

Efeito das impurezas dos clínqueres coprocessados sobre sua quebra em Drop Weigh Tester (DWT)

Impurities effect from coprocessed clinkers on their breakage in Drop Weight Tester (DWT)

Resumo

Nesse estudo, é verificada a possível existência de correlação entre as impurezas presentes nos componentes cristalinos dos clínqueres coprocessados com sua resistência à quebra (determinada em Drop Weigh Tester - DWT). Esse ensaio é usado para prever a moabilidade desses materiais, fornecendo o parâmetro de impacto (A.b). Quanto maior o valor do parâmetro de impacto, menor é a resistência à quebra do clínquer. Para os clínqueres testados, foi, também, determinado o conteúdo médio (% em massa) de impurezas nas fases cristalinas, incluindo álcalis, bário, estrôncio, manganês e titânio. Para isto, foi usada microanálise com sistema de EDX (Energia dispersiva de Raios X) acoplado ao MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura). A análise estatística dos resultados químicos sugere forte correlação entre as impurezas e o parâmetro de impacto A.b.

Palavras-chave: Clínquer, cimento, moagem, DWT.

Abstract

In this study, the possible correlation between impurities presented in the crystalline compounds of the coprocessed clinkers and their breakage strength (determined by Drop Weigh Tester-DWT) is verified. This latter is used to predict the grindability of these materials by providing the impact parameter (A.b). The higher the impact parameter is, the lower the breakage strength is. For the tested clinkers, the average content (wt. %) of impurities in the crystallized phases, including alkalies, barium, strontium, manganese and titanium was determined. For this, microanalysis with an EDX (Energy Dispersive X-Ray) system coupled to the SEM (Scanning Electron Microscopy) was used. The statistical analysis of the chemical results suggests a strong correlation between the impurities and impact parameter.

Keywords: Clinker, cement, grinding, DWT.

Vlândia Cristina G. de Souza

Pós-Doutoranda, DEMIN - UFRGS
E-mail: vladiasouza@gmail.com

Jair Carlos Koppe

Prof. Dr., DEMIN- UFRGS
E-mail: jkoppe@ufrgs.br

João Felipe Coimbra Leite
Costa

Prof. Dr., DEMIN- UFRGS
E-mail: jfelipe@ufrgs.br

1. Introdução

Cada propriedade do clínquer e, por conseguinte, do cimento, é o resultado de um ou mais processos químicos complexos de equilíbrio, os quais se desenrolam durante a sua queima no forno. Em função disso, o clínquer deve ser produzido de forma controlada, com respeito às razões entre os quatro compostos químicos principais (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , SiO_2). Por outro lado, diferenças na composição química podem ocorrer, mesmo entre clínqueres produzidos com as mesmas razões, em especial, devido à presença de elementos externos a este sistema, tais como MgO e SO_3 , entre outros. Esses elementos estranhos (*foreign ions*), menores ou substituintes, constituem o que se denomina, geralmente, de impurezas. Por sua vez, esses elementos estranhos são introduzidos no sistema pelas matérias-primas utilizadas e/ou pelo coprocessamento ou, ainda, por meio de adições (Centurione, 1993; Sato, 2004). O coprocessamento consiste em incinerar resíduos industriais durante a fabricação do clínquer no forno, o que faz com que, geralmente, haja uma maior quantidade e variedade de elementos estranhos. As adições, por outro lado, são feitas em menores quantidades e com algum objetivo específico, o qual, em geral, consiste em reduzir a temperatura de formação dos componentes do clínquer e/ou de promover a formação do seu componente principal, a alita, ou, ainda, torná-la de alguma forma mais reativa. Entre as adições está, por exemplo, o flúor utilizado em processos mineralizadores, o qual, presente em reduzidas quantidades, teoricamente, leva à estabilização de uma forma mais reativa de alita (Centurione, 1999).

Ainda, a adição dessas impurezas torna o estudo do quimismo das fases dos clínqueres muito mais complexo, tendo sido presumido, inicialmente, que elas poderiam modificar drasticamente diversas propriedades dos clínqueres (Taylor, 1990; Maringolo, 2001). Elas poderiam, inclusive, afetar a resistência à quebra dos seus nódulos. Se as impurezas afetam a resistência à

quebra dos nódulos de clínquer, então, elas, também, exercem influência no seu processo de moagem. Como esse processo é extremamente ineficiente, além de representar quase 40% dos custos totais de uma fábrica de cimento, estudos relacionados à quebra do clínquer tornam-se importantes. O estudo do efeito dos elementos estranhos no consumo de energia na moagem consiste em identificá-los, quantificá-los e, muitas vezes, em verificar a sua forma de distribuição no clínquer. Por isso, esse tipo de estudo pode ajudar, também, no controle da queima do clínquer, visando à fabricação de produtos de melhor qualidade e de menor custo econômico e ambiental possível.

