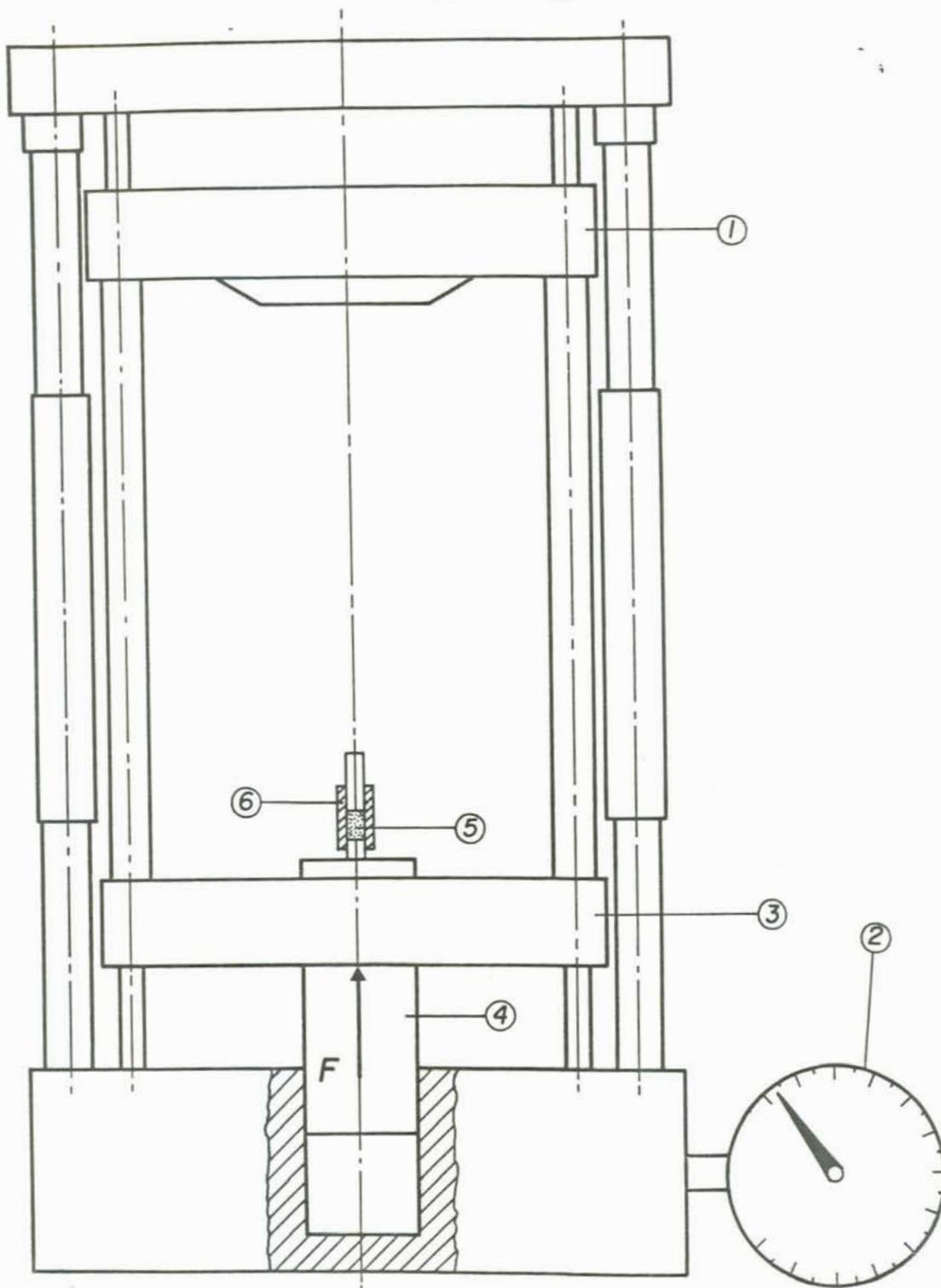


Figura 20 Representação esquemática da prensa hidráulica manual. 1. Placa superior; 2 - Manômetro; 3 - Placa inferior; 4 - Cilindro; 5 - Corpo de prova; 6 - Matriz de moldagem.

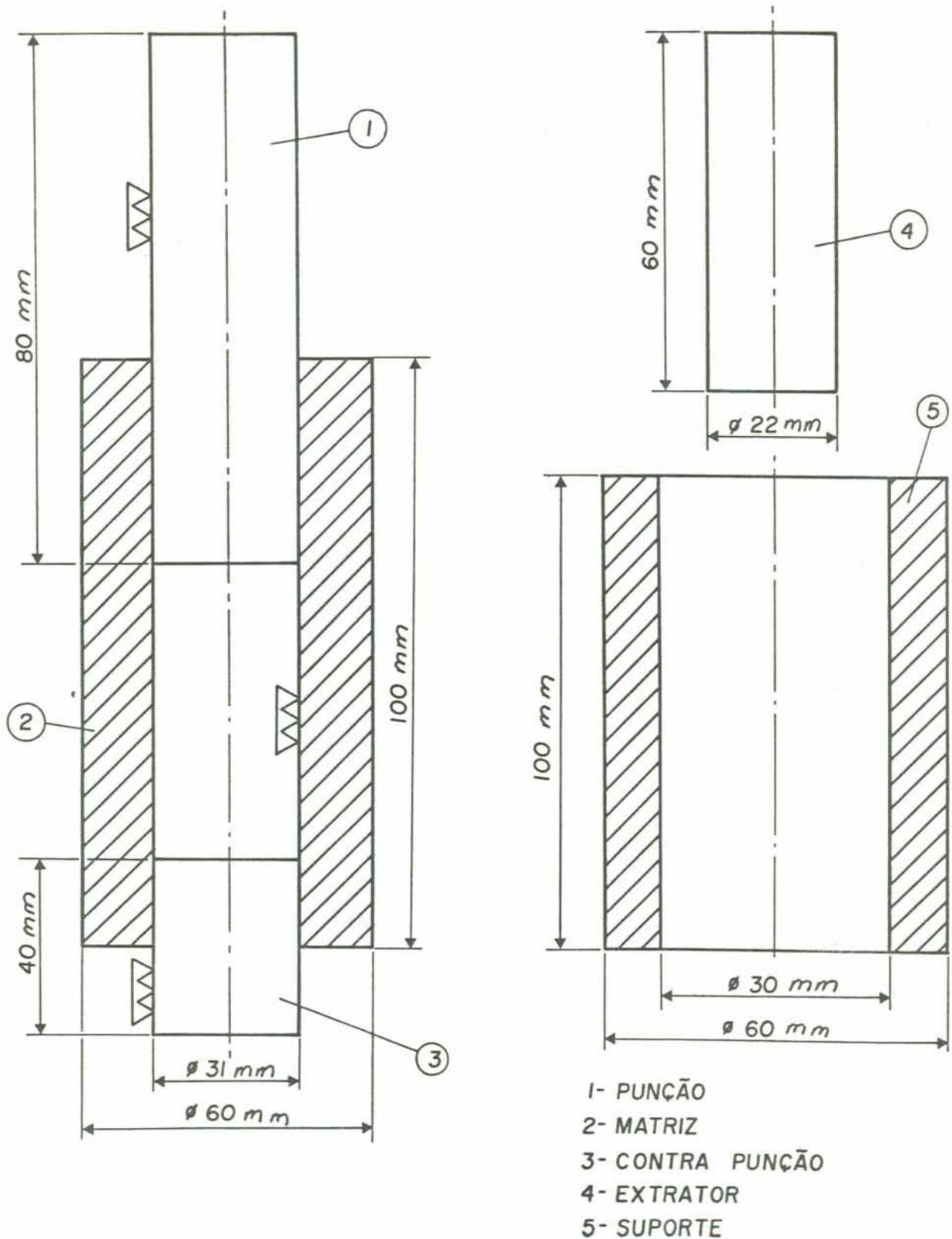


Figura 21 Sistema matriz-punção, utilizados nos ensaios de briquetagem.

roduzidos na matriz de moldagem para posterior compactação.

Os briquetes obtidos são de forma cilíndrica com as seguintes dimensões: diâmetro $(3,25 \pm 0,10)$ cm e altura $(2,10 \pm 0,10)$ cm.

Posterior aos testes preliminares, foram estabelecidas as seguintes condições operacionais:

umidade dos finos: umidade livre natural e finos de carvão seco; peso da amostra: 10-40 gramas de carvão; pressão de moldagem: $100-400 \text{ kgf/cm}^2$ e tempo de moldagem 0,5-10 minutos. As principais variáveis estudadas foram o tipo e concentração de agente ligante utilizado.

Após o processo de aglomeração dos finos de carvão os produtos obtidos foram levados a uma secagem térmica posterior.

A secagem térmica foi realizada, colocando-se o produto aglomerado dentro de uma estufa a uma determinada temperatura. O objetivo principal da cura visava à obtenção de aglomerados de carvão com ligantes mais resistentes e a diminuição do conteúdo de umidade final no aglomerado.

3.2.3 Análise das qualidades dos aglomerados de carvão

Equipamentos utilizados: nos estudos de verificação das qualidades mecânicas dos aglomerados de carvão, foram utilizadas 2 (duas) máquinas de ensaios. A primeira é uma prensa manual para ensaios de tração e compressão simples, fabricada pela SOLOTEST-São Paulo, modelo S-09. A leitura do relógio comparador, acoplado a um anel dinamométrico de carga variável, é levada à sua curva de calibração, onde é lido o valor da carga de ruptura correspondente aplicada.

Nos ensaios de tração e compressão simples, utilizou-se um anel dinamométrico de carga máxima de 5000 kgf e um relógio com-

parador com as seguintes características: marca: Mitutoyo; número: 785.154; capacidade máxima: 5 mm; subdivisão: 0,001 mm. A curva de calibração utilizada está dada pela seguinte relação:

$$P = \text{Div.}/0,6601 \quad (9)$$

onde:

P = carga máxima de ruptura aplicada, kgf.

Div. = número de divisões lidos no relógio comparador, mm.

A segunda máquina utilizada é uma máquina universal para ensaios de tração e compressão simples, marca TIW - modelo ZMGi-500, fabricada pela VEB Thörringer Industriewerk, Alemanha. Na parte inferior da máquina está montada uma engrenagem que, através da alavanca comutadora, pode ser comutada ao acionamento de volante manual ou acionamento de motor elétrico. Com a manifestação de cargas aplicada, a alavanca de força sofre, através do momento de peso crescente, um certo desvio para a esquerda. A carga de ruptura aplicada correspondente a este desvio é indicada num relógio medidor de força, por meio de um ponteiro e de um ponteiro do valor de crista.

Para que se torne possível medir com maior precisão possível, tanto forças pequenas como também maiores, estão previstos vários campos de medição da força. O ajustamento dos campos de medição é feito através da colocação de pesos sobre o pino da alavanca de força. Estes pesos estão marcados com letras que correspondem aos campos de medição segundo o letreiro no mostrador do relógio medidor de força.

Quanto às qualidades das pelotas de carvão, estas foram caracterizadas em termos de sua distribuição de tamanhos, resistência ao impacto, abrasão e resistência à compressão.

Em relação so briquetes, eles foram caracterizados quanto à

resistência à compressão e à tensão simples.

Distribuição de tamanhos: a verificação da distribuição dos diâmetros das pelotas de carvão foi realizada selecionando-se aleatoriamente uma média de 10 a 20 pelotas por testes. Cada pelota foi medida (através de um paquímetro) e pesada individualmente. O diâmetro médio - GWMD - para o lote de pelotas de carvão testado foi calculado mediante o emprego da expressão nº 4 (anteriormente descrita no item 2.2.2.2).

Resistência ao impacto (R_i): esta resistência foi determinada deixando-se cair a pelota desde uma altura de 45 cm sobre uma placa de metal e registrando-se o número de quedas que cada pelota pode resistir sem sofrer qualquer fratura. Cada teste foi feito com 10 pelotas e a média dos valores obtidos indica o índice de resistência ao impacto da amostra.

Resistência à abrasão (R_a): as medidas desta resistência foram obtidas, pesando aproximadamente 100 g de pelotas curadas e devolvidas ao tambor de pelotização - sem raspador -, durante 5 minutos com uma rotação de 42 RPM. Ao final deste tempo, todo o material contido no tambor foi passado numa peneira de 12 malhas durante 1 minuto. O índice de resistência à abrasão da amostra foi determinado pela equação nº 6, descrita anteriormente no item 2.2.2.2.

Resistência à compressão: as medidas da carga de ruptura da compressão nas pelotas foram realizadas empregando-se a máquina universal de ensaios TIW-VEB anteriormente descrita. O índice de resistência a compressão - L_f - foi determinado pela equação nº 5, descrita no item 2.2.2.2, tomando-se uma média de 20 pelotas para cada ensaio de compressão.

Os ensaios de compressão e de tensão simples nos briquetes foram realizados conforme roteiro já mencionado na referência bibliográfica (item 2.2.3.3) e utilizando-se as máquinas de ensaios descritas. Os índices de resistência à compressão e à tensão sim

ples foram calculados a partir das expressões nº 7 e nº 8, respectivamente, descritas anteriormente no item 2.2.3.3.

Na análise dos resultados foi calculado um desvio em relação à média dos valores obtidos, o qual é expresso em termos de desvio padrão para cada análise estudada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estudos de pelotização em disco

Nos ensaios de pelotização em disco foram testados dois tipos de agentes ligantes: alcatrão bruto e amido de milho em pó. As variáveis estudadas nos ensaios foram: o ângulo de inclinação do disco, a concentração de agente ligante e o teor de umidade na alimentação.

A Tabela IX apresenta os resultados obtidos na pelotização de finos utilizando amido de milho como agente ligante. Esta tabela mostra as variações na inclinação do disco, tanto quanto ao rendimento no material pelotizado, quanto às características mecânicas dos aglomerados.

TABELA IX PELOTIZAÇÃO DE FINOS DE CARVÃO EM DISCO UTILIZANDO AMIDO DE MILHO COMO LIGANTE.

TEMPO DE PELOTIZAÇÃO min	CONCENTRAÇÃO DE AMIDO (% em peso)	INCLINAÇÃO DO DISCO graus	MASSA PELOTIZADA %	Ri %	Ra %
5	1,5	45	60,04	27,5	38,2
5	5	45	71,2	32,0	83,5
5	5	51	44,3	79,0	88,0
5	10	45	75,0	74,5	92,0
5	10	51	52,9	96,0	97,0
10	5	51	48,0	63,0	95,1
10	10	51	64,5	92,0	95,6

De modo geral, e segundo o esperado, a percentagem de material pelotizado e os índices de resistência mecânica dos aglomerados aumentam com a concentração de agente ligante adicionado,

dentro de um determinado intervalo. Para altas concentrações, o ligante adicionado diminuirá estas resistências devido ao aumento do número de possíveis pontos de fratura decorrentes do aumento da fração em volume deste ligante. Este fenômeno já foi reportado por SASTRY e MEHROTRA (28) e neste trabalho também foi observado nos testes de pelotização por tamboreamento e na briquetagem.

Para ângulos de inclinação menores que 51° a quantidade de massa pelotizada aumenta consideravelmente, porém, os índices de resistência mecânica das pelotas diminuem. Isto ocorre, principalmente, devido ao tempo de residência das pelotas dentro do equipamento (31). Assim, devido à diminuição na inclinação do disco, o tempo de residência das pelotas também diminui; e as pelotas que estão se formando têm menor chance de serem compactadas pelo peso das outras pelotas, prejudicando, desta maneira, as ligações entre as partículas; isto explica o porquê da pouca resistência mecânica que elas apresentam.

O outro fato observado, refere-se ao aumento da quantidade de massa pelotizada com a diminuição na inclinação do disco. O aumento da quantidade de massa aglomerada deve estar relacionada com a diminuição do tempo de residência das pelotas, já que um maior número de pelotas consegue deixar o equipamento num tempo menor de pelotização, porém, o diâmetro final apresentado pelas pelotas é sensivelmente prejudicado por este fenômeno.

A influência do teor de umidade da alimentação na pelotização dos finos está representada na Tabela X.

TABELA X INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE NA PELOTIZAÇÃO DE FINOS. AMIDO ADICIONADO 10% (EM PESO); CURA DAS PELOTAS $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ DURANTE 1 HORA.

TEOR DE UMIDADE % em peso	MASSA PELOTIZADA %	Ra %	L_f kgf/g
25	54,3	-	-
30	96,1	93,0	7,45
40	98,2	95,3	9,59
50	-	-	-

O teor de umidade na alimentação é uma variável fundamental na pelletização de finos de carvão, já que esta controla significativamente, por um lado, a taxa de crescimento das pelotas, e também a quantidade de material pelletizado (64). Assim, nos estudos de pelletização realizados, a faixa ótima de umidade na alimentação dos finos de carvão situa-se entre 30-40% (em peso em relação à massa de carvão seco). Ao aumentarmos o teor de umidade na alimentação, a quantidade de massa pelletizada aumenta, bem como, os índices de resistência das pelotas. Isto ocorre, devido provavelmente a uma maior eficiência nas ligações entre as partículas decorrentes das forças capilares e aos mecanismos de coalescência, ajudados pela presença do agente ligante adicionado(24). Para teores menores de umidade da ordem de 25% na alimentação, as pelotas obtidas apresentaram um diâmetro médio muito pequeno - da ordem de 5 mm - dificultando a realização dos ensaios de resistência. Já com 50% de umidade, não houve uma boa pelletização, resultando o produto aglomerado numa massa pastosa amorfa de baixa resistência ao manuseio, isto evidentemente está associado ao excesso de água presente no sistema, dificultando as ligações entre as partículas de carvão.