Esse trabalho, nesse sentido, visa a apresentar uma metodologia capaz de mensurar se esse efeito é pronunciado ou não e determinar, por sua vez, as quantidades em que essas impurezas passariam a ter algum efeito (Souza, 2007). Essa metodologia baseia-se na execução de análises químicas por EDX (MEV) e de ensaios no equipamento *Drop Weight Tester*. Esses ensaios fornecem, entre outras informações importantes, o parâmetro de impacto A.b ou resistência à quebra dos clínqueres, visando à previsão de consumo de energia na moagem, sendo que: quanto maior o valor do parâmetro de impacto A.b menor a resistência à quebra do nódulo.

2. Materiais e métodos

O *Drop Weight Tester* (DWT) foi introduzido no JKRCM, Austrália, para substituir o teste do duplo pêndulo para analisar as características de quebra por impacto de minérios (Napier-Munn et al., 1996; Chieregati, 2001). Um esquema do equipamento utilizado é mostrado na Figura 1. O DWT consiste em um peso de aço montado por meio de duas guias, tal como ilustrado em Napier-Munn et al. (1996). Um dispositivo elétrico é utilizado para elevar ou abaixar o peso a uma altura determinada em função do nível de energia desejado. O peso é solto por um sistema pneumático ou elétrico e cai por gravidade sobre uma partícula (nesse caso nódulo de clínquer) de cada vez, colocada sobre uma barra-suporte ou âncora de aço, que se encontra fixa a um bloco de concreto. Todo o sistema, em realidade, está montado em uma estrutura de aço, a qual está fixa a esse bloco de concreto. Modificando a altura do peso, bem como a massa do peso solto, uma larga faixa de níveis de energia pode ser testada.

Todas as amostras de clínquer foram coletadas sobre a correia de alimentação dos moinhos de cimento, em intervalos regularmente espaçados, totalizando cerca de 300 kg por coleta. As amostras foram identificadas de acordo

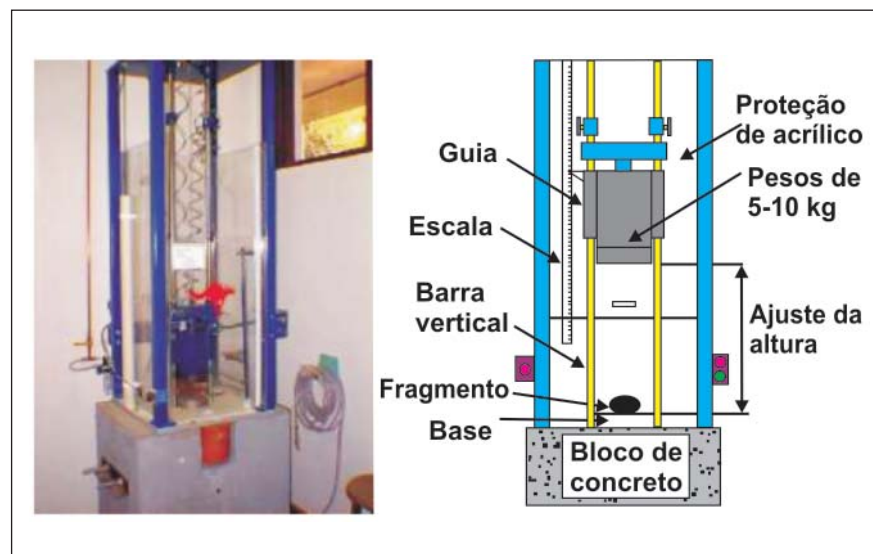


Figura 1 - Foto e, ao lado, esquema ilustrativo do Drop Weight Tester (DWT) utilizado.

com o forno e o número da campanha amostral que lhes deram origem. Foram coletadas amostras manufaturadas em onze fornos diferentes, os quais estão distribuídos pelo Brasil (unidades de São Paulo, Bahia, Rio Grande do Sul, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Paraná, entre outros estados, participaram desse estudo). Assim, as amostras provenientes do forno 1 foram denominadas K1. Os códigos das amostras compostas são apresentados nas Tabelas de resultados. Ao lado de cada um deles, um número romano entre parêntese foi adicionado. Esse número se refere à campanha amostral realizada, de tal forma que, por exemplo, amostras com denominaao “K1(I)” significam que foram coletadas a partir do forno 1 e que foram coletadas durante a primeira campanha amostral realizada na correia de alimentaao do moinho que processava o material desse forno. Amostras com denominaao “K2 (III)” significam que foram coletadas no forno 2 e que foram coletadas durante a terceira campanha amostral e assim por diante. Em certas ocasiões, uma unidade de fabricaao possuía mais de um forno e, ainda, a origem exata das amostras (de que Estado do Brasil ou unidade processadora provinham) não era revelada, devido ao interesse dos grupos financiadores do trabalho em manter essas informaçoes em sigilo e poderem comparar seus resultados com os que estavam sendo fornecidos pela Universidade.

Em seguida, a amostra era homogeneizada e quarteada por meio da montagem de uma pilha longitudinal e o material era classificado por tamanho.

Os níveis de energia adotados no ensaio e as fraoes de tamanho de partículas escolhidas são funoes do tipo de equipamento e/ou dos pesos utilizados. O equipamento utilizado neste caso não possibilita o uso de níveis de energia maiores que 1kWh/t ou partículas menores que a fraao de tamanho -13,0mm +9,0 mm. Isto ocorre porque, para partículas abaixo desse tamanho, a altura de lançamento do peso ficaria muito reduzida (abaixo de 10 cm) e, em níveis de energia maiores que 1kWh/t,

o material sofreria pulverizaao e as funoes de quebra obtidas não seriam confiáveis (Souza, 2007). Felizmente, as fraoes de tamanho e níveis de energia que foram escolhidas são suficientes para a determinaao dos parâmetros de interesse.

A metodologia dos ensaios baseou-se em uma adaptaao das metodologias empregadas por Chieregati (2001) e aquela indicada como padrão (ensaio convencional) utilizado no JKRCM (Napier-Munn et al., 1996).

No caso desse trabalho, visando, essencialmente, a estabelecer uma comparaao entre os parâmetros de resistência dos clínqueres e relacioná-los com suas características físicas (porosidade) e químicas, foram utilizados três lotes de trinta partículas cada, para cada fraao de tamanho e para cada nível de energia. Assim sendo, foram utilizadas cinco fraoes de tamanho (-25,4mm +22,2mm, -22,2mm +19,0 mm, -19,0mm +15,9 mm, -15,9+13,5 mm, -13,5+12,7 mm) e três níveis de energia ao todo (0,25; 0,50 e 1,0 kWh/t). Isto totalizou cerca de noventa partículas por fraao por nível de energia, ou seja: 90 x 5 x 3 = 1.350 partículas ou quebras para cada tipo de clínquer, número, geralmente, suficiente para fornecer distribuoes de produto de quebra normais.

A preparaao das amostras para análises por microscopia eletronica de

varredura (MEV/EDX) e, em especial, de porosidade (em microscópio óptico a luz refletida) foi realizada seguindo procedimentos descritos detalhadamente em Souza (2007).

Nesse trabalho, foram realizadas 20 análises pontuais de EDX por fase e por seao polida analisada, utilizando-se 23 seoes polidas por clínquer em média. Completadas as análises de EDX para um clínquer, eram registrados os conteúdos médios de cada impureza.

Depois, as amostras de clínquer foram agrupadas, para melhor visualizaao dos resultados, em dois grandes grupos, separando clínqueres com elevada resistência à quebra por impacto (Grupo I) daqueles com moderada a baixa resistência (Grupo II). O agrupamento respeitou a origem das amostras (forno e campanha amostral), ou seja, não foram misturadas amostras de clínqueres diferentes. Para separar os clínqueres, usou-se um valor de corte igual a 52 para o parâmetro de impacto A.b (Figura 2).