Nos ensaios de pelletização utilizando-se alcatrão como ligante (5% em peso), não foi possível pelletizar o carvão CE 4700, observando-se ainda que, durante a realização do ensaio ocorria

o fenômeno de dessecção da água contida nas partículas de carvão, pelo alcatrão adicionado. No caso do carvão CE 5900 observou-se uma pequena quantidade de material pelotizado (15%) e as pelotas obtidas não apresentaram qualquer característica de resistência ao manuseio. A pelotização do CE 5900, embora muito pequena, ocorreu provavelmente devido ao efeito da menor granulometria que este carvão apresenta; por outro lado, a resistência das pelotas obtidas foi grandemente prejudicada pela presença da água dessecada do sistema pelo alcatrão (insolúvel em água).

A maior parte dos ensaios de pelotização dos finos de carvão foram realizados utilizando o tambor pelotizador. A escolha do tambor em relação ao disco deveu-se, principalmente, à maior facilidade de operação do primeiro (melhor controle na rotação do equipamento e utilização do raspador acoplado) e ao melhor controle no teor de umidade da alimentação no equipamento.

4.2 Estudos de pelotização por tamboreamento

Os testes de pelotização por tamboreamento foram realizados usando como agente ligante: amido de milho e mogul. Os parâmetros estudados foram: concentração de ligante, temperatura de cura dos aglomerados e crescimento cinético das pelotas em função do número de rotações do tambor.

A influência da temperatura de cura na resistência das pelotas de carvão pode ser observada na Tabela XI.

TABELA XI INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA NA RESISTÊNCIA DAS PELOTAS. AMIDO 10%. 1 HORA DE CURA.

CARVÃO CE	TEMPERATURA DE CURA (°C)	L_f kgf/g	Ri %	Ra %
4700	80 ± 5	17,1	100	97,8
	100 ± 5	13,06	100	97,4
	150 ± 5	0,56	36	40,0
5900	80 ± 5	11,8	100	98,1
	100 ± 5	9,62	100	97,5
	150 ± 5	0,54	20	24,8

Estes ensaios de pelotização foram realizados utilizando amido em pó como ligante, que por sua vez, necessita de uma certa quantidade de água para poder atuar como ligante (cola) entre as partículas de carvão (28). Ao aumentarmos a temperatura de cura das pelotas verdes, verifica-se uma diminuição na resistência dos aglomerados. Isto pode ser explicado, em função de uma maior taxa de evaporação de água no aglomerado, evitando, desta forma, que o amido reaja suficientemente com a água na formação do gel. Para temperaturas maiores que 150°C, se observou a combustão completa do ligante, prejudicando grandemente a resistência das pelotas, que apresentaram valores nulos.

As figuras 22 e 23 apresentam os resultados da pelotização dos dois tipos de carvão, em função da concentração de amido de milho e mogul como agentes ligantes, respectivamente. Nestas figuras observa-se uma relação crescente da quantidade de massa pelotizada em função do aumento na concentração de ligante. Esta relação resulta da existência de um maior número de contatos partícula/ligante, favorecendo a formação de uma grande quantidade de pelotas de carvão. As diferenças que ocorrem entre os dois tipos de carvão podem ser atribuídas às variações no teor de umidade e granulometria, principalmente. Neste estudo o carvão CE 5900, além de ter uma granulometria menor, possui uma maior umi-

dade livre natural; variáveis que permitem uma maior atuação dos mecanismos responsáveis pela formação e crescimento das pelotas, e conseqüentemente na quantidade de material pelotizado (28). Ainda nestas figuras observa-se que a eficiência do mogul como ligante, em relação ao amido de milho, é bem maior, pois para menores concentrações de mogul obtêm-se altos valores na quantidade de material pelotizado.

A figura 24 apresenta os resultados do crescimento cinético das pelotas em função do número total de rotações do tambor. O crescimento do diâmetro das pelotas ao longo do tempo de pelotização indica que o material mais fino têm uma maior susceptibilidade à aglomeração, isto porque há um maior número de contatos entre as partículas de carvão decorrentes de sua maior área superficial (54). Para verificar tal afirmação se realizou uma distribuição granulométrica, onde se constatou que a massa (menor que 32 malhas) das partículas que constituem as pelotas de carvão obtidas é quase o dobro da massa (menor que 32 malhas) das partículas do material não aglomerado. Assim as características apresentadas pelos finos do carvão CE 5900, anteriormente descritas, permitem uma maior eficiência dos mecanismos responsáveis pelo crescimento cinético das pelotas ao longo do tempo de pelotização. Em relação ao carvão CE 4700, que possui uma distribuição granulométrica mais ampla, e um teor de umidade menor, o crescimento cinético das pelotas é mais lento. Isto ocorre, fundamentalmente, devido à influência negativa das partículas mais grossas sobre os mecanismos que controlam o crescimento das pelotas de carvão, durante a ação do regime de cascata.

A figura 25 apresenta os valores das medições de resistência à compressão das pelotas de carvão em função da concentração de amido de milho em pó como ligante. Esta figura mostra que para os dois tipos de carvão existe um valor máximo de resistência à compressão para uma concentração de ligante em torno de 10% (em peso) e uma diminuição progressiva para concentrações maiores de ligante. Este decréscimo observado na resistência à compressão das pelotas, como já foi explicado anteriormente, deve estar re-

lacionado com uma maior concentração de amido fazendo ponte entre as partículas de carvão, que originam maiores pontos de fratura (24).

As figuras 26 e 27 apresentam os resultados da influência da cura das pelotas de carvão em relação à concentração de mogul como ligante e a resistência à compressão. Observa-se nessas figuras que à medida que aumenta a concentração de ligante aumenta a resistência à compressão das pelotas e que existe um valor máximo, para os dois tipos de carvão, para uma concentração de mogul de 5% (em peso). A partir desta concentração verifica-se uma diminuição no índice de resistência à compressão do aglomerado, fenômeno que se explica pelos fatores anteriormente descritos. Em relação à cura das pelotas, verificamos que as pelotas deixadas à temperatura ambiente durante 2 dias apresentaram-se muito mais resistentes do que as tratadas termicamente. Como se sabe, a principal característica do mogul é a alta capacidade de absorção de água à temperatura ambiente para a formação do gel; conseqüentemente, ao levarmos as pelotas à secagem térmica, parte da água necessária para a formação do gel estará sendo evaporada, implicando numa diminuição na resistência do aglomerado. A menor resistência à compressão observada nas pelotas do carvão CE 5900 pode ser explicada em termos de sua maior umidade. Assim, as pelotas após o processo de cura perdem parte desta umidade natural deixando a estrutura interna do aglomerado mais porosa e conseqüentemente mais frágil ao trabalho mecânico de compressão.

Pelos resultados obtidos, podemos considerar as pelotas de carvão altamente resistentes quando comparados com as resistências à compressão das pelotas das duas plantas industriais de pelletização; já que estas últimas atingiram seus máximos valores de resistência entre 6 e 12 kg, porém, a concentração de ligante utilizada variava entre 0,5 e 1% (em peso) (23)(76).

As figuras 28 e 29 apresentam os resultados do ensaio de abrasão para os dois tipos de carvão, utilizando amido e mogul como ligantes, respectivamente. No caso do uso do amido de milho, este índice de abrasão mostra valores ótimos de resistência já por volta dos 6% de concentração de ligante, mantendo-se em valores altos para todas as concentrações estudadas. Em relação ao uso do mogul, observa-se que o índice de resistência à abrasão atinge valores máximos a partir de 1% de concentração. Como este ensaio mede substancialmente fenômenos superficiais, não aparece definido o efeito negativo da alta concentração de ligante na es

estrutura interna do aglomerado. As diferenças observadas entre os dois tipos de carvão, embora muito pouco significativas, podem ser atribuídas aos fatores anteriormente descritos.

A figura 30 apresenta os valores da variação do diâmetro médio das pelotas de carvão em função da concentração de ligante, para os dois tipos de carvão. Esta figura mostra que independentemente de fatores como tipo de carvão, concentração de ligante e massa pelletizada, o tamanho médio do produto aglomerado é aproximadamente igual em ambos os casos. Entre os possíveis fatores que influem no crescimento das pelotas, e que podem explicar o fenômeno acima mencionado, estão aqueles decorrentes das condições operacionais do processo, e entre outros, a relação área superficial/umidade do carvão. Esta relação é praticamente da mesma ordem de magnitude (devido à compensação da maior área superficial do carvão CE 5900 com uma maior umidade) e compensa as diferenças físicas resultando um produto aglomerado que apresenta um tamanho médio similar. Resultados similares foram obtidos por SASTRY, FUERSTENAU e MEHROTRA (54)(59) nos seus estudos de cinética de pelletização para vários materiais, inclusive finos de carvão mineral. Ainda com referência a esta figura, observa-se que com o aumento da concentração de ligante há uma diminuição no tamanho médio das pelotas de carvão. Este fenômeno ocorre devido à menor disponibilidade de água no meio para ajudar nas ligações entre as partículas de carvão decorrentes da adição do ligante seco; já que a presença de água é fundamental na performance das ligações capilares e conseqüentemente na coalescência das pelotas formadas (28). Por outro lado, a coalescência das pelotas também é influenciada, de acordo com MEHROTRA e SASTRY (28), pela presença do amido como ligante, já que ao aumentarmos a concentração de amido, as pelotas obtidas tornaram-se cada vez mais rígidas e menos plásticas, implicando numa diminuição da faixa de crescimento da pelota por coalescência. As diferenças no tamanho entre as pelotas obtidas utilizando amido e mogul, também são explicadas pelo mecanismo anterior, pois o último absorve muito mais água do que o primeiro, deixando o material que está sendo pelletizado mais seco.

Nos ensaios de pelotização de finos de carvão, os melhores resultados foram obtidos utilizando-se mogul como ligante, já que este proporcionou às pelotas formadas maiores características de resistência mecânica, quando comparados às obtidas com os outros ligantes testados.

4.3 Estudos de briquetagem

Os testes de briquetagem foram realizados usando-se como ligante: alcatrão bruto, amido de milho em pó e gelatinizado, RE VAC e mogul. Os parâmetros estudados foram: tempo de moldagem, pressão de moldagem, concentração e tipo de ligante, tamanho dos briquetes e teor de umidade da alimentação.

Na briquetagem dos carvões com a granulometria e umidade livre natural, sem o uso de ligantes, obteve-se briquetes que não apresentaram nenhuma característica de resistência mecânica. Uma observação geral no processo de briquetagem foi a saída da água (umidade livre do carvão) durante o processo de prensagem do mesmo. Assim, uma primeira desvantagem do tipo operacional na briquetagem destes finos de carvão seria a necessidade de uma etapa de secagem parcial prévia à moldagem. Por exemplo, a resistência à compressão dos briquetes de carvão úmido, moldados com alcatrão bruto, como ligante (concentrações de 10, 12 e 14%) e tratados termicamente a $120 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante uma hora, foi sempre, aproximadamente a metade dos valores obtidos, quando os finos de carvão foram secos.

A figura 31 apresenta os valores obtidos da resistência à compressão dos briquetes em função da variação do tempo de compactação da carga. Teoricamente, teríamos que com o aumento do tempo de compactação da carga, ocorre um aumento na resistência dos aglomerados obtidos, porém, este período de compactação é governado, na prática, por fatores econômicos (24). Pelos resultados obtidos, observa-se que o tempo de moldagem dos finos de carvão não influi significativamente após um tempo de compactação de 0,5 minutos.

Em relação à pressão de moldagem, a figura 32 apresenta a influência da pressão nos valores de resistência à compressão dos briquetes obtidos, para os dois tipos de carvão. Observa-se, nesta figura, que se atinge valores máximos de resistência para um grau de compactação em torno dos 150 kgf/cm^2 , após este valor a magnitude da resistência se mantém praticamente constante. A maior resistência apresentada pelos briquetes obtidos do carvão CE 5900 deve estar relacionada com sua menor granulometria e pela maior quantidade de água entre as partículas, que diminuem o atrito entre elas, permitindo uma melhor densidade de empacotamento do aglomerado (26). Assim no caso dos briquetes do CE 4700, sua menor resistência à compressão deve-se à alta granulometria que este carvão apresenta, de tal modo que, ao aumentarmos o grau de compactação da carga, estaremos provocando o esmagamento das partículas graúdas comprometendo a resistência do briquete de carvão obtido (77).

A figura 33 apresenta os valores de resistência à compressão dos briquetes em função da quantidade de massa de finos de carvão a ser briquetada, para ambos os tipos de carvão. Observa-se que, com o aumento da carga (massa de carvão), há um decréscimo na resistência dos briquetes. Isto ocorre, fundamentalmente, porque com o aumento da carga há um aumento na altura dos briquetes; conseqüentemente, originam-se maiores planos de ruptura e quando submetidos à ação de trabalhos mecânicos de compressão facilitam a ruptura dos aglomerados através destes planos (77).

As figuras 34 e 35 apresentam, respectivamente, os resultados comparativos dos índices de resistência à compressão dos briquetes obtidos com os carvões CE 4700 e CE 5900, em função da concentração e tipo de vários agentes ligantes utilizados. Estas figuras mostram, tal como na pelotização, que os valores de resistência aumentam com o aumento da concentração de ligante a apresentam um valor máximo num determinado intervalo de concentração e logo diminuem quando aumentamos a concentração de ligante. Do mesmo modo que na pelotização, um recobrimento em excesso das partículas pelo ligante reduz significativamente a resistência interna na estrutura do aglomerado (28). No caso do uso do REVAC,

aqueles aglomerados com mais de 15% de ligante (em peso) apresentaram uma lenta deformação, porém, não uma ruptura imediata, observando-se no fim da experiência uma massa pastosa com considerável resistência ao manuseio.

Embora não se tenha padronizado qual deva ser a resistência máxima de compressão dos briquetes de finos de carvão mineral, existe um valor de resistência que os briquetes de finos de carvão vegetal devem atingir (80 kgf/cm^2), porém, até hoje nenhum dos experimentos realizados com briquetes de carvão vegetal atingem este valor, e sem resistência entre 50 e 60 kgf/cm^2 (41), valores que são compatíveis com os resultados obtidos neste trabalho utilizando briquetes de carvão mineral.

Como a proporção de água na alimentação é um fator limitante do processo de briquetagem, estudou-se, com os carvões previamente secos, a influência da umidade das características mecânicas (resistência à compressão) dos briquetes utilizando amido de milho gelatinizado como agente ligante. Os resultados obtidos estão descritos na figura 36. Esta figura mostra que para ambos os carvões, os menores valores de resistência são obtidos com a umidade natural que é da ordem de 30%. Ainda, para aumentar a resistência dos briquetes até valores considerados razoáveis, esta figura mostra que a redução da umidade natural dos carvões deve atingir pelo menos um valor próximo de 10%.

Para verificar a influência do teor de umidade da briquetagem dos finos utilizando REVAC como ligante, se fez um estudo comparativo entre finos completamente secos e os finos úmidos misturados a quente com o ligante a $125 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 5 minutos. Durante o período de mistura se observou uma redução no teor de umidade dos finos de aproximadamente 5%; os resultados obtidos estão representados nas figuras 37 e 38. Como se pode observar nas referidas figuras, os briquetes obtidos a partir dos finos de carvão úmido atingem valores máximos de resistência com concentrações menores de REVAC, quando comparados com os briquetes de carvão seco. Como já foi explicado anteriormente, nos processos de briquetagem, a presença de água em pequenas quantidades facilita o movimento das partículas, pois atua como lubrificante e permite a obtenção de uma melhor densidade de empacotamento no aglomerado. Esta afirmação, similar às de BERKOWITZ (26), pode ser observada nas mesmas figuras, onde para maiores valores de resistência à compressão correspondem maiores valores de densidade no aglomerado e vice-versa.

Com o objetivo de determinar qual seria o melhor ligante para a briquetagem dos finos, realizou-se o teste de resistência à tração simples. Os resultados obtidos estão plotados nas fi-

guras 39 e 40 para os finos de CE 4700 e CE 5900 respectivamente. Como se pode observar, os valores ótimos de resistência à tração simples mostrados nestas figuras e os de resistência à compressão em figuras anteriores, classificam a este composto REVAC, como o melhor agente de briquetagem dos finos de carvão em estudo.

Para verificar qual seria a influência do tipo e concentração de agente ligante utilizado no conteúdo de cinzas e no poder calorífico dos aglomerados do carvão CE 4700, foram feitas as análises respectivas e os resultados são apresentados na Tabela XII.

TABELA XII INFLUÊNCIA DO TIPO E CONCENTRAÇÃO DE LIGANTE NA QUALIDADE DO AGLOMERADO. CARVÃO 4700.