As distribuoes de freqüência dos teores médios de cada impureza analisada para cada Grupo foram observadas, registrando-se a média e a variância. Em seguida, foram analisados possíveis valores de “corte” (X1) de tal forma que fossem consideradas duas hipóteses:

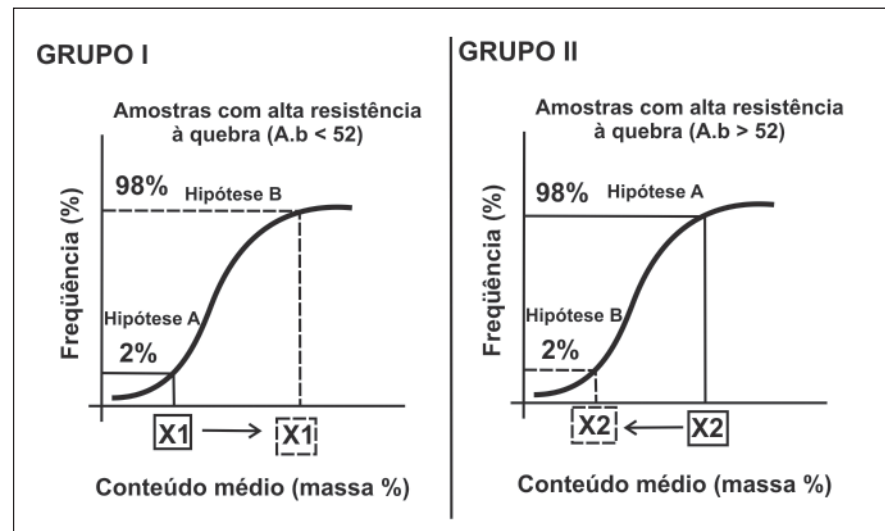


Figura 2 - Grupos de amostras de clínqueres separados por teor de corte do parâmetro de impacto A.b.

(A)Clínqueres com alto conteúdo de impurezas ou de um elemento específico são clínqueres com elevada resistência à quebra em DWT.

(B)Clínqueres com baixo conteúdo de impurezas ou de um elemento específico são clínqueres com elevada resistência à quebra em DWT.

A definição de conteúdo elevado ou baixo ficou baseada nos “valores de corte” estabelecidos conforme mostrado nas Figuras 2 e 3.

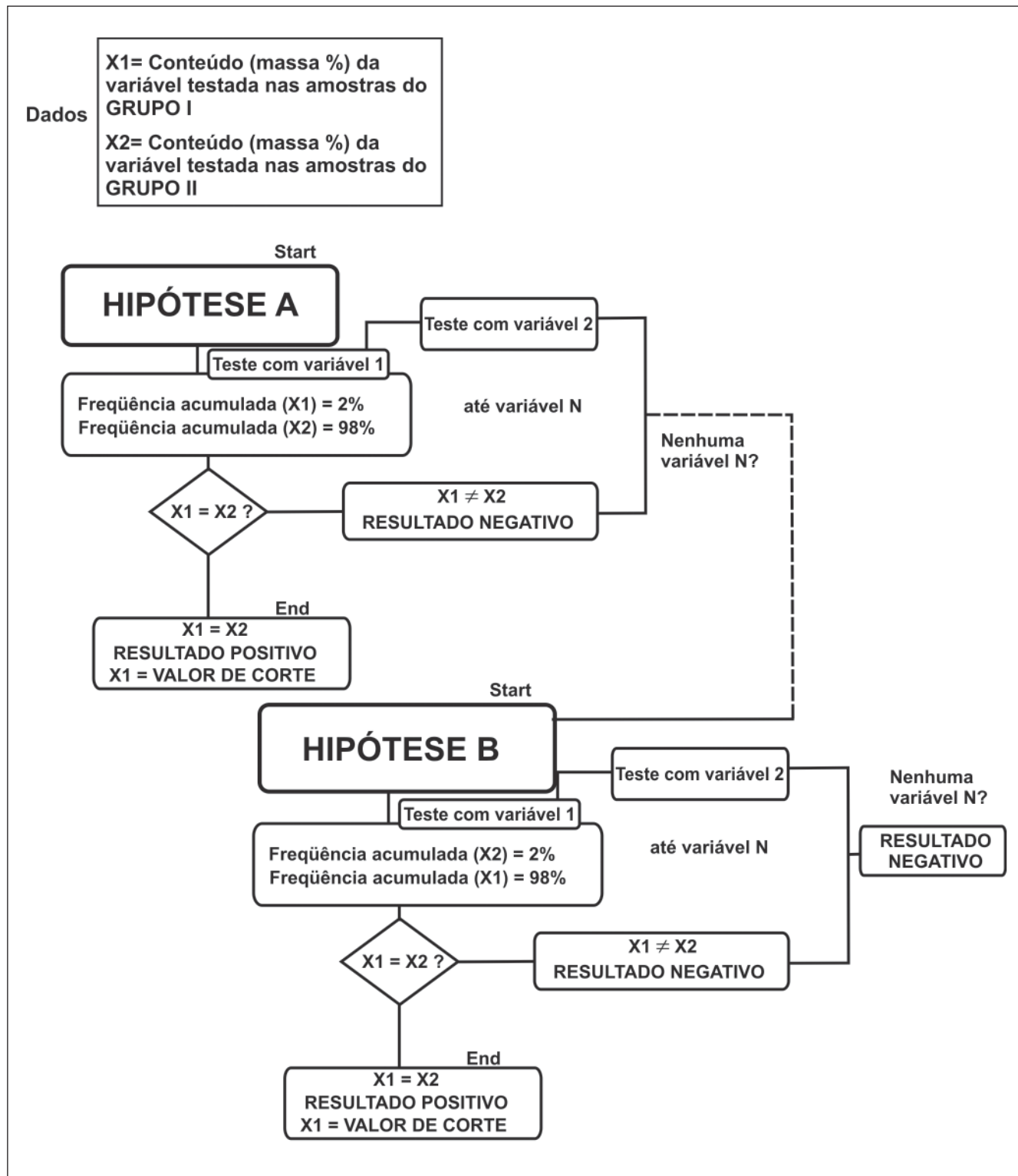


Figura 3 - Fluxograma da metodologia aplicada à classificação dos clínqueres e definição dos teores de corte.

Assim, para testar a hipótese A, por exemplo, observou-se a freqncia acumulada dos valores de K_2O (% massa). Nela, verificou-se a possibilidade de existência de um valor “x”, em que 98% das amostras do Grupo I tivessem contéudo maior que esse. Simultaneamente era verificado se 98% das amostras do Grupo II tinham contéudo menor que este. Se o resultado fosse negativo ($X1 \neq X2$), então era testada outra variável, como, por exemplo, a relao entre os lcalis K_2O+Na_2O ou K_2O/Na_2O , etc. Posteriormente, para os resultados negativos, era verificada a hipótese B, ou seja: se existia um valor “x” daquela impureza em que 98% das amostras do Grupo I tinha contéudo menor e 98% do Grupo II tinha contéudo maior.

Depois de determinados os teores de corte, uma classificao foi feita, atribuindo-se valores “1” aos clnques com concentraes acima do corte e “0” àqueles abaixo do corte, conforme apresentado na Tabela 1. A soma dos valores atribuídos constitu então, no final, o parâmetro químico “S”, o qual foi utilizado para analisar o efeito simultâneo da porosidade e da química dos cristais sobre a resistência dos nódulos grosseiros em DWT.

3. Resultados e discussão

Conforme mostrado na Tabela 2, os clnques testados apresentaram uma larga faixa de valores de resistência, com parâmetro de impacto variando de 31 a 112. Por outro lado, na indústria, em geral, são mais freqüentemente encontrados clnques com moderada a alta resistência ao impacto ($A.b < 52$) de acordo com Souza (2007). Isto ocorre porque esse parâmetro está fortemente correlacionado  porosidade do clínquer e a indústria, normalmente, assume o princípio de que, quão mais poroso o clínquer, menor  o seu contéudo de alta, o que pode diminuir a resistência do cimento produzido, ou seja, a indústria possui procedimentos de controle de qualidade da queima, os quais evitam, na maior parte das vezes, que clnques “muito porosos” sejam produzidos.

Ainda, na Tabela 2, foi atribuído o valor “1” para aqueles clnques com porosidade menor que 25% e o valor “0” para os clnques com porosidade maior que 25% na coluna referente a esse parâmetro. Pode ser percebido, então, que 90% dos clnques com alta resistência  quebra por impacto (DWT) possui porosidade menor do que 25% em mdia. Se observado o grupo de clnques com resistência menor ao impacto ($A.b > 52$),  verificado que apenas dois clnques apresentam porosidade menor que 25%. Esses clnques apresentam A.b de apenas 54 a 58 e so clnques com elevado contéudo de belitas arredondadas, as quais proporcionam maior resistência  fratura aos cristais (Hills, 2007; Campbell, 1999).