LIGANTE ADICIONADO	QUANTIDADE % (EM PESO)	TEOR DE CINZAS (%)	PODER CALORÍFICO (kcal/kg)
Nenhum		33,2	4700
Amido de Milho	1	32,91	4946
	15	28,36	6307
MOGUL	1	30,98	5006
	15	26,53	6222
REVAC	1	32,4	4800
	15	27,96	6820

Pelos resultados observamos que os aglomerados obtidos, utilizando os diferentes ligantes apresentaram melhores valores tanto no conteúdo de cinzas como no poder calorífico, do que os finos de carvão propriamente ditos.

4.4 Estudos econômicos comparativos

Em relação às características econômicas, foi realizado um estudo preliminar, face às diferenças encontradas entre os processos de aglomeração de finos de carvão estudados, tais como: tipo e concentração de agente ligante e processos operacionais envolvidos, principalmente.

4.4.1 Circuito de pelotização

Na avaliação econômica do circuito de pelotização foram consideradas as seguintes condições operacionais: alimentação do circuito, finos de carvão CE 4700 beneficiados com umidade natural de aproximadamente 25% e como ligante mogul (4,0% em peso), amido pré-gelatinizado fornecido pela Refinações de Milho Brasil Ltda.

Descrição do circuito: para a avaliação do processo foi de desenvolvido um fluxograma conceitual (vide figura 41). O circuito consta, principalmente, de três estágios operacionais:

- estágio de homogeneização: mistura dos finos de carvão com o ligante adicionado;
- estágio de pelotização propriamente dito;
- estágio de cura ou tratamento térmico das pelotas de carvão verdes.

Homogeneização: os finos de carvão mineral beneficiados são estocados num silo visando garantir uma alimentação constante ao circuito de pelotização, mesmo quando a planta de beneficiamento esteja parada para eventual manutenção. Do silo, os finos de carvão

vão úmido são transferidos por meio de uma correia transportadora até o misturador. Em relação ao ligante, este poderá ser adicionado, na concentração desejada, na própria correia transportadora dos finos ou diretamente no misturador. Após o processo de mistura, o material homogêneo é descarregado numa correia que o levará até o disco pelotizador.

Pelotização: nesta parte do circuito, se fará necessário a adição de uma certa quantidade de água para termos uma umidade nos finos em torno dos 30%, necessária à nucleação e posterior formação das pelotas. Devido ao movimento do material no disco, as pelotas maiores saem à superfície e no momento em que este está cheio, as pelotas começam a transbordar de forma contínua. Nem todo o material que transborda do disco está na forma de pelotas, em vista disto, será necessário um estágio de peneiramento, no qual o material não pelotizado volta ao circuito; no presente estudo, foi considerada uma carga circulante de 10% em relação à carga do disco inicial. O material pelotizado é, então, transportado por meio de uma correia até a esteira de secagem.

Cura: para dar ao produto obtido melhores qualidades de resistências mecânicas, as pelotas verdes serão submetidas a uma secagem térmica, na qual perderão parte de sua umidade natural. Finalmente, as pelotas serão transportadas para a pilha de estocagem, por meio de uma correia transportadora.

4.4.2 Circuito de briquetagem

Na avaliação do circuito de briquetagem, foram levadas em conta as seguintes condições operacionais: alimentação do circuito; finos de carvão CE 4700 beneficiados com umidade natural de aproximadamente 25% e REVAC (9% em peso) como ligante fornecido pela Refinaria Alberto Pasqualini de Canoas.

Descrição do circuito: similar ao processo de pelotização, foi desenvolvido um fluxograma conceitual (vide figura 42), para auxiliar na avaliação econômica do processo de briquetagem. Este

circuito consta, fundamentalmente, de três estágios operacionais:

- secagem dos finos de carvão úmido;
- mistura a quente dos finos de carvão com o ligante;
- briquetagem propriamente dita.

Secagem: devido ao alto teor de umidade observado nos finos de carvão, será necessária uma etapa de secagem, prévia à mistura do material com o ligante. Os finos de carvão úmido serão transportados através de uma correia, até a esteira de secagem. Neste estágio, o produto seco apresentará um teor de umidade em torno de 2,5%, e serão transportados por meio de uma esteira até o misturador. Devido à difícil manuseabilidade do REVAC na temperatura ambiente, este deverá ser aquecido a uma temperatura em torno dos 120°C, antes de ser adicionado aos finos de carvão. A adição do ligante, na concentração desejada, será diretamente no misturador.

Mistura: como foi mencionado anteriormente e para termos uma massa o mais homogênea possível, o processo de mistura terá que ser realizado numa faixa de temperatura acima dos 100°C. Esta mistura quente será, então, transportada por meio de uma correia transportadora especial até o compactador.

Briquetagem: a briquetagem da mistura quente será realizada numa briquetadora de rolos. Posteriormente à briquetagem, foi adicionada uma etapa de peneiramento, visando obter um produto aglomerado livre de particulados finos. Foi considerada, para efeito de cálculos, uma carga circulante de 5% em relação à carga do briquetador. Finalmente, o produto aglomerado será transportado por meio de uma correia até a pilha de estocagem dos briquetes.

Em relação às características econômicas dos processos, a Tabela XIII apresenta os valores de custos levantados a partir dos

dados operacionais e de informações pessoais referentes a equipamentos e insumos, principalmente:

TABELA XIII PLANILHA BÁSICA DE CUSTOS.

I			
CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO			
1.	Dias úteis (300 dias/ano)	25 dias/mês	
2.	Turnos/dia	2	
3.	Horas trabalhadas/dia (94% de eficiência)	15	
4.	Capacidade produtiva	10 tph	
5.	Produção mensal média	3750 t/mês	
6.	Depreciação dos equipamentos	5 anos	
II			
CAPITAL DE INVESTIMENTO	PELOTIZAÇÃO (ORTN)	BRIQUETAGEM (ORTN)	
1.	Custos dos equipamentos: briquetador, disco pelotizador, estufagem, silos, peneiras, correias, alimentadores, misturadores, etc.	27.092	39.528
2.	Instalação: montagem dos equipamentos, fundações, estruturas, etc. - 43% do custo dos equipamentos	<u>11.650</u>	<u>16.998</u>
	TOTAL DOS EQUIPAMENTOS	38.742	56.526
3.	Obras civis: edifícios, pátios, vias de acesso, etc. - 35% do total dos equipamentos	13.560	19.784
4.	Prédios auxiliares: tanques, depósitos, imprevistos, etc. - 10% do total dos equipamentos	<u>3.874</u>	<u>5.653</u>
	SUB-TOTAL: INVESTIMENTOS FIXOS	56.176	81.963
5.	Capital de giro - 15% do investimento fixo	<u>8.427</u>	<u>12.295</u>
	CAPITAL DE INVESTIMENTO TOTAL	64.603	94.258

III PREÇO DOS INSUMOS BÁSICOS

		ORTN
1. Água industrial	m ³	0,01
2. Energia elétrica	Kwh	0,01
3. Ligantes:		
MOGUL	t	38,42
REVAC	t	16,63
4. Carvão CE4700	t	3,12
5. Mão-de-obra	mês	63,52

IV CONSUMO DOS INSUMOS

	PELOTIZAÇÃO	BRIQUETAGEM
1. MOGUL	40 kg/t	-
2. REVAC	-	90 kg/t
3. Carvão para secagem	49 kg/t	70 kg/t
4. Água	0,08 m ³ /t	-
5. Energia elétrica	15 Kwh/t	19 Kwh/t
6. Operários	4/mês	4/mês

V COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS

I T E M	PELOTIZAÇÃO		BRIQUETAGEM	
	ORTN/t	%	ORTN/t	%
Mão-de-obra (+52% de encargos sociais)	0,11	3,05	0,11	2,62
Energia elétrica	0,15	4,15	0,19	4,52
Secagem	0,15	4,15	0,22	5,23
Água	0,01	0,28	-	-
MOGUL	1,54	42,66	-	-
REVAC	-	-	1,50	35,72
Manutenção (3% do investimento amortizado)	0,01	0,28	0,02	0,48
Depreciação dos equipamentos	0,17	4,71	0,25	5,95
Amortização do capital de investimento (*)	0,64	17,73	0,94	22,38
SUB-TOTAL	2,78		3,23	
Custo administrativos e Lucro bruto (30% do custo operacional)	0,06	22,99	0,07	23,10
Lucro líquido (-35% de IR)	0,77		0,90	
T O T A L	3,61	100	4,20	100

(*) Taxa de juros: 10 e 12% ao ano para o capital de investimento dos equipamentos e para o capital de instalações das obras civis, respectivamente.

Base de cálculo 1 ORTN = Cr\$ 58.300 (Outubro, 1985).

Como se pode observar na mencionada tabela, o circuito de pelotização apresentou custo operacional menor em relação ao circuito de briquetagem e em ambos circuitos, o custo de maior peso refere-se ao consumo de ligante, que representa mais de 1/3 do custo operacional total dos circuitos. Nesta análise foi considerado um custo zero para o consumo dos finos de carvão nos processos de aglomeração, pois, partiu-se do fato que no funcionamento da usina de aglomeração serão gastos finos de carvão obtidos da própria planta de beneficiamento.

Por outro lado, devido à falta de publicações práticas referentes ao assunto, foram adotados no cálculo das instalações civis, índices que correlacionam a estas com o custo de investimento dos equipamentos. Estes índices são muito utilizados pelos americanos e canadenses nos estudos de viabilidade econômica de projetos minero-metalúrgicos (86) e que em termos do Brasil podem ser utilizados, oferecendo uma boa margem de segurança no estudo econômico realizado (87). No cálculo da composição dos custos, os itens referentes aos encargos sociais foram realizados através de informações fornecidas pelo Sindicato das Indústrias da Construção Civil do RGS e à amortização do capital de investimento através de informações dadas pelo Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul. Quanto aos equipamentos, foram consultadas as seguintes fontes: Voest-Alpine, FAGO, Eirich, Industrial Conventos, Fermasa, Aços Plangg, Good Year do Brasil, Ferramentas Gerais e Vulca Correias Com. Ltda.

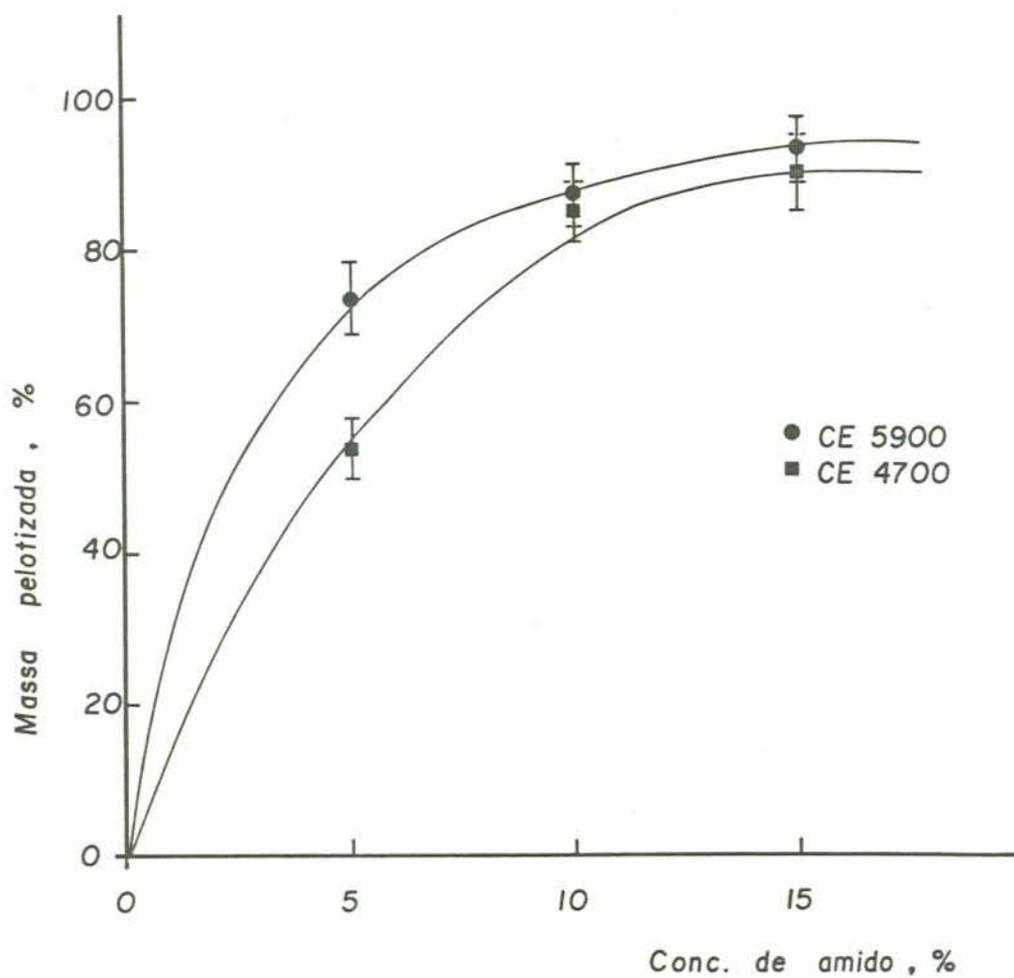


Figura 22 Influência da concentração de amido na alimentação na quantidade de massa pelotizada.

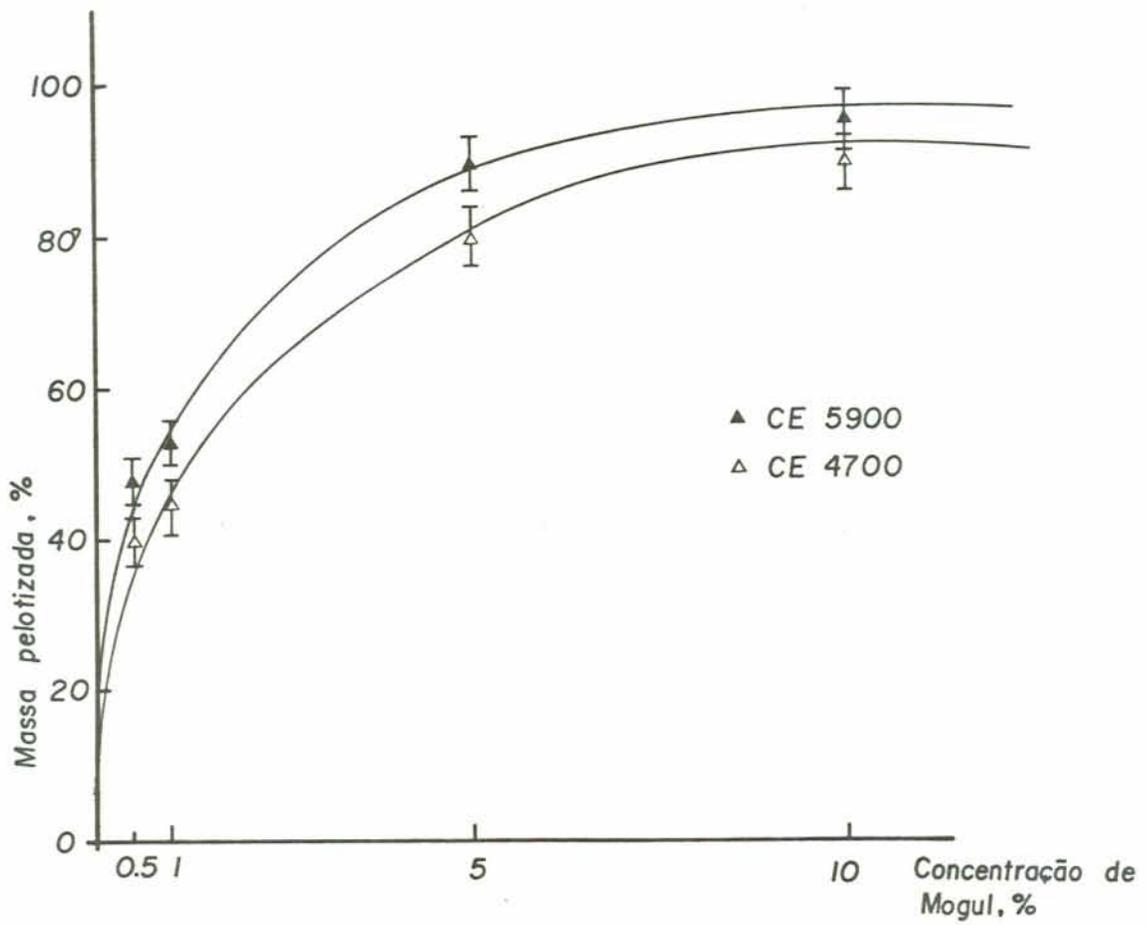


Figura 23 Influência da concentração de MOGUL na alimentação na quantidade de massa pelotizada.