A resistência dos clnques geralmente mostra dependência da frao de tamanho de nódulo testada. Quanto maior a resistência  quebra do clínquer mais fraca  a sua dependência do tamanho inicial, como qualquer outro material ensaiado em DWT, ou seja, clnques pouco porosos mostrarão, a princípio, grande quantidade de resistência; sendo A.b independente do tamanho inicial. Por outro lado, quanto mais poroso ou heterogneo for o clínquer, maior será o efeito da reduo do tamanho do nódulo sobre o parâmetro A.b, conforme mostrado em Souza (2007). Na Tabela

2, no entanto, são apresentados somente os valores médios do parâmetro de impacto A.b de cada clínquer, pois este está fortemente correlacionado ao contéudo médio de determinadas impurezas, tais como álcalis, bário e metais de transio.

A Figura 3 e a Tabela 2 ilustram que, quatro entre quatro clnques testados com contéudo elevado de lcalis (K_2O+Na_2O), de metais de transio ($MnO+TiO_2$) e de SrO (contéudo $\geq 1\%$, 1% e 0,7%, respectivamente), além de reduzido contéudo de bário ($< 0,7\%$), mostraram-se pouco porosos e, tmbm, bastante resistentes  quebra ($A.b < 52$); foram eles: K1(I), K1(V), K10(II) e K10(I), ou seja, amostras provenientes dos fornos 1 e 10 coletadas durante campanhas amostrais distintas.

Por outro lado, cinco entre seis clnques testados com contéudo baixo de impurezas (parâmetro químico $S \leq 2$) mostraram-se pouco resistentes  quebra ($A.b > 52$); foram eles: K4(II), K4(I), K3(I), K11, K5 e K8(I). Ainda, dentre esses mesmos clnques, apenas dois mostraram porosidade menor que 25%.

A Figura 4 apresenta os resultados em termos do parâmetro químico S: no grupo I (alta resistência  quebra), predominam os clnques com maior contéudo de álcalis, metais de transio, SrO e PbO. Esse grupo apresentou tmbm

Tabela 1 - Regras de classificao dos clnques segundo valores de corte dos teores de impurezas contidas nos cristais.

Conteúdo médio dos cristais	Valor atribuído*
De lcalis (Na_2O+K_2O) $\geq 1,0\%$	1
De metais de transio (TiO_2+MnO) $\geq 1,0\%$	1
De SrO $\geq 0,7\%$	1
De BaO $\geq 0,7\%$	1
De metais pesados (PbO) $\geq 0,7\%$	1
Parâmetro químico (S) = Soma dos valores atribuídos	Mínimo: 0 Máximo: 5

Nota: *Se o contéudo médio dos cristais fosse menor do que o valor especificado nessa tabela, então o clínquer recebia valor “0”.

Tabela 2 - Classificação dos clínqueres segundo parâmetros químicos e físicos (porosidade) e sua relação com parâmetro de impacto (A.b).

A.b*	Clínquer	Parâmetros químicos (EDx) – Valores atribuídos					Porosidade	Parâmetro químico (S)
		K ₂ O+Na ₂ O	MnO+TiO ₂	SrO	BaO	PbO		
		< 1,0% = 0 ≥ 1,0% = 1	< 1,0% = 0 ≥ 1,0% = 1	< 0,7% = 0 ≥ 0,7% = 1	< 0,7% = 0 ≥ 0,7% = 1	< 0,7% = 0 ≥ 0,7% = 1	< 25% = 1 ≥ 25% = 0	
31	K1 (II)	1	1	1	0	1	1	5
31,5	K1 (I)	1	1	1	0	1	0	4
37	K4 (II)	0	0	0	1	0	1	2
39	K1 (VI)	1	1	0	0	1	1	4
40	K1 (V)	1	1	1	0	1	1	5
43	K10 (II)	1	1	1	0	0	1	4
44	K2 (II)	0	1	1	1	1	1	5
48	K2 (III)	0	1	1	1	1	1	5
49	K8 (II)	1	0	0	1	0	1	3
52	K10 (I)	1	1	1	0	0	1	4
SOMA		7	8	7	4	6	9	41
54	K4 (I)	0	0	0	1	0	1	2
55	K3 (I)	0	0	0	0	0	0	0
58	K3 (II)	0	1	1	1	0	1	4
62	K11	1	0	0	0	0	0	1
63	K5	0	0	0	1	0	0	1
72	K7	0	1	0	1	1	0	3
74	K6	1	1	0	1	1	0	4
88	K8 (I)	1	0	0	1	0	0	2
112	K9	1	0	1	1	0	0	3
SOMA		4	3	2	7	2	2	20