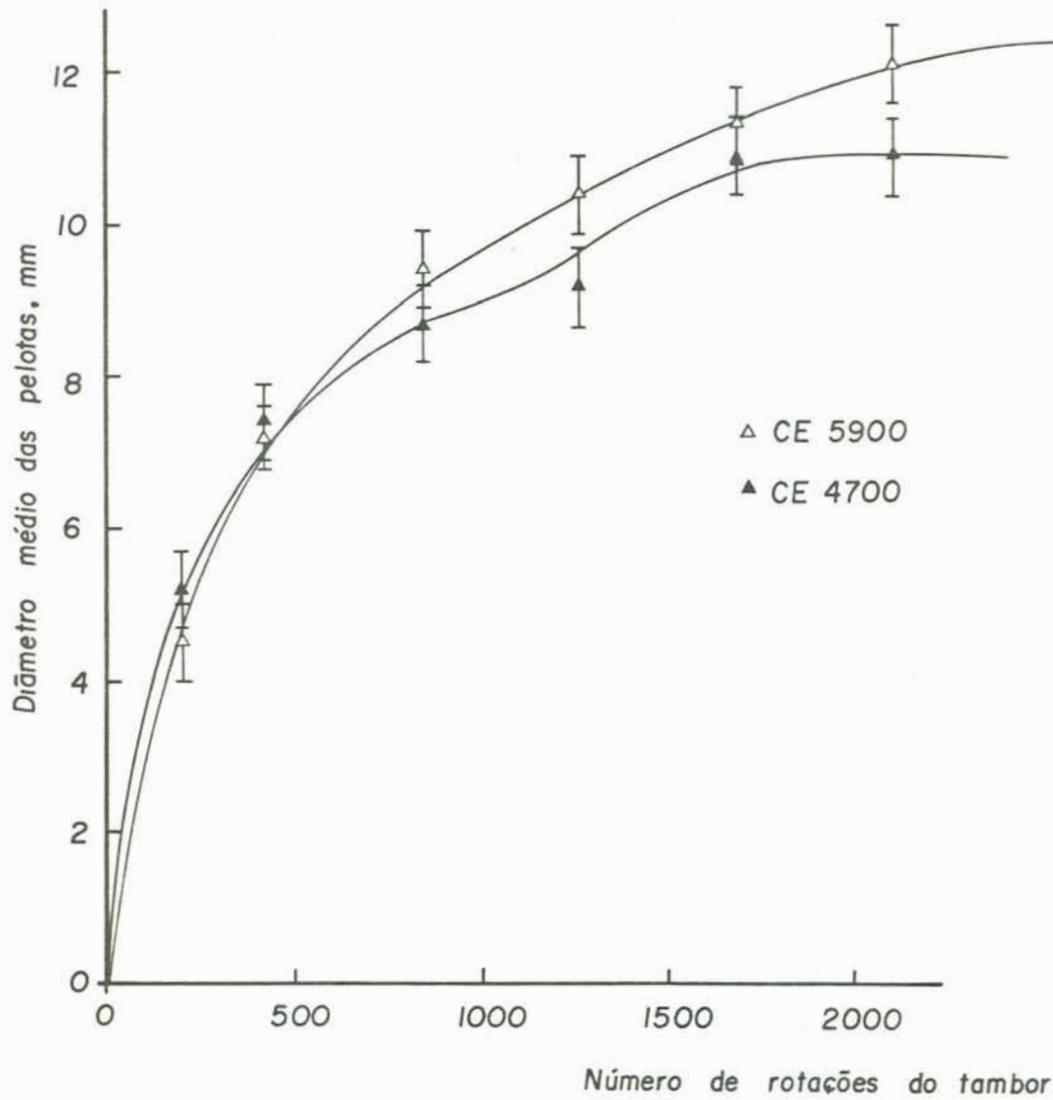


Figura 24 Crescimento cinético das pelotas de carvão em função do número de rotações do tambor.

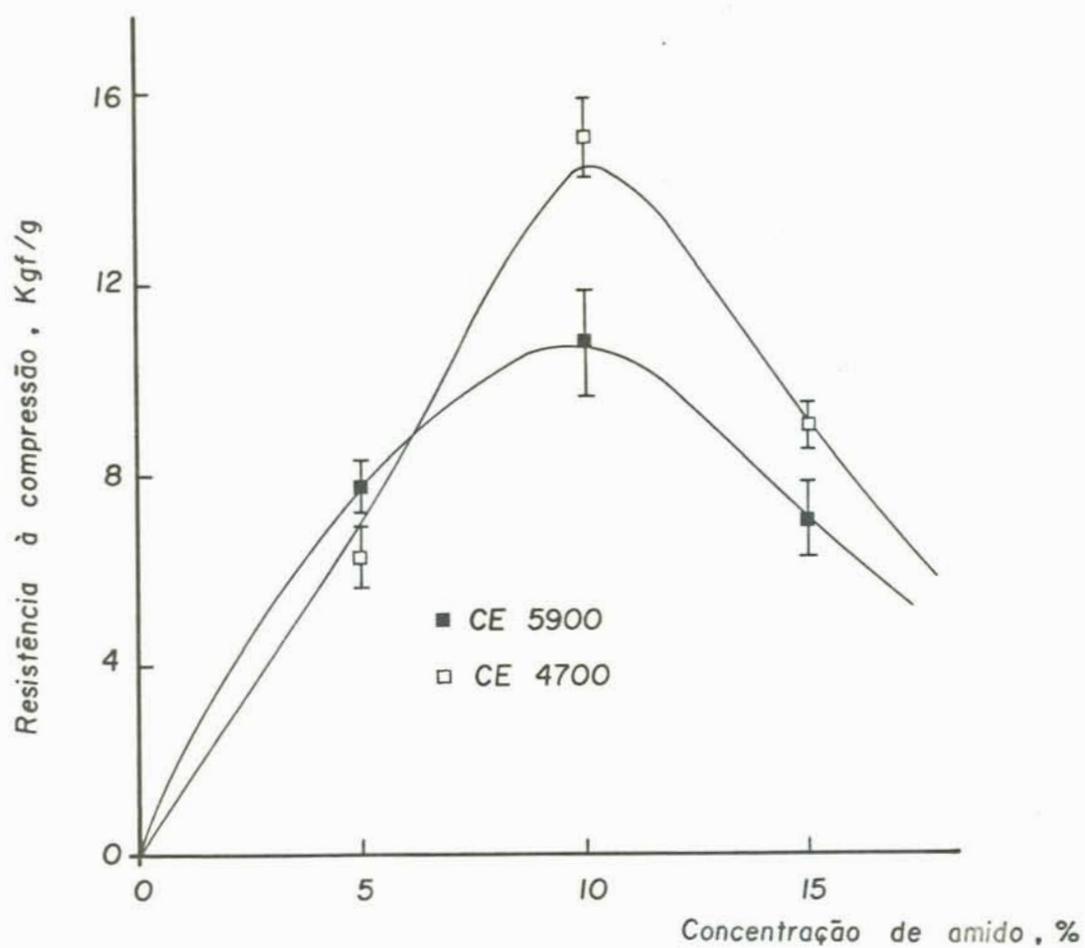


Figura 25 Influência da concentração de ligante no índice de resistência à compressão das pelotas.

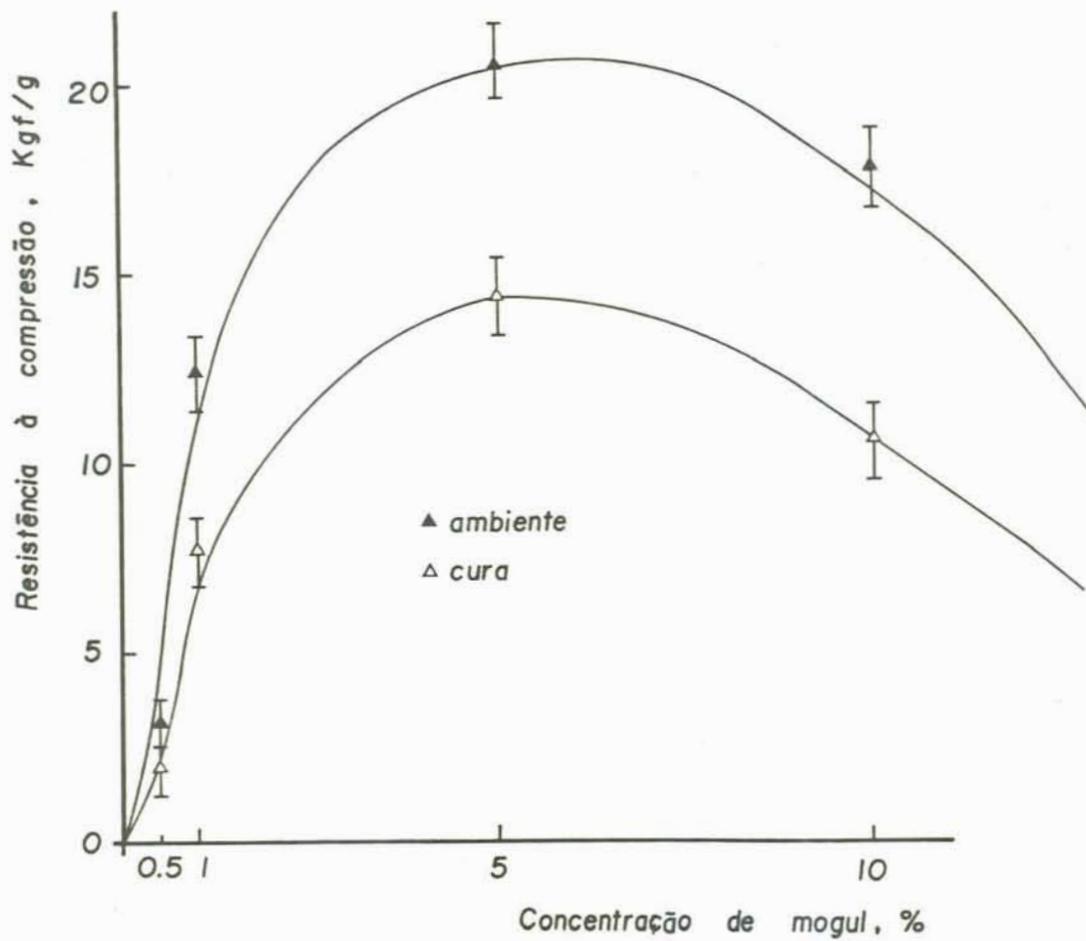


Figura 26 Influência da concentração de ligante e da temperatura de cura das pelotas verdes no índice de resistência à compressão. Finos de Carvão CE 5900

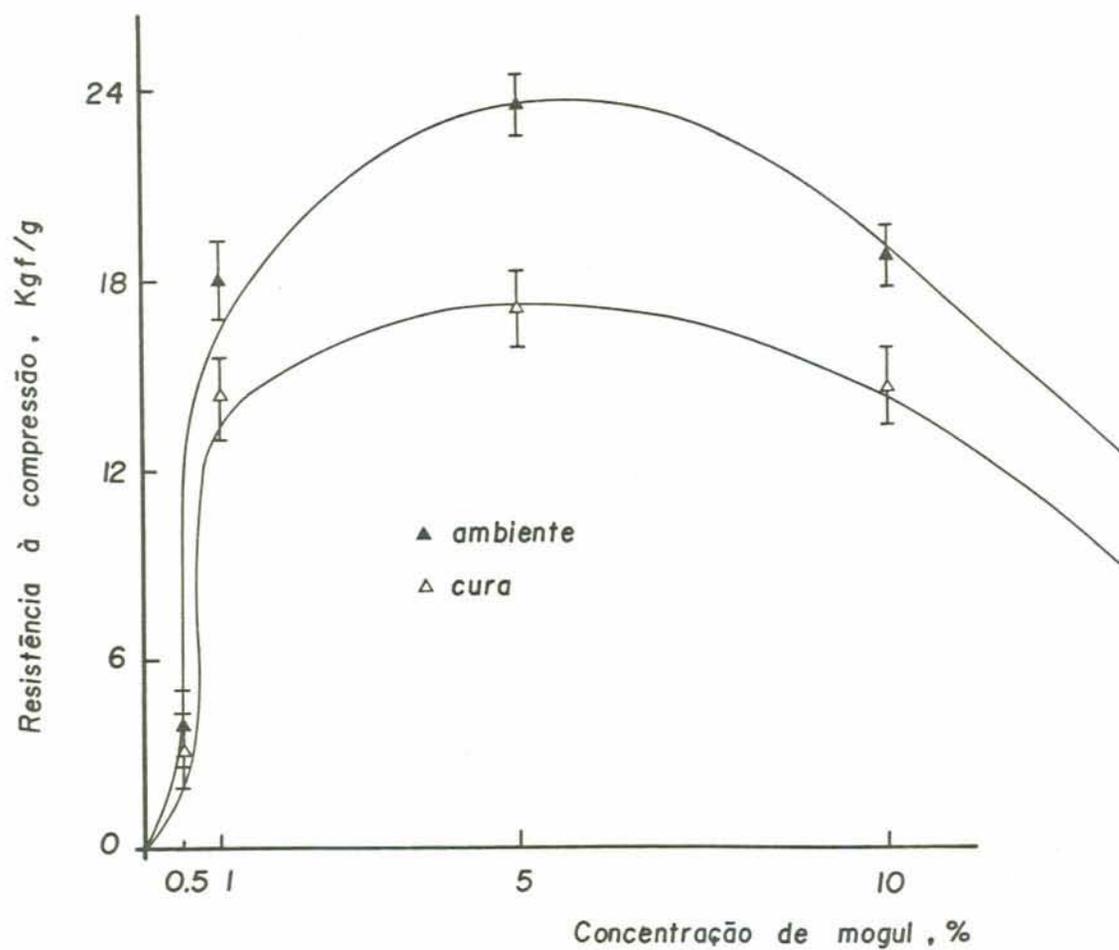


Figura 27 Influência da concentração de ligante e da temperatura de cura das pelotas verdes no índice de resistência à compressão. Finos de carvão CE 4700.

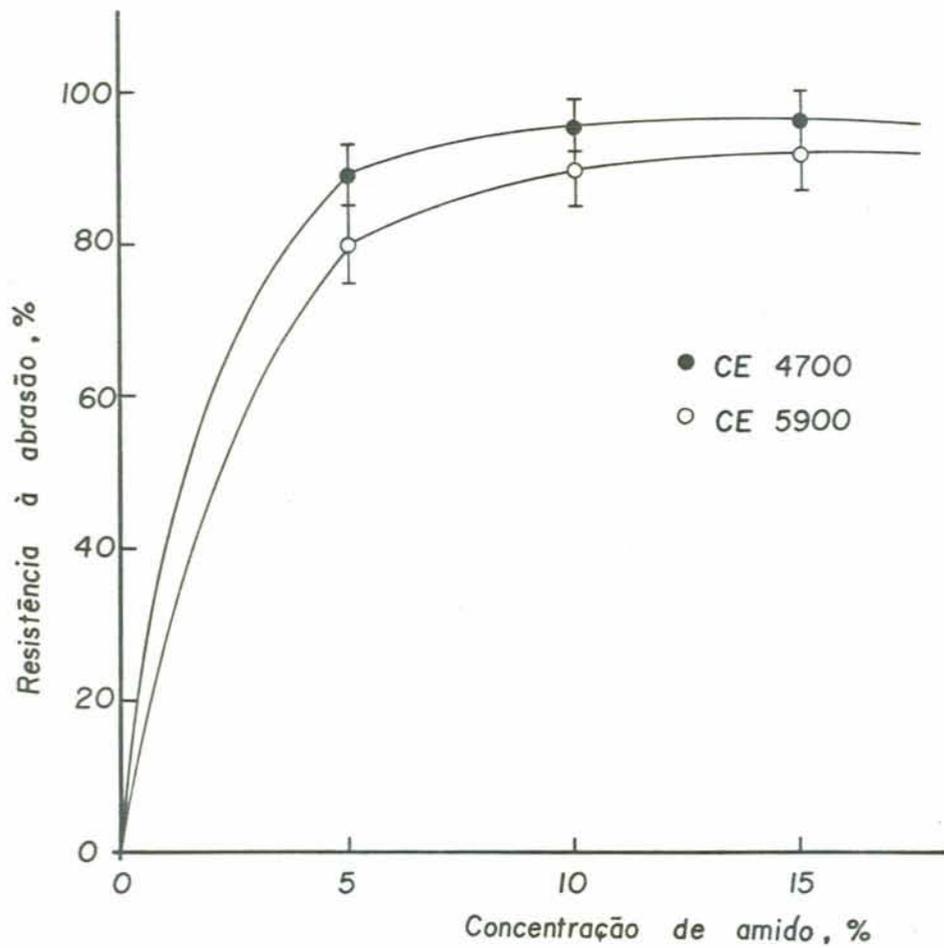


Figura 28 Influência da concentração de amido no índice de resistência à abrasão das pelotas.

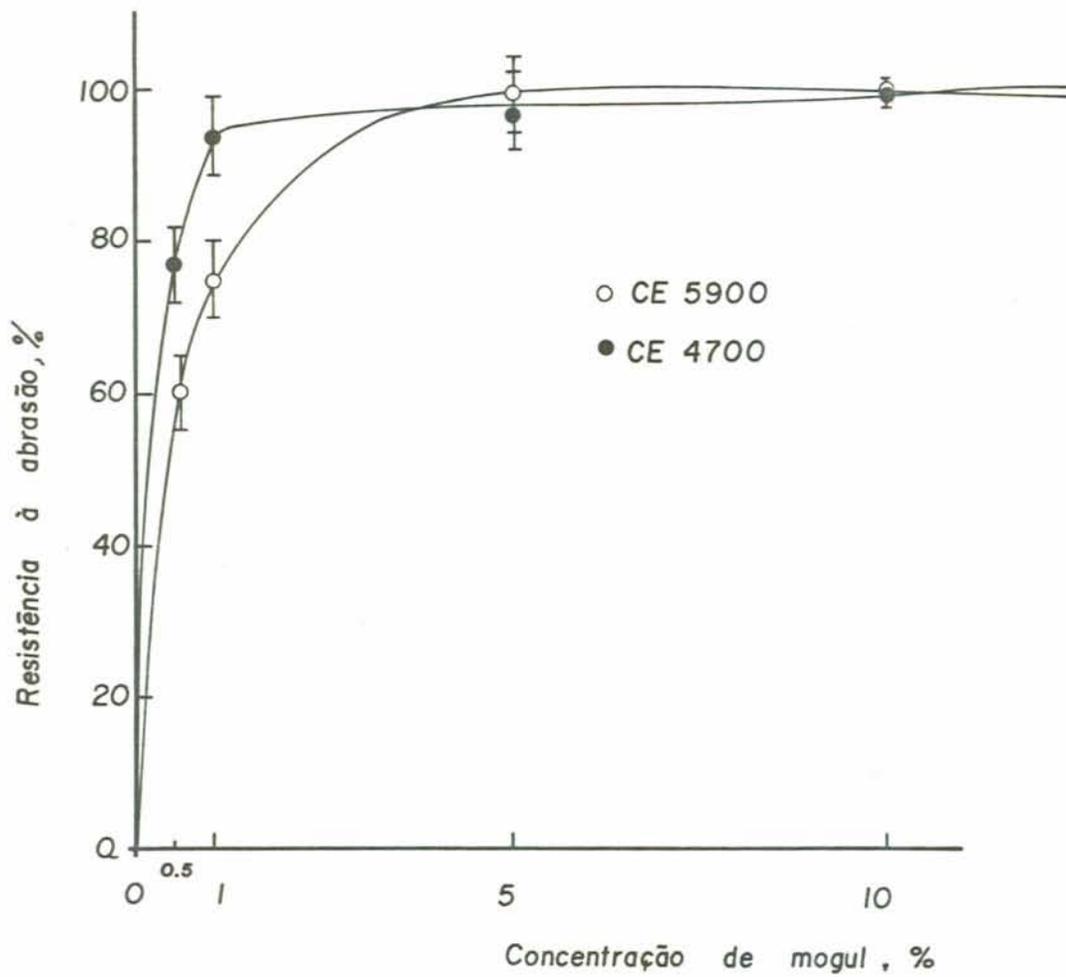


Figura 29 Influência da concentração de MOGUL no índice de resistência à abrasão das pelotas.

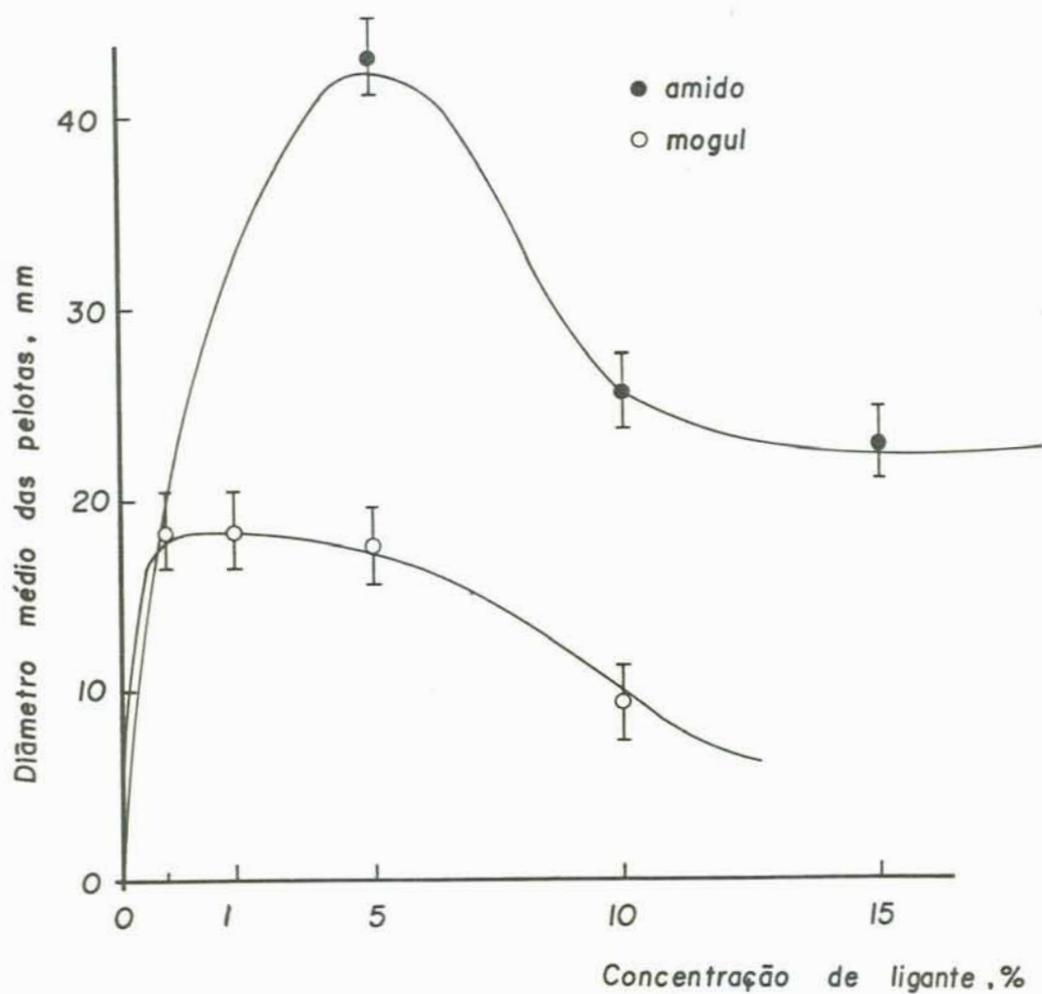


Figura 30 Influência da concentração e tipo de agente ligante no diâmetro médio das pelotas obtidas para os dois tipos de carvões.

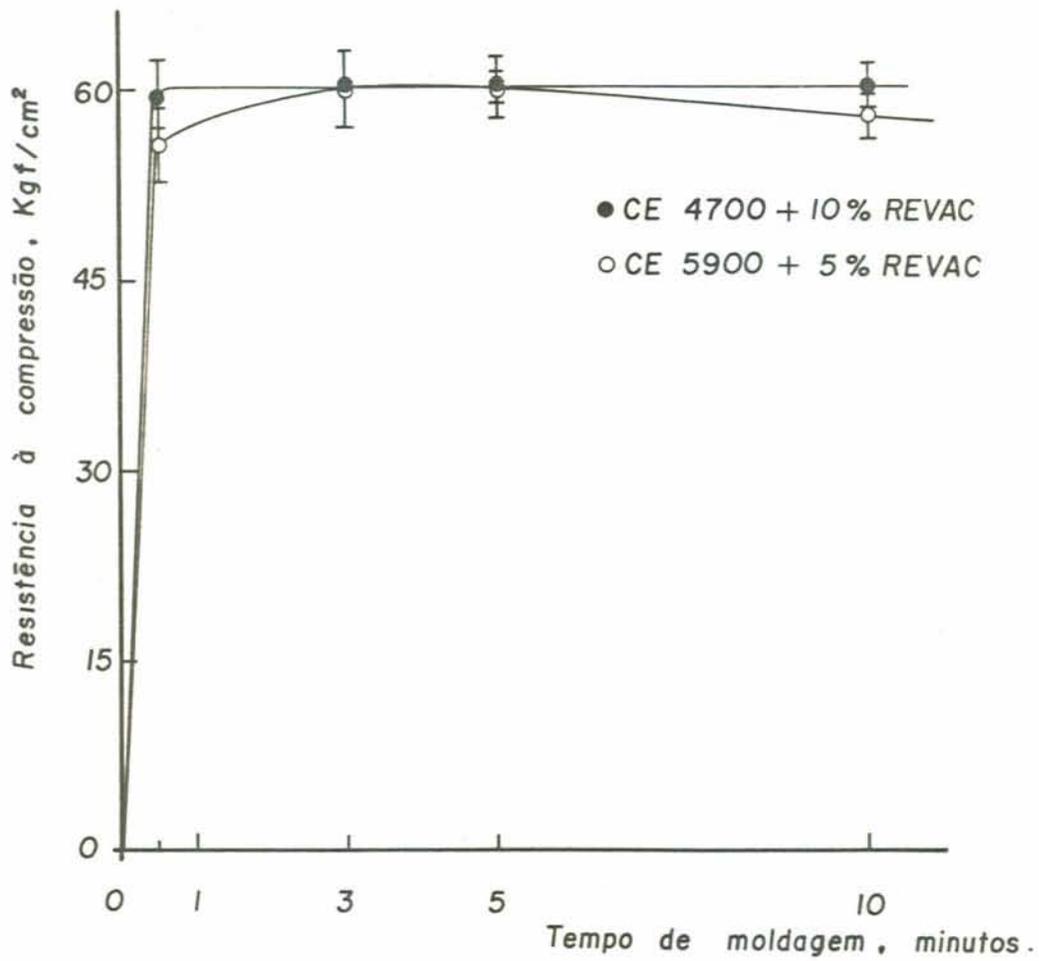


Figura 31 Influência do tempo de compactação da carga no índice de resistência à compressão dos briquetes.

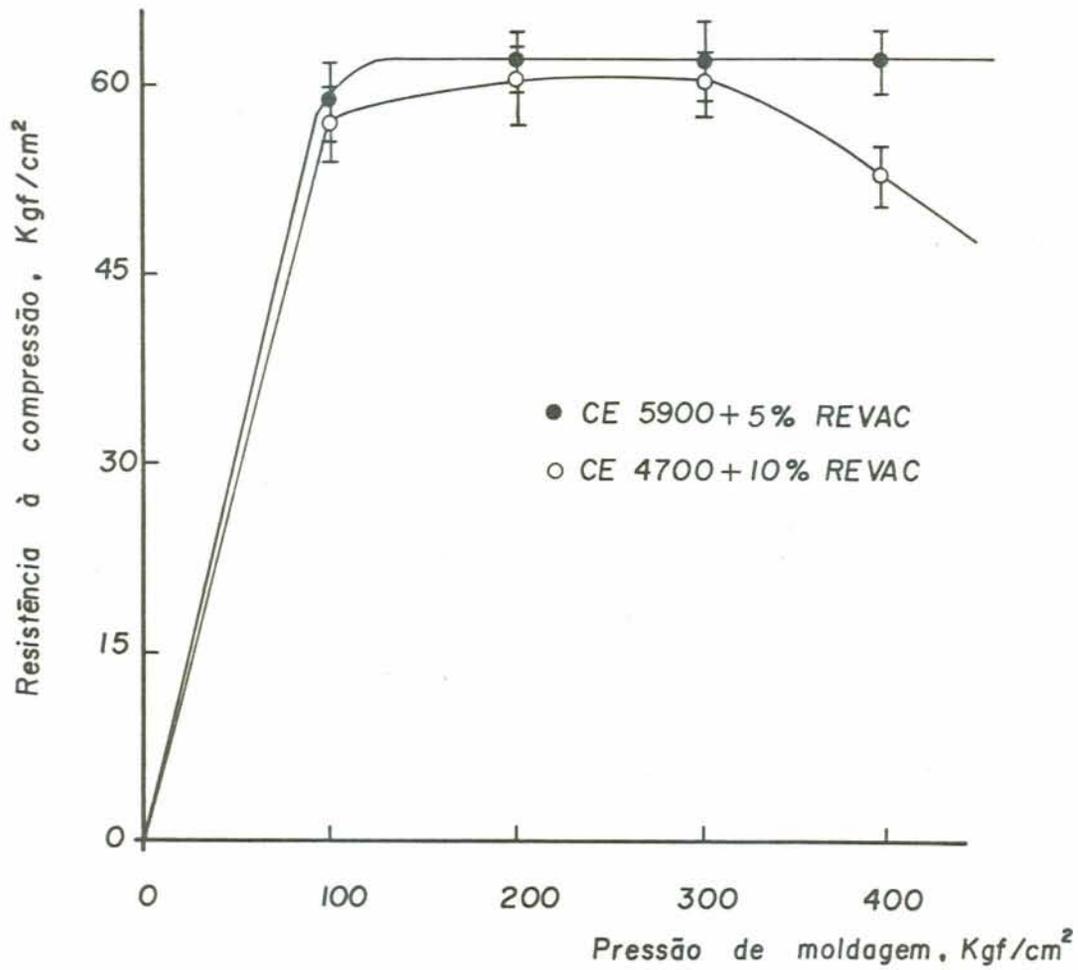


Figura 32 Influência da pressão de compactação aplicada na carga, no índice de resistência à compressão dos briquetes.

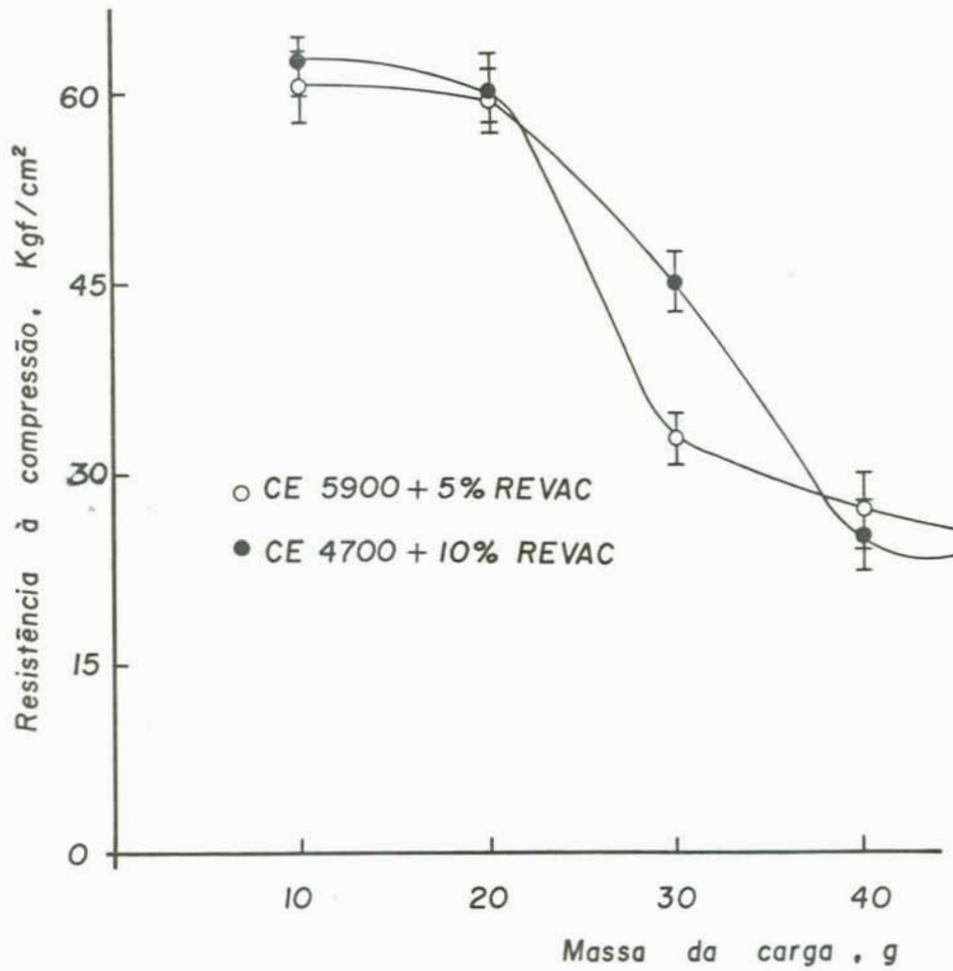


Figura 33 Influência da variação da carga de alimentação no índice de resistência à compressão dos briquetes obtidos.