Nota: K1(II) significa amostras de clínquer do forno K1, segunda campanha amostral. *Parâmetro de impacto A.b médio das cinco frações de tamanho testadas de cada clínquer. Todos os conteúdos citados nesse trabalho referem-se a % em massa média contida nos cristais do clínquer.

menor porosidade, em contraposição aos clínqueres do grupo II, com menor concentração daqueles elementos, mas uma quantidade significativamente maior de bário. Os clínqueres do grupo II, portanto, destacam-se por terem poucas impurezas, a despeito do elevado conteúdo de bário, apresentando elevada porosidade (> 25%) e baixa resistência à quebra.

Podem, também, ser feitas outras inferências com relação aos valores da

Tabela 2, pois eles nos mostram que dois em quatro clínqueres com elevado conteúdo de metais de transição (MT), bário e chumbo, têm A.b < 52. Isto leva à suposição de que poderia estar ocorrendo um efeito compensador entre bário e demais impurezas. Se analisadas as amostras com essas mesmas características, mas que também contenham SrO acima de 0,7%, verifica-se que 100% das amostras apresentam A.b < 52. Entre as mesmas amostras ricas em Ba, MT e Pb, mas

com SrO < 0,7%, observa-se que 100% mostram A.b entre 52 e 74 (resistência à quebra baixa a moderada). Ainda, entre as amostras ricas em Ba e álcalis, observam-se valores de A.b > 74. Logo, também, é possível supor que isto ocorra em função da substituição parcial de Ca, ora por Sr, ora por Ba nos clínqueres. Entre esses três elementos, considerando essa mesma ordem, há uma redução da eletronegatividade e aumento do raio atômico. Isto sugeriria que com a entrada

do Ba, no lugar do Sr, haveria maior distorção do retículo, o que se refletiria no aumento do valor de microdureza dos cristais (Souza, 2007). Ainda, quão menos eletronegativos forem os elementos presentes, maior a viscosidade do líquido e menor a quantidade final de silicatos formados no clínquer (Taylor, 1990). Por sua vez, um baixo conteúdo de silicatos, bem como a elevação da microdureza dos cristais, poderia tornar os nódulos do clínquer menos resistentes à quebra. Os resultados obtidos para os clínqueres K7 e K6, por exemplo, os quais concentraram o bário preferencialmente em cristais da matriz, sugerem que eles têm forte influência na quebra dos nódulos em DWT.

Ainda a Tabela 2 mostra que existe forte correlação entre os parâmetros porosidade e impurezas, o que significa que eles podem ter agido como mineralizadores, ou seja, facilitaram de alguma forma o crescimento e a estabilização dos silicatos, reduzindo a porosidade e elevando a resistência à quebra dos nódulos grosseiros, com exceção do bário, o qual mostrou ter um efeito contrário ao das demais impurezas analisadas. Assim, é, também, interessante notar que tais observações podem servir a ambos os objetivos:

- (A) Estimar parâmetro de impacto A.b, analisando impurezas em amostras de clínquer por meio de MEV/EDX.
- (B) Estimar conteúdo de impurezas e porosidade por meio de ensaios de DWT.

Finalmente, essa sistemática de agrupamento das amostras foi usada para tentar observar a intensidade dos efeitos das impurezas sobre a resistência à quebra por impacto dos clínqueres. Por outro lado e a despeito das fortes correlações, ela não garante que as impurezas sejam as únicas responsáveis pela variação da resistência à quebra dos clínqueres, ou seja, outros fatores devem ser analisados, tais como: composição mineralógica, textura e condições de queima dos clínqueres.