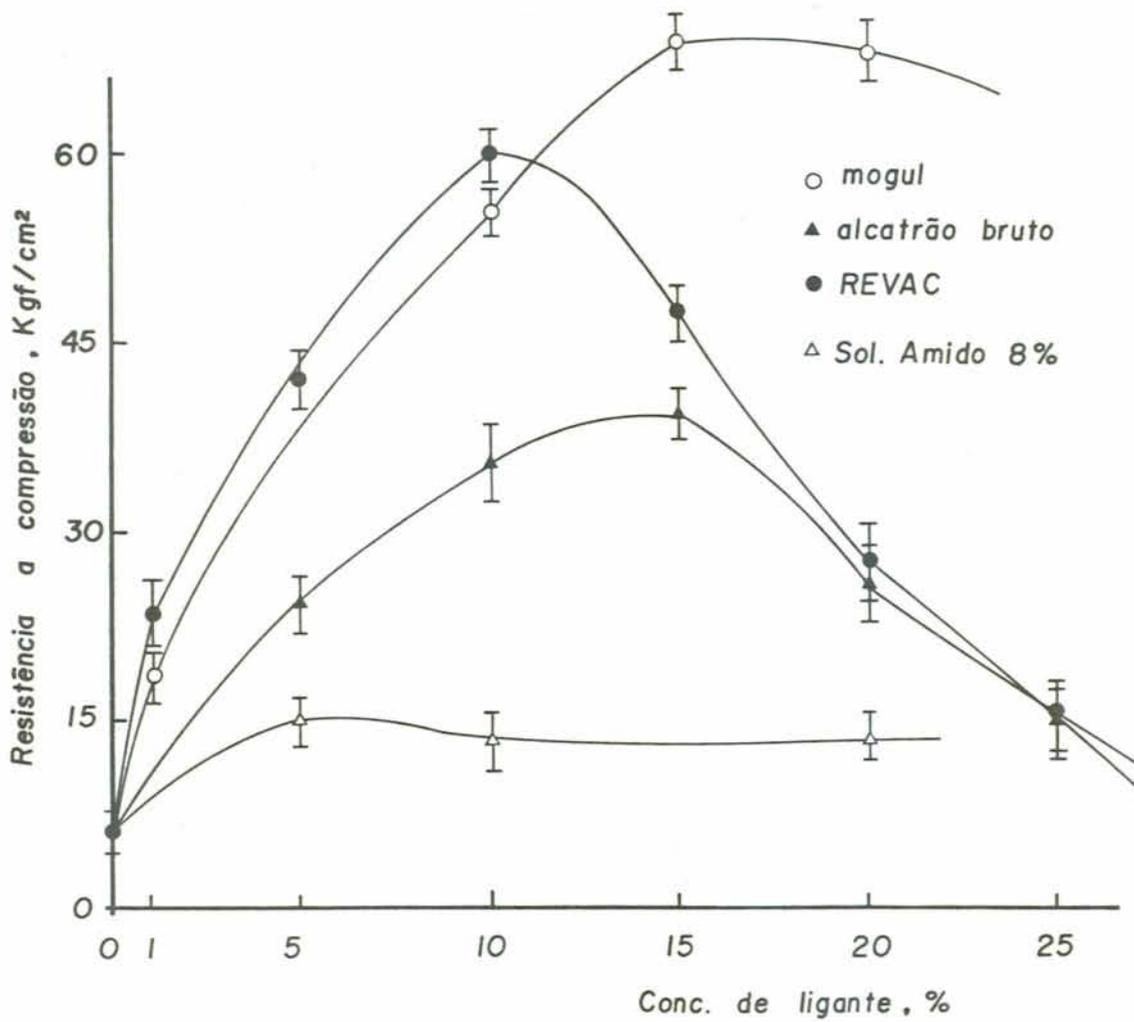


Figura 34 Influência da concentração e tipo de agente ligante na resistência à compressão dos briquetes do carvão CE 4700.

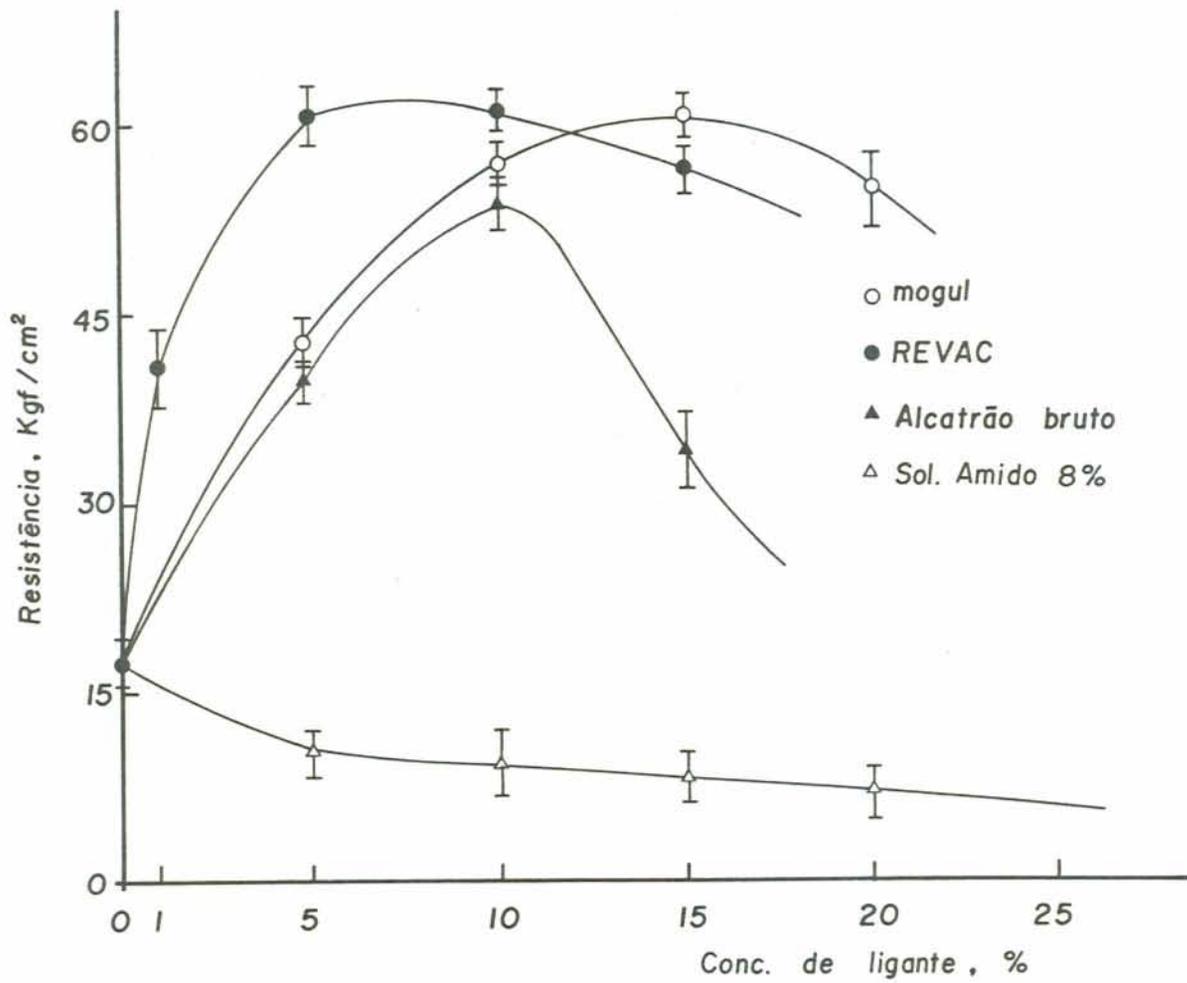


Figura 35 Influência da concentração e tipo de agente ligante na resistência à compressão dos briquetes no Carvão CE 5900.

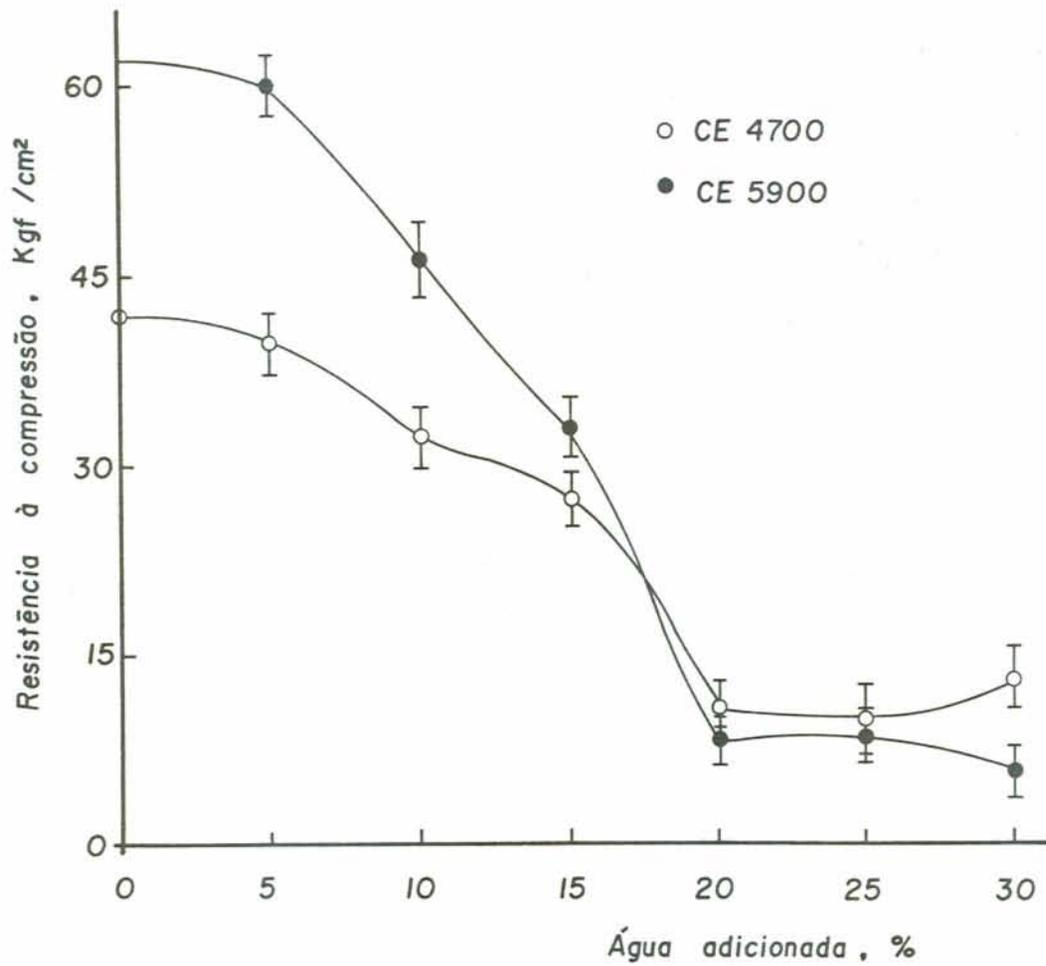


Figura 36 Influência do teor de umidade na alimentação no índice de resistência à compressão dos briquetes obtidos com gel de amido (9% em peso).

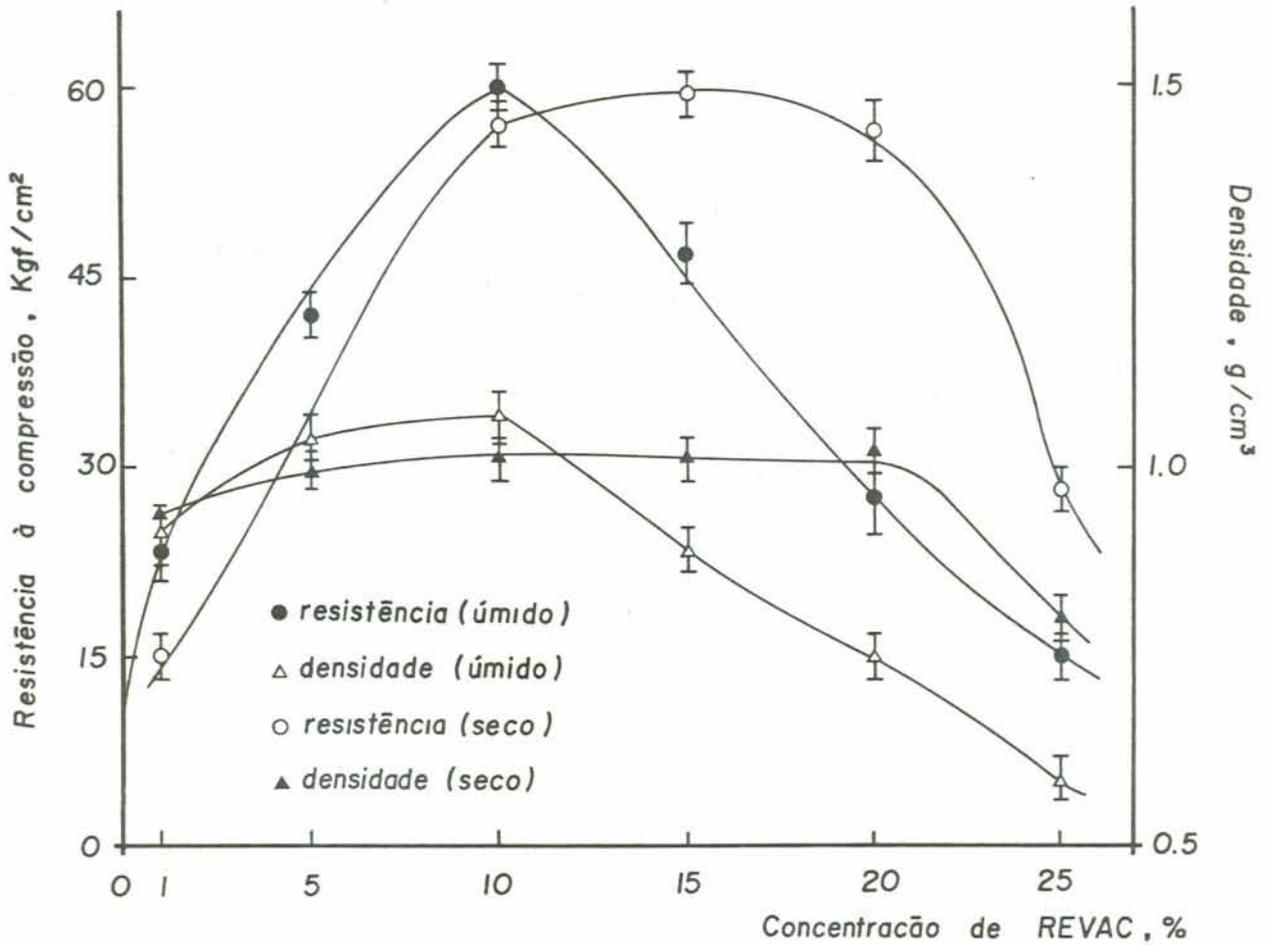


Figura 37 Influência do teor de umidade dos finos na resistência à compressão dos briquetes do carvão CE 4700.

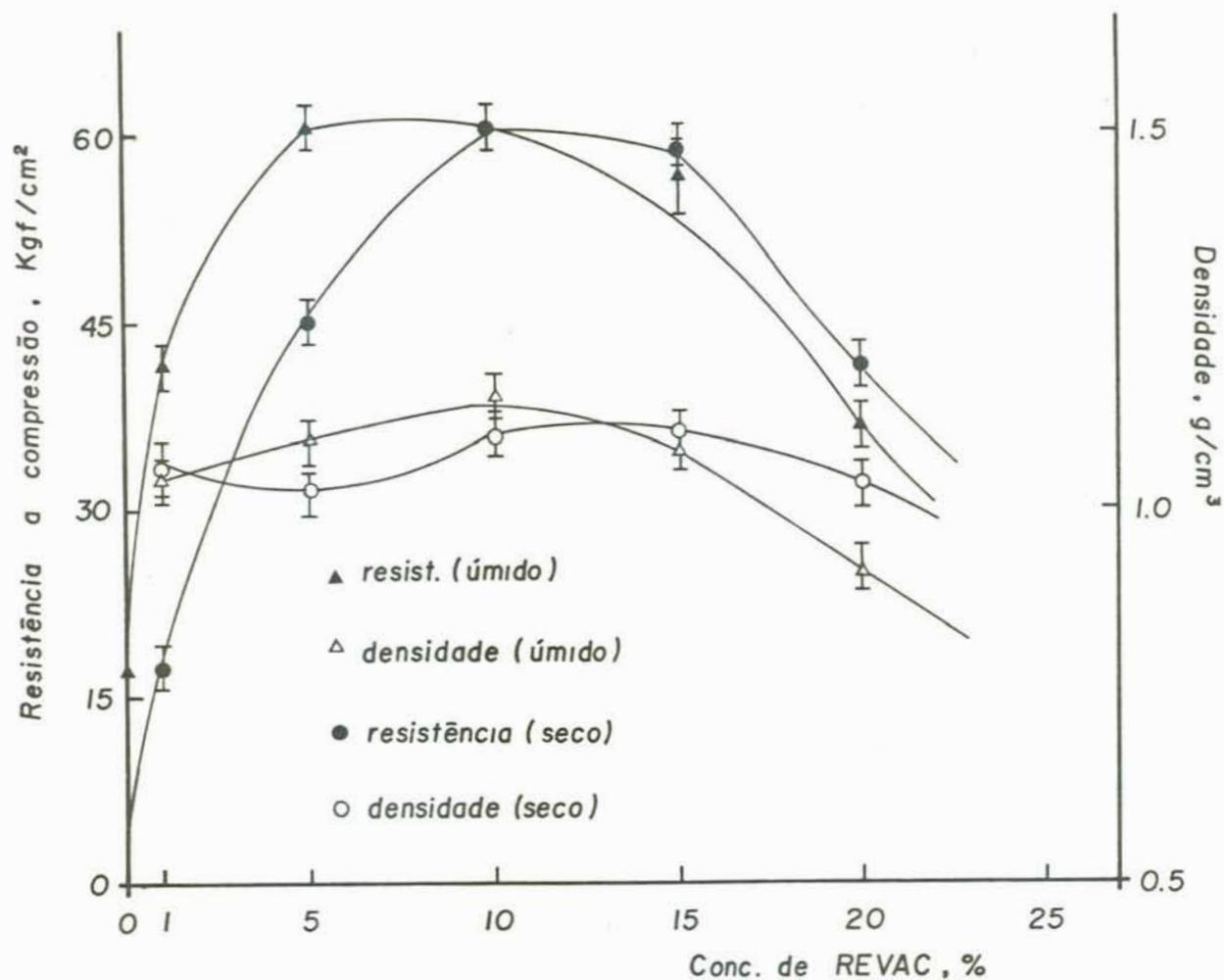


Figura 38 Influência do teor de umidade dos finos na resistência à compressão dos briquetes de carvão CE 5900.