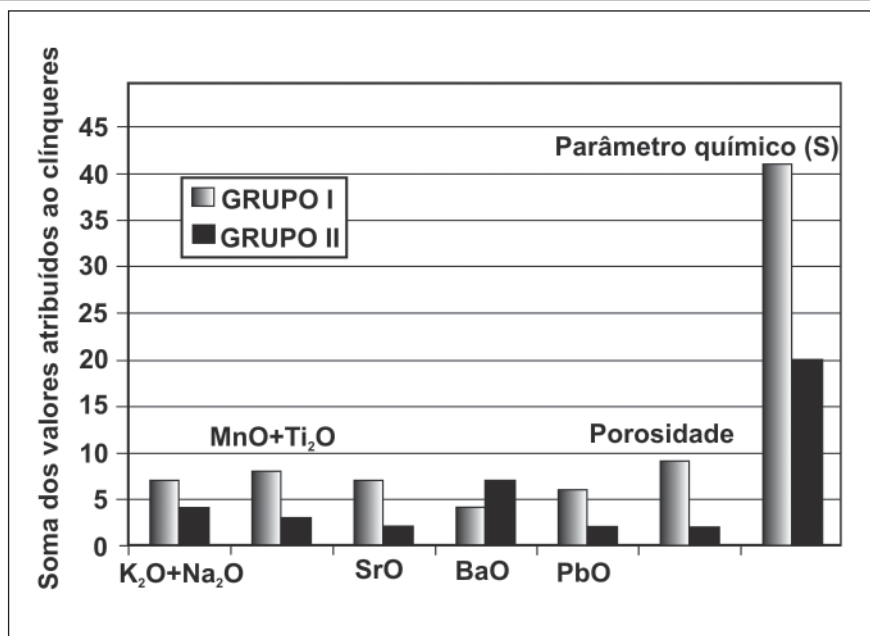


Figura 4 - Efeito das impurezas na resistência à quebra dos clínqueres em DWT.

4. Conclusões

Os resultados sugerem forte correlação entre impurezas e parâmetro de resistência à quebra (A.b) dos clínqueres testados. Os resultados sugerem, portanto, que clínqueres ricos em metais de transição, álcalis e estrôncio terão menor porosidade, e, conseqüentemente, menor moabilidade. Por outro lado, a presença de bário, em especial, quando concentrado na matriz, parece reduzir bastante a resistência à quebra dos nódulos, mostrando também forte correlação com a porosidade e a resistência à quebra dos cristais.

5. Agradecimentos

Agradecimentos especiais ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq, ao Laboratório de Pesquisa Mineral (LPM, UFRGS) e ao Grupo CIMPOR (em especial, à fábrica da Cimbagé).

6. Referências bibliográficas

CAMPBELL, D. H. *Microscopical examination and interpretation of Portland cement and clinker*. (2. ed.) USA: Portland Cement Association, 1999. 224p.

CENTURIONE, S. L. *Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland*. São Paulo: Universidade de São Paulo, USP, 1993. 155p. (Dissertação de Mestrado).

CENTURIONE, S. L. *A mineralização do clínquer Portland e seus benefícios tecnológicos*. São Paulo: Universidade de São Paulo, USP, 1999. 156p. (Tese de Doutorado).

CHIEREGATI, A. C. *Novo método de caracterização tecnológica para cominuição de minérios*. São Paulo: Universidade de São Paulo, USP, Escola Politécnica, 2001. 149p. (Dissertação de Mestrado).

HILLS, L. M. *Clinker microstructure and grindability: updated literature review (SN2967)*. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2007. 15p.

MARINGOLO, V. *Clínquer coprocessado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento*. São Paulo: Universidade de São Paulo, USP, 2001. 162p. 3 Anexos (Tese de Doutorado).

NAPIER-MUNN, T.J., MORRELL, S., MORRISON, R.D., KOJOVIC, T. *Mineral comminution circuits - their operation and optimisation*. Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC), The University of Queensland, 1996. 413p.

SATO, P. E. S. *Distribuição de elementos menores no processo de fabricação de clínquer portland*. São Paulo: Universidade de São

Paulo, USP- Instituto de Geociências, 2004. 116p. (Dissertação de Mestrado).

SOUZA, V. G. *Influência das características mineralógicas, físicas e químicas dos clínqueres de cimento Portland sobre sua moabilidade*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, 2007. 363p. (Tese de Doutorado).

TAYLOR H. F. W. *Cement chemistry*. London: Academic Press, 1990. 475p.

Artigo recebido 29/04/2009 em e aprovado em 02/08/2010.

www.rem.com.br
Rem
Revista Escola de Minas

74 anos divulgando CIÊNCIA

Indexadores:


www.scielo.br

Geoscience
e-Journals


ISI Web of
KNOWLEDGE

refine your research
SCOPUS™