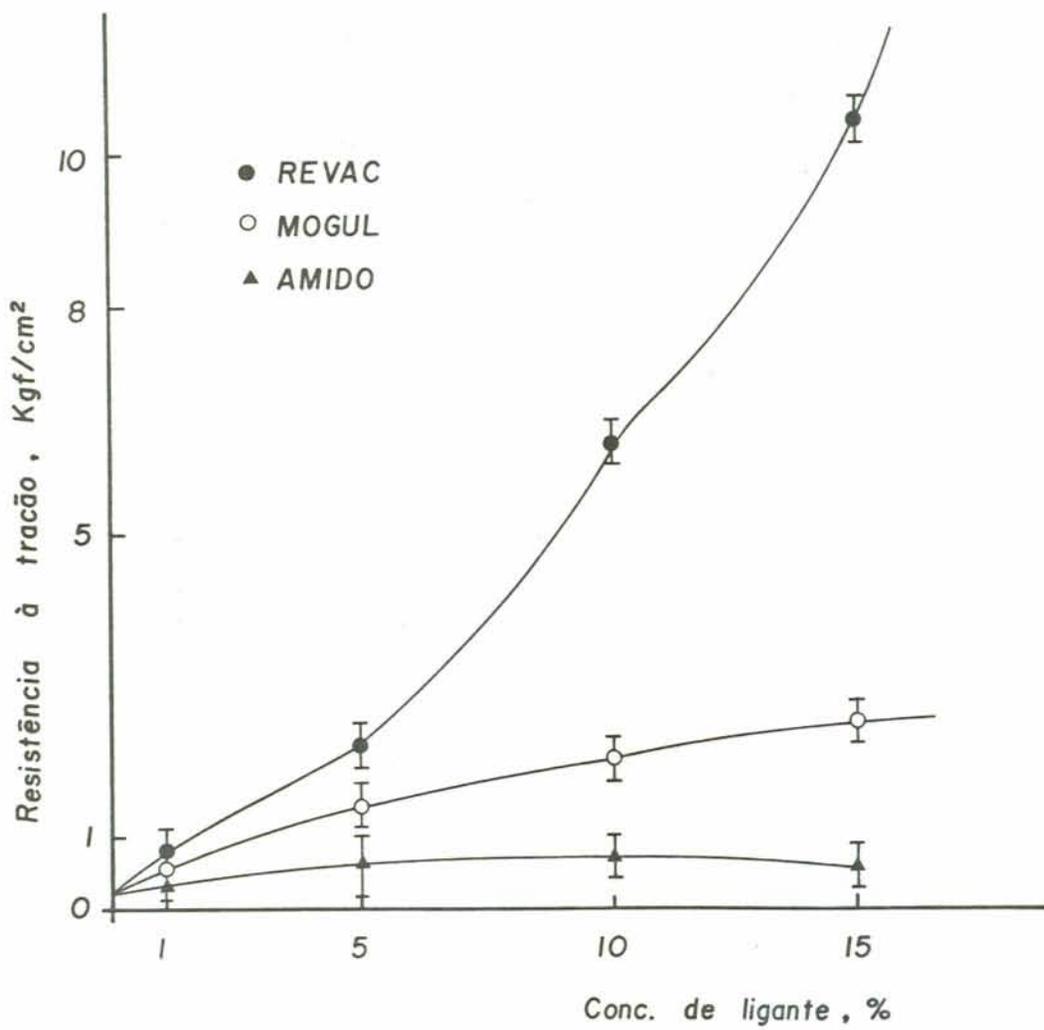


Figura 39 Influência da concentração e tipo de agente ligante na resistência à tração dos briquetes do carvão CE 4700.

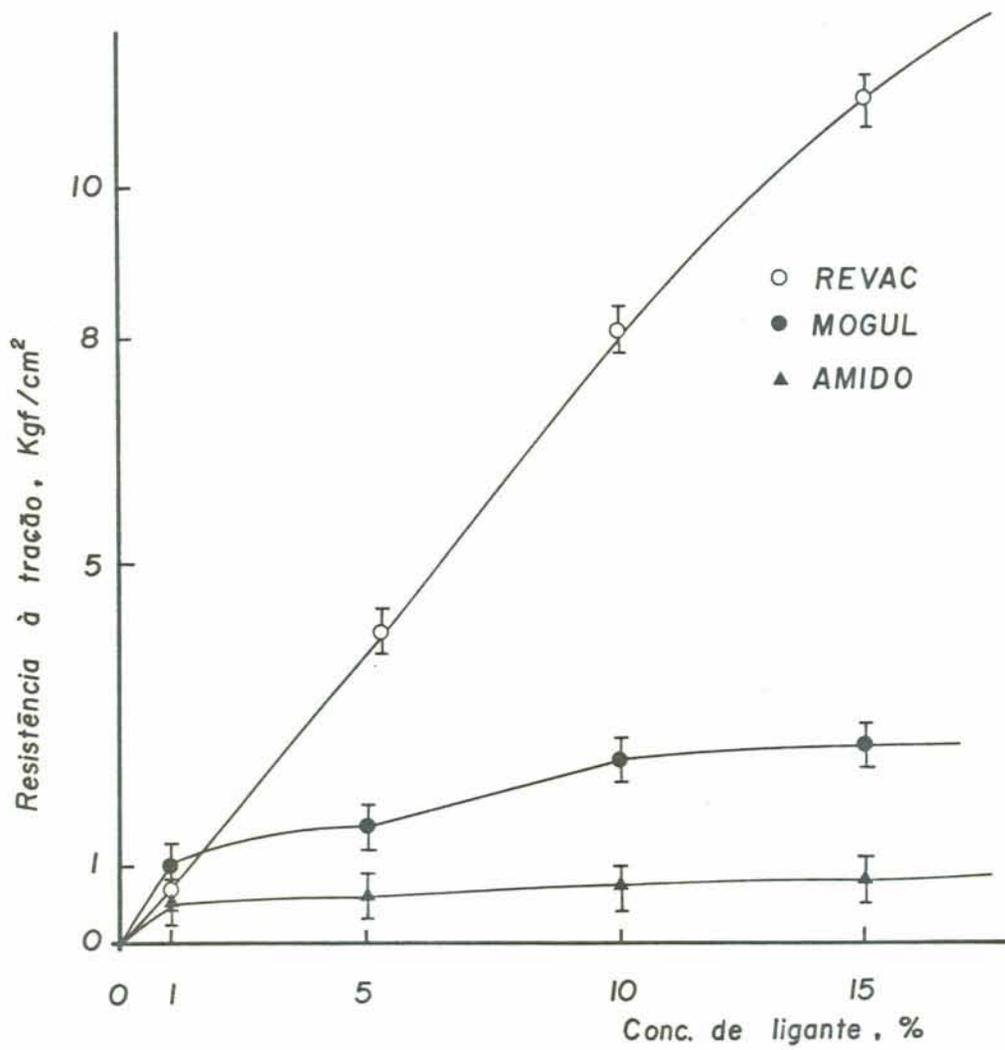
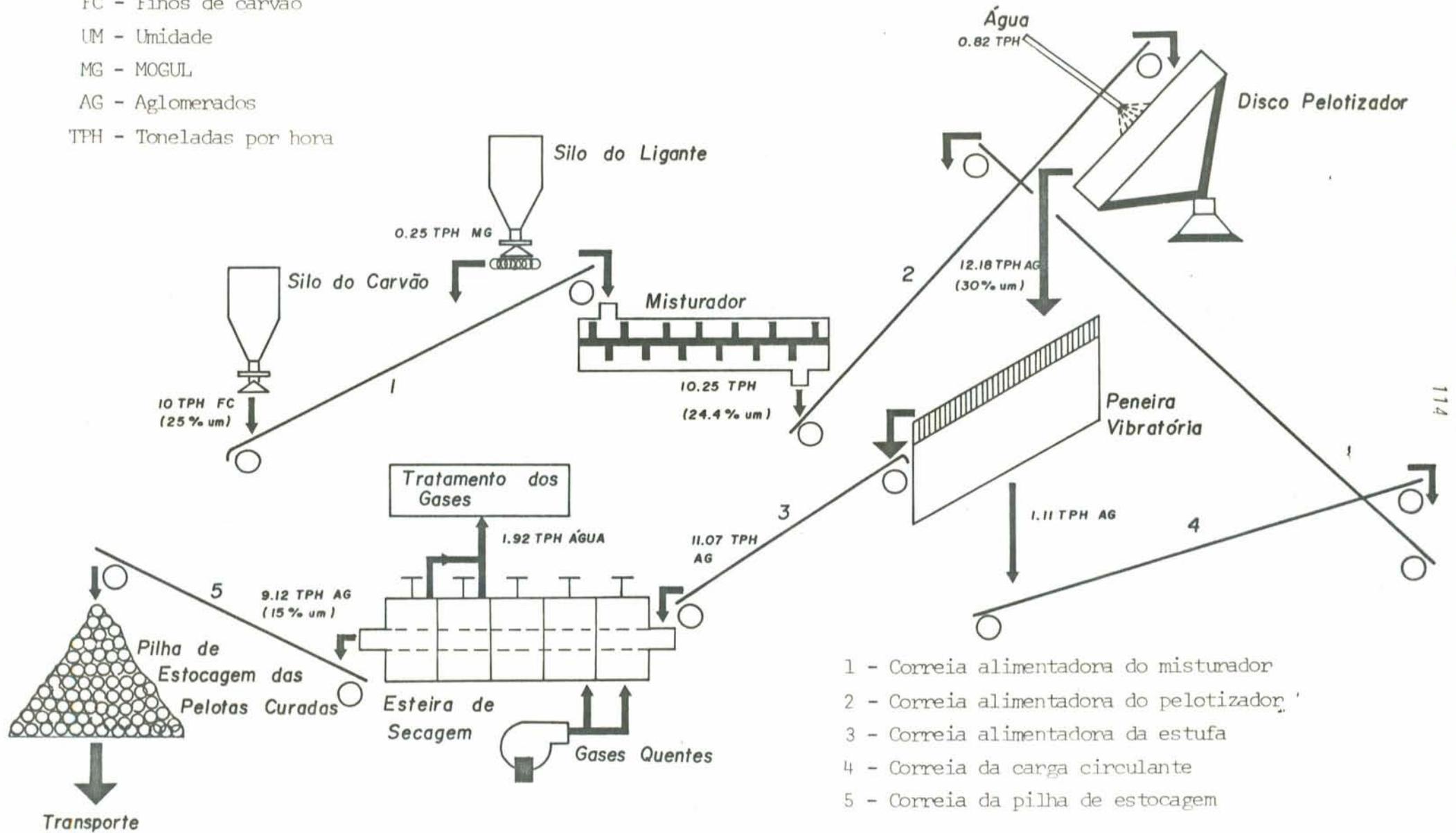


Figura 40 Influência da concentração e tipo de agente ligante na resistência à tração dos briquetes do carvão CE 5900.

FC - Finos de carvão
 UM - Umidade
 MG - MOGUL
 AG - Aglomerados
 TPH - Toneladas por hora



- 1 - Correia alimentadora do misturador
- 2 - Correia alimentadora do pelotizador
- 3 - Correia alimentadora da estufa
- 4 - Correia da carga circulante
- 5 - Correia da pilha de estocagem

Figura 41 Fluxograma conceitual de um circuito de pelotização de finos de carvão mineral.

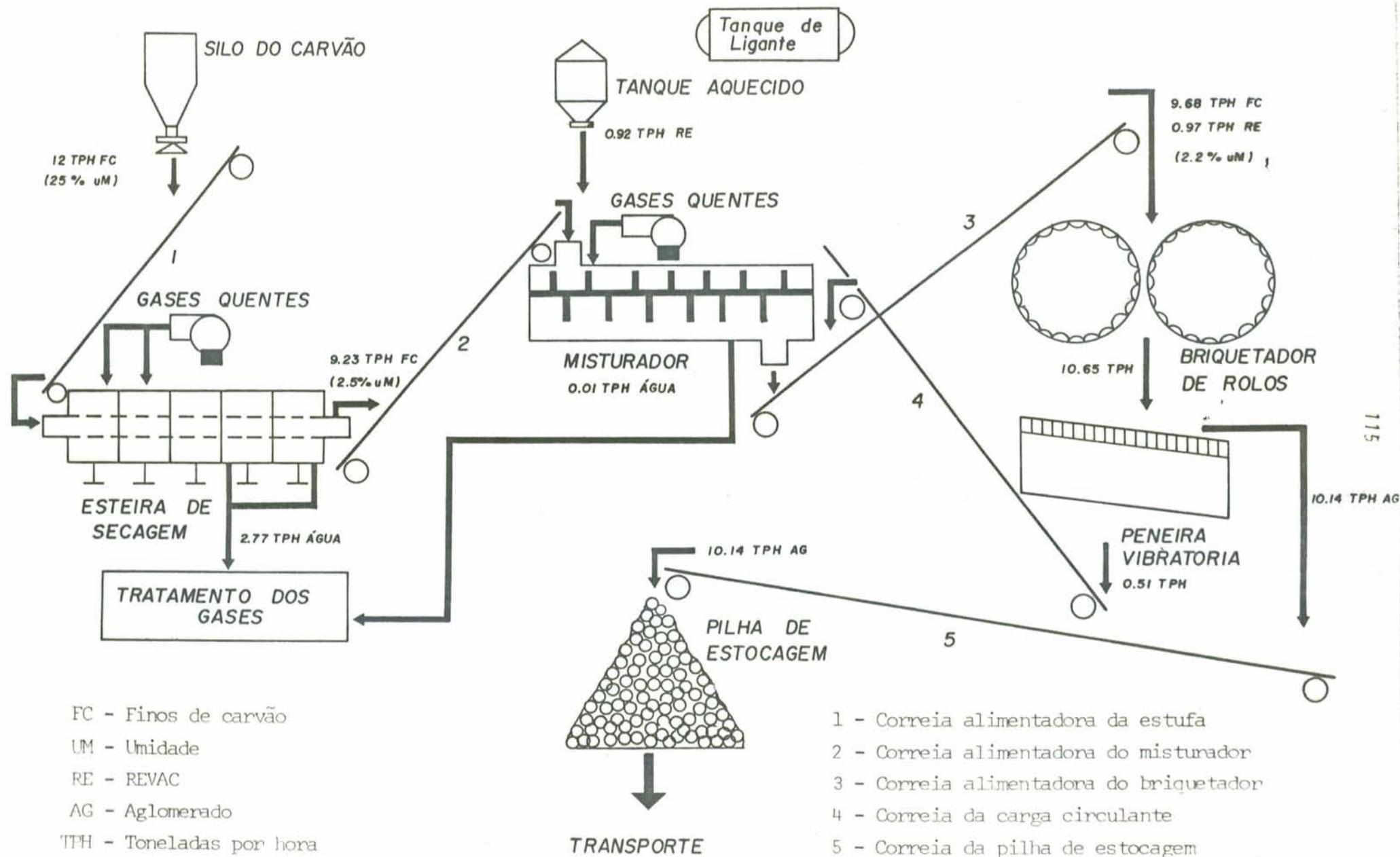


Figura 42 Fluxograma conceitual de um circuito de briquetagem de finos de carvão mineral.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais obtidos nos estudos de pelotização e briquetagem dos finos de carvão mineral da usina de beneficiamento da Mina Leão I, são possíveis as seguintes conclusões:

1. Os dois tipos de finos de carvão estudados são susceptíveis de serem aglomerados por pelotização e briquetagem. As diferenças entre os resultados obtidos devem-se, fundamentalmente, às variações na distribuição granulométrica e na umidade natural que estes dois tipos de finos apresentam.

2. A umidade ótima, em termos de crescimento e formação das pelotas, a partir dos finos de carvão, situou-se entre 30-40% (em relação à massa de carvão seco). Para valores menores de umidade, não houve pelotização e para valores acima desta faixa ocorreu a formação de uma massa pastosa com baixa qualidade de resistência mecânica.

3. Os melhores resultados de pelotização para as diversas temperaturas de cura testadas foram obtidas entre 80 e 100°C, (melhores valores de resistência); para temperaturas acima destes valores, obtiveram-se aglomerados com baixa resistência mecânica.

4. O melhor agente ligante na pelotização de ambos os carvões foi o MOGUL em concentração de 5% com secagem ótima a temperatura ambiente.

5. O resíduo de vácuo, REVAC, foi o melhor ligante na briquetagem dos finos de carvão, numa concentração de 10% em peso.

6. Os melhores resultados, em termos de grau de compactação,

foram obtidos para um tempo de comparação a partir de 0,5 minutos e uma pressão de moldagem entre 150 e 250 kgf/cm², para ambos os carvões.

7. Os aglomerados obtidos com o uso dos diversos ligantes estudados apresentaram menores teores de cinza e maiores poderes caloríficos em relação aos finos de carvão inconsolidados.

8. O circuito de pelletização apresentou os menores custos operacionais totais em relação à briquetagem, sendo que o consumo de ligante representou mais de um terço do total em ambos os processos de aglomeração.

6 SUGESTÕES

A seguir são feitas algumas sugestões para estudos posteriores:

1. Avaliação de outros tipos de agentes ligantes de pelotização (se existir) e verificação de outras variáveis operacionais que visem diminuir os custos operacionais dos processos.

2. Implantação de uma unidade piloto de pelotização, que se prestaria para verificar aspectos técnicos e operacionais e obter informações para um estudo econômico mais apurado, e por outro lado, a operação desta planta piloto, teria também grande importância no sentido de divulgar e orientar na tecnologia necessária neste processo de aglomeração.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SOARES, Melo. A problemática do carvão brasileiro. Carvão de Pedra, Rio de Janeiro, 10(67/70):3-5, ago./dez. 1978.
2. SEARA, Antonio Carlos. Carvão mineral no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO ESTADUAL DE QUÍMICA TECNOLÓGICA, 1, Porto Alegre, 1952. Anais. Porto Alegre, 1952. p.3-28.
3. SUSZCZYNSKI, Edison F. Avaliação dos recursos carboníferos e programas de mineração. Porto Alegre, Ministério das Minas e Energia, CPRM, 1979. 50p.
4. LOBO, Milton de Freixo. Transporte ferroviário: o principal problema para a substituição do óleo combustível pelo carvão energético. Carvão de Pedra, Rio de Janeiro, 12(78/80):2-10, ago./nov. 1979.
5. O MONOPÓLIO do carvão do Paraná e os projetos do governo federal. Carvão de Pedra, 10(67/70):2, ago./dez. 1978.
6. GAY, Alzir N. Carvão nacional: fonte confiável de energia, características, qualidades e uso. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Mineração, 1983. 25p.
7. LEISTER, Helena. Características de lavabilidade de carvões do Rio Grande do Sul. Engenharia, Mineração e Metalurgia, Rio de Janeiro, 11(243):93-5, mar. 1965.
8. GUGLIELMI, Realdo. Carvão. /s.l.p., s.c.p., pref. 1980/ 54p.
9. CONSELHO ESTADUAL DO CARVÃO MINERAL. Carvão mineral no Rio Grande do Sul, situação atual, sugestões e recomendações. Porto Alegre, 1983. 51p.

10. MOTA, José do Patrocínio. A utilização nacional do carvão riograndense. In: CONGRESSO ESTADUAL DE QUÍMICA TECNOLÓGICA, 2, Pelotas, 1955. Anais. Pelotas, 1955. p.99-186.
11. SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE EXTRAÇÃO DE CARVÃO. A batalha do carvão. Rio de Janeiro, 1950. 35p.
12. SCHNEIDER, A.W. Perspectivas dos principais recursos minerais do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Secretaria de Minas e Comunicações, CRM, 1975. 24p.
13. MILIOLI, Vanderlei A. & BRAN DALISE, Renato A. Beneficiamento do carvão de Santa Catarina no Lavador de Capivari S.A. In: TMH, 8, Porto Alegre, 23-27 nov., 1981. Anais. Porto Alegre, 1981. p.2-17.
14. Comunicação pessoal do Engº Fernando Zancan.
15. LEUSIN, J.C. Modificações na planta de beneficiamento da Mina de Leão I. In: TMH, 8, Porto Alegre, 23-27 nov., 1981. Anais. Porto Alegre, 1981. p.33-53.
16. _____. Companhia Riograndense de Mineração: expansão na capacidade de beneficiamento de carvão mineral. In: TMH, 8, Porto Alegre, 23-27 nov., 1981. Anais. Porto Alegre, 1981. p.54-76.
17. SOUZA, Tilo et alii. Evolução do desempenho e estado atual da unidade de beneficiamento de carvão da Aços Finos Piratini. In: TMH, 8, Porto Alegre, 23-27 nov., 1981. Anais. Porto Alegre, 1981. p.18-32.
18. ZADROZNY, Noberto Ingo. Carvão, geração de energia, transporte e comercialização. Florianópolis, GAPLAN, 1979. 77p.

19. RUBIO, Jorge. Utilização de finos de carvão mineral. In: ENCONTRO DE PESQUISADORES EM CARVÃO NO RIO GRANDE DO SUL, I, Porto Alegre, 2-6 sep., 1985. Anais. Porto Alegre, 1985. p.209-20.
20. MARTINS, Jader. Algumas notas sobre a pelotização a frio e a economia do óleo combustível no Brasil. Mineração e Metalurgia, Rio de Janeiro, 28(167):1-4, nov. 1958.
21. DRYDEN, I.G.C. Chemical constitution and reactions of coal. In: LOWRY, H.H. Chemistry of coal utilization. New York, J. Wiley, 1963. p.232-95.
22. LANDERS, W.S. & DONAVEN, D.J. Storage, handling and transportation. In: LOWRY, H.H. Chemistry of coal utilization. New York, J. Wiley, 1963. p.296-311.
23. CALHOUN, F.P. Coal pelletization. Minning Congress Journal, Denver, Colorado, 49(11):38-40, Nov. 1962.
24. SASTRY, K.V.S. & MEHROTRA, V.P. Pelletization of coal fines: state-of-the-art. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AGGLOMERATION, 3, Nurember, West Germany, May 1981. Proceedings. Nurember, West Germany, 1981. p.1-16.
25. SASTRY, K.V.S. & FUERSTENAU, D.W. Pelletization of fine coal. Berkeley, University of California at Berkeley, Electric Power Research Institute, 1982.
26. BERKOWITZ, N. Fundamental aspects of coal briquetting. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 3, Banff, Canada, Aug.31-Sept.2, 1953. Proceedings. Banff, Canada, 1953. p.3-23.
27. VEECK, Silvio. Briquetagem de finos de coque. Porto Alegre, UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Metalurgia e Materiais, 1980. Tese maestr.metalurgia.

28. MEHROTRA, V.R. & SASTRY, K.V.S. Influence of binders on the pelletization behavior of coal fines. Transactions of SME. New York, 272, 1982.
29. KOMAREK, K.R. Selecting binders and lubricants for agglomeration process. Chemical Engineering, New York, 84(26): 154-5, Dec. 1977.
30. PIETSH, W.B. Roll designs for briquetting: compacting machines. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 11, Sun Valley, Idaho, Aug. 27-29, 1969. Proceedings. Sun Valley, Idaho, 1969. p.145-63.
31. HARBISON, Charles R. A layman's introduction to pelletizing. in: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 15, Montreal, Aug. 1977. Proceedings. Montreal, 1977. p.153-60.
32. SAITO, Minoru. Development of the coal pelletizing from coal fines. Journal of Fuel Society of Japan, Tokyo, 46(446):71-82, 1966.
33. LUCKIE, P.T. & SPICER, T.S. The application of the pelletizing process to the U.S. coal industry. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 9, Denver, Colorado, Aug. 1965. Proceedings. Denver, Colorado, 1965. p.61-75.
34. GIBSON, J. Carbonization and coking. In: PITT, G.J. & MILWARD, G.R., ed. Coal and modern coal processing: an introduction. London, Academic Press, 1979. p.51-67.
35. AGGLOMERATION. Chemical Engineering, New York, 58(10):161-74, Oct. 1951.
36. LESHER, C.E. Agglomeration: a review. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 7, Wyoming, Aug.28-30, 1961. Proceedings. Wyoming, 1961. p.43-7.

37. ENGELLEITNER, William H. Selection of the proper agglomeration process. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 17, Reno, Nevada, Aug.1981. Proceedings. Reno, Nevada, 1981. p.231-45.
38. BROWNING, J.E. Agglomeration: growing larger in applications and technology. Chemical Engineering. New York, 74(25): 147-70, Dec. 1967.
39. LEAVER, Richard H. Fundamentals of pelleting: a ring-die-type extrusion process. In: BIENNIAL CONFERENCE OF IBA, 16, San Diego, Ca., Aug. 1979. Proceedings. San Diego, Ca., 1979. p.229-43.
40. SCHWEIZER, W.P. Extrusion as an approach to agglomeration. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 8, Denver, Colorado, Aug. 26-28, 1963. Proceedings. Denver, Colorado, 1963. p.229-43.
41. GIANINI, R.A. Briquetagem de carvão vegetal. Refinações de Milho, Brasil Ltda. São Paulo, 1985. 3p.
42. SASTRY, K.V.S. & MEHROTRA, V.P. Moisture requirements for pelletization of coal fines. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 17, Reno, Nevada, Aug.1981. Proceedings. Reno, Nevada, 1981. p.1-13.
43. GARCIA, Luiz Fernando S. Processos de pelotização. In: CONGRESSO DA ABM, 22, Vitória, jul.1967. Contribuição técnica, n.716. Vitória, 1967. p.879-88.
44. AGUIAR, F.P. Lira de. Sistema de pelotização da CVRD em Tubarão. Metalurgia: Revista da Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 23(110):31-5, jan. 1967.
45. DE LEON, A. & RUBIO, J. Aglomeração de finos de Carvão. In: TMH, 10, Belo Horizonte, 23-25 mai., 1984. Anais. Belo Horizonte, 1984. p.399-406.

46. EGAN, H.N. Pelletizing fine coal recovered from pumped refuse. Mining Engineering, New York, 19:73-5, 1967.
47. HOLLEY, Carl A. Binders and binder systems for agglomeration. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 17, Reno, Nevada, Aug. 1981. Proceedings. Reno, Nevada, 1981. p. 173-84.
48. SOUSA, Maria Luiza & RUBIO, J. Utilização de cinzas volantes por pelletização e sinterização. In: TMH, 10, Belo Horizonte, 23-25 maio., 1984. Anais. Belo Horizonte, 1984. p.315-20.
49. MARTINS, Jader. A carga circulante em tambor de pelletização e o efeito das variáveis do processo sobre as propriedades físicas da pelota crua. Metalurgia: Revista da Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 39(307): 303-6, jun. 1983.
50. HOLLEY, Carl A. & ANTONETTI, Joseph M. Agglomeration of coal fines. In: BIENNIAL CONFERENCE OF IBA, 15, Montreal, Aug. 1977. Proceedings. Montreal, 1977. p.1-12.
51. DAY, R.J. & WRIGHT, C.C. Increasing the value of coal silts by pelletization. Transactions of the AIME, New York, 117:380-404, 1948.
52. SCHINZEL, Walter & SILVA, R.C.M. da. Briquetagem e sua importância para a indústria carbonífera. In: TMH, 8, Porto Alegre, 23-27 nov., 1981. Anais. Porto Alegre, 1981. p-162-78.
53. STIRLING, Harold T. Benefication of coal slurry. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 15, Montreal, Aug. 1977. Proceedings. Montreal, 1977. p.27-40.

54. SASTRY, K.V.S. & MEHROTRA, V.P. Laboratory investigations on coal pelletization. Journal of Powder & Bulk Solids Technology, London, 5(4):1-5; 1981.
55. MESSMAN, Henry C. Binders for briquetting and agglomeration. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBRA, 15, Montreal, Aug. 1977. Proceedings. Montreal, 1977. p.173-8.
56. FURMAN, A.N. Pressurized feed for coal gasification. Coal Processing Technology, New York, (3):3-60, 1977.
57. OLDARER & GILLMORE. The hot extrusion of coal: a very sticky problem. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 13, Colorado Springs, Aug. 1973. Proceedings. Colorado Springs, 1973. p.157-65.
58. MADIGAN, D.C. Pelletizing: a review. AMDEL Bulletin, Park side, South Australia, (9):1-50, 1970.
59. SASTRY, K.V.S. & FUERSTENAU, D.W. Mechanims of agglomerate growth in green pelletization. Powder Technology, Amsterdam, 7:97-105, 1973.
60. KAPUR, P.C. & FUERSTENAU, D.W. Kinetics of green pelletization. Transactions of AIME, New York, 230:348-55, Dec. 1964.
61. CAPES, C.E. Mechanism of pellet growth in wet pelletization. I & EC Process Design and Development, Washington, 6(3):390-2, Jul. 1967.
62. SASTRY, K.V.S. & FUERSTENAU, D.W. Ballability index to quantify agglomerate growth by green pelletization. Transactions of the SME, New York, 252:254-8, 1972.

63. KAPUR, P.C. & FUERSTENAU, D.W. Size distributions and kinetic relationships in the nuclei region of wet pelletization. Industrial and Engineering Chemistry Process and Development, Washington, 5(1):5-10, Jan. 1966.
64. CAPES, C.E. & DANKWERTS, P.V. Granule formation by the agglomeration of damp powders. Transactions of the Institute on of Chemical Engineers, London, 43:116-24, 1965.
65. RIVA, W.J. et alii. Coal pelletizing studies for the vertical shaft carbonization process. The Canadian Mining and Metalurgical Bulletin, Ottawa, 57(621):52-6, Jan. 1964.
66. FLOYD JUNIOR, S.B. & ENGELLEITNER, W.H. The teory and prac tic of disc balling. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 10, Albuquerque, New Mexico, Aug. 15-17, 1967. Procee dings. Albuquerque, New Mexico, 1967. p.51-9.
67. GÜKSEL, M.A. & VALENTYIK, L. Production an evaluation of lignite pellets. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 16, San Diego, Ca., 1979. p.263-86.
68. PEARSE, J.F. et alii. The mechanism of the drying of solids. Transactions of the Institute on of Chemical Engineers, London, 27:1-8, 1949.
69. WAKEMAN, J.S. Method for the evaluation of data from the batch testing of green pellets. Transactions of the SME, New York, 252:83-6, 1972.
70. CAHN, D.S. & KERPINSKI, J.M. Compression testing of green and dry iron ore pellets. Transactions of the SME/AIME, New York, 241(4):475-81, Dec. 1968.
71. KAPUR, P.C. & FUERSTENAU, D.W. Dry stregh of pelletized spheres. Journal of the American Ceramic Society, Easton, Pa., 50(1):14-8, 1967.

72. MEYERS, M.A. & MEYERS, P.P. Ensaio mecânico de Pelotas: verificação da resistência à compressão. Metalurgia: Revista da Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 39 (305):199-201, abr. 1983.
73. _____. Ensaaios mecânicos em Pelotas: análise matemática do ensaio convencional. Metalurgia: Revista da Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 37(286):501-06, set. 1981.
74. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard method of tumbler test of coal: B411-45. Philadelphia, Pa., 1976.
75. CONKLE, H.N. et alii. Reconstitution of coal and limestone for use in industrial stoker boilers. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 18, Colorado Springs, Aug. 1983. Proceedings. Colorado Springs, 1983. p.33-54.
76. CHARMBURY, H.B. Pelletizing process recovers marketable coal from slumy. Mechanization, Washington, 26(1):41-4, Jan.1962.
77. JOHANSON, Jerry R. Feeding roll press for stable roll operation. In: bulk solids handling, Chausthal-West Germany, 4(2):417-22, Jun.1984.
78. RHYS JONES, D.C. Briquetting. In: LOWRY, H.H. Chemistry of coal utilization. New York, J. Wiley, 1963. p.675-753.
79. SILVA, Y.I.A. et alii. A briquetagem de carvões para fabricação de coque metalúrgico. Metalurgia: Revista da Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 36(267):95-9, fev. 1980.

80. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resistência à tração simples de argamassas e concreto por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: MB-212. Rio de Janeiro, 1958.
81. KOERNER, Robert M. & LORD JUNIOR, Arthur E. Strength behavior of briquettes as determined by acoustic emission. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 15, Montreal, Aug. 1977. Proceedings. Montreal, 1977. p.179-88.
82. MILLER, M.R. et alii. Coal briquetting without binder. In: BIENNIAL CONFERENCE OF THE IBA, 16, San Diego, Ca., Aug. 1979. Proceedings. San Diego, Ca., 1979. p.325-49.
83. FIELDNER, A.C. et alii. A study of the production of activated carbon from various coals and other raw materials. U.S. Dept. Commerce, Bureau of Mines. Tech. Paper, Washington, 479(479):1-29, 1939.
84. SHOTTS, R.Q. Screening. In: LEONARD, W.H. Coal preparation. s.l., AIME, 1968.
85. REFINAÇÕES DE MILHO BRASIL LTDA. Divisão de Produtos Industriais. Amido de milho e derivados no beneficiamento de carvão mineral. São Paulo, 1983. 12p.
86. MULAR, A.L. Mining and mineral processing equipment cost and preliminary capital cost estimations. The Canadian Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 25. Quebec, 1982. p.265.
87. Informação pessoal do Engº Ibã Ilha Moreira.