

PRODUÇÃO DE AREIA ARTIFICIAL – o problema da forma

Baptista, J. Santos¹; Carvalho, J. Soeiro¹; Teixeira, Pedro³; Leite, M. Machado²; Silva, Lígia³; Oliveira, Nelma³; Oliveira, Paula³; Farinha, José⁴; Francisco, Marco⁴; Rodrigues, Pedro⁴;

RESUMO

As areias são a fracção fina (0.074-4.76 mm) de um grupo de materiais vulgarmente designados por inertes ou agregados. A obtenção de areias de qualidade para a construção civil tem origem, fundamentalmente, em depósitos de origem fluvial ou dunar.

A sua exploração causa, em alguns locais, problemas ambientais e de segurança para obras construídas pelo homem de tal modo graves que tem conduzido os governos a proibir ou limitar fortemente a sua extracção. Contudo, o mercado mantém as suas necessidades.

A resposta a este problema está na produção de areia artificial. Neste artigo revelam-se alguns resultados de um estudo no sentido de contribuir para a resolução do problema da produção de areias com bom coeficiente de forma e da medição dos resultados do processo.

INTRODUÇÃO

As areias são a fracção fina (0.074 mm a 4.76 mm) de um grupo de materiais vulgarmente designados por inertes. Estes produtos podem ter duas origens:

- Depósitos naturais de produtos já desagregados como resultado da meteorização química e física de rochas coerentes. Destes, os economicamente mais rentáveis encontram-se associados directa ou indirectamente a cursos de água ou a sistemas dunares;
- Fragmentação mecânica de rochas coerentes: ígneas, metamórficas ou sedimentares, cuja fracção fina, depois de devidamente classificada para remoção das partículas mais graúdas e dos finos com calibres da ordem das argilas (<0.074) estão aptas a ser comercializadas como areias artificiais.

Quando nos referimos a areias, estamos a abarcar, num mesmo conceito, um vasto leque de produtos com as tipologias e aplicações mais díspares. Esta classe de materiais é utilizada desde a produção de vidro até aos filtros nas estações de tratamento de águas para consumo público. Em Portugal a exploração de jazigos de areias ainda é a fonte mais importante de agregados de baixos calibres com qualidade para a construção civil.

Apesar das condicionantes legais e das implicações ambientais directas e indirectas deste tipo de explorações, algumas com consequências dramáticas e bem conhecidas, ainda não existe oferta suficiente de produtos com qualidade oriundos da fragmentação mecânica de rochas coerentes. Isto significa que se adoptou, e ainda adopta, o mais elementar dos comportamentos. Ou seja, apesar da sofisticação técnica de alguns dos equipamentos utilizados, o desenvolvimento tecnológico do sector encontra-se a um nível equivalente àquele em que o homem se encontrava antes da sedentarização e do desenvolvimento da

¹ Prof. Aux. FEUP

² Dir. Lab. IGM Porto, Prof. Cat. FEUP

³ Eng. Minas UP

⁴ Aluno Finalista Eng. Minas UP

agricultura: o de caçador colector. Por outras palavras, limita-se a proceder à exploração de jazigos de materiais incoerentes cujas partículas já se encontram dentro dos limites dimensionais desejados. De um modo geral não é efectuado qualquer tratamento que vá além de uma lavagem e classificação para responder às necessidades mais básicas do mercado.

Não queremos com isto dizer que não seja necessária e/ou vantajosa a extracção de areias em alguns locais. Até porque, de um ponto de vista macro-económico, esta actividade tem custos unitários de produção muito mais baixos do que os obtidos a partir da fragmentação de rochas coerentes, em parte como resultado de um menor investimento em equipamentos e tecnologia e devido a uma menor utilização, directa ou indirecta, de combustíveis fosseis, fontes de gases responsáveis pelo efeito de estufa.

A definição dos locais onde podem ou não ser explorados depósitos de areias é um outro problema do foro do ordenamento do território e que urge resolver. Face às necessidades do mercado impõe-se estudar a viabilidade de investimentos em tecnologia, em locais onde a areia natural não consiga satisfazer a procura, nomeadamente a da construção civil.

A alternativa de produção de areias artificiais a partir de rochas coerentes é tecnologicamente mais exigente e mais dispendiosa, não só do ponto de vista do investimento mas também dos custos operatórios. Deve, por isso, ser devidamente ponderada. A crescer a estes problemas, existem algumas aplicações específicas, como por exemplo aquelas em que a forma das partículas assume um papel importante, que não tem, ainda, o seu problema resolvido através da utilização deste tipo de areias.

Neste artigo pretendem dar-se alguns contributos no sentido da resolução deste último problema. Nele são apresentados alguns dos resultados experimentais e respectiva análise, de ensaios com o objectivo da melhoria da forma das partículas e respectivas condições de produção. É ainda abordada, de maneira sucinta, a problemática da medição do calibre e das suas inter-relações com a forma das partículas. É também apontada uma metodologia indirecta de medição da forma, através da análise da evolução de uma *função formação* no calibre, a partir dos resultados obtidos nos ensaios de desgaste. São confrontados os resultados obtidos com esta função com outros resultantes da aplicação da análise de imagem na medição de alguns parâmetros simples da forma das partículas tradicionalmente relacionados com o calibre, ou seja, a área da projecção da partícula no plano, o comprimento e a largura máxima das partículas.

No âmbito da aplicação da análise de imagem ao problema da medição do calibre e da forma, esperamos apresentar em breve resultados mais concludentes, nomeadamente no sentido da medição destes parâmetros *on line*, de modo a permitir a sua utilização em sistemas automáticos de controlo.

ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DAS AREIAS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

Nem todos os tipos de areia podem ou devem ser utilizados na construção civil. A areia utilizada neste sector obedece a um conjunto de normas de controlo de qualidade das quais se destacam os baixos teores em argila, micas, matéria orgânica e óxidos/hidróxidos de ferro e de manganês.

A superfície das partículas de areia deve permitir que se estabeleça uma ligação perfeita cimento/partícula mineral de modo a obter um material durável, capaz de suportar tensões e desgastes por um período de tempo o mais longo possível. Neste contexto, para além dos contaminantes, a forma das partículas assume um papel da máxima importância em algumas aplicações.

No fabrico de argamassas de revestimento, por exemplo, importa que as partículas sejam arredondadas. As de forma angular ou lamelar prejudicam a trabalhabilidade, especialmente quando aplicado em paredes. Para o asfalto, pelo contrário, as partículas devem ser angulares, uma vez que este adere melhor a superfícies irregulares e estas se adaptam melhor entre si.

O PROBLEMA DA MEDIÇÃO DO CALIBRE

Sob um ponto de vista experimental e ao contrário do que sucede, por exemplo, na determinação da variação da concentração de um qualquer soluto químico, fazer medições no calibre acarreta problemas formais sérios:

- 1° -O conceito de calibre e a sua definição está ligado à forma da partícula, propriedade que carece, ainda hoje, de um descritor apropriado.
- 2° -O problema da representação contínua da propriedade calibre. Esta, associada à dimensão de cada indivíduo, acarreta, necessariamente dados discretos.

Coloquemos o problema da análise granulométrica da areia de uma praia. Tomemos uma amostra significativa da areia dessa praia. Facilmente verificamos que a caracterização individual de cada elemento da população (a areia da praia) não é viável. Mesmo para a amostra recolhida essa tarefa é muito difícil. Nestas circunstâncias, o problema prático da medição experimental da grandeza calibre aponta directamente para a discretização como solução convencional.

O processo desenvolvido para ultrapassar os dois problemas apontados consiste na definição de classes de calibre. Cada uma delas definida pelos limites de um intervalo $]x_k, x_{k+1}[$ e caracterizada por um único valor, normalmente um dos limites desse mesmo intervalo. Neste trabalho os resultados apresentados obedecem a uma padronização que consiste na classificação das partículas por tamisagem com malha quadrada de série geométrica $\sqrt{2}$.

Assim, o calibre de uma partícula p ou de uma classe C é caracterizado pela malha sobre a qual a(s) partícula(s) fica(m) retida(s) no processo de classificação. Definido deste modo, o calibre, enquadra-se no grupo de propriedades às quais é usual designar por *propriedades técnicas do material*. Estas situam-se num plano intermédio entre aquelas que não é possível medir ou caracterizar, como por exemplo o diâmetro médio ou o estado de libertação de um minério, e as propriedades físico-químicas, definíveis sem qualquer ambiguidade, como a massa ou o teor. Quanto à indexação, as classes obtidas são numeradas de 1 a n , em que a classe C_1 é a de maior calibre.

Ao trabalhar nestas condições, o cerne do problema deixa de estar nos valores dos atributos que caracterizam uma dada partícula, para passar para a determinação das propriedades conjuntas das partículas que caem dentro de cada um dos intervalos possíveis da propriedade calibre. Este modo de proceder conduz à aplicação de um outro conceito, o de distribuição de propriedade.

O problema é, na prática, resolvido de uma forma empírica mas eficaz. Classificam-se as partículas de acordo com um critério preestabelecido obtendo-se um conjunto de classes C_k ($k=1,2,3, \dots, n$). A cada uma dela vai corresponder um determinado número de partículas $P(x)$, um volume $V(x)$ e uma massa $W(x)$ próprias, a partir das quais é possível definir as seguintes funções:

- 1° -Cumulante da repartição de calibres das partículas em número

$$P(x) = \sum_{k=x_k < x} \frac{P_k}{P_S}; N_S = \sum_k P_k$$

Eq.
;Error!Argumento
de modificador

O calibre não é uma propriedade contínua e, por isso, a sua medição não é um problema simples. Para o resolver procede-se à definição de classes granulométricas cujos limites podem ser quaisquer. Contudo, na prática, estão condicionadas por uma padronização normativa preestabelecida. O critério genericamente aceite a nível internacional corresponde a uma série geométrica de redes de malha quadrada com uma progressão de $\sqrt[4]{2}$ ou $\sqrt{2}$ (normas ASTM ou ISO, por exemplo).

desconocido.,

em que p_k é o número de partículas da classe C_k e P_S é o número das partículas do sistema ou da amostra sujeita a ensaio;

2º - Cumulante da repartição de calibres em volume:

$$V(x) = \sum_{k=x_k < x} \frac{v_k}{V_S}; V_S = \sum_k v_k$$

Eq.

!Error!Argumento de modificador desconocido.

em que v_k é o volume das partículas da classe C_k e V_S é o volume total das partículas do sistema ou da amostra sujeita a ensaio;

3º - Cumulante da repartição de calibres em massa:

$$W(x) = \sum_{k=x_k < x} \frac{w_k}{W_S}; W_S = \sum_k w_k$$

Eq.

!Error!Argumento de modificador desconocido.

em que w_k é a massa das partículas da classe C_k e W_S é a massa das partículas do sistema ou da amostra sujeita a ensaio.

Uma vez que os valores destas funções são de origem experimental e partem de uma divisão da população por classes eles são, necessariamente, discretos. Cada um deles vai corresponder ao valor determinado experimentalmente para a propriedade respectiva em cada classe C_k .

Interpolando ou ajustando formas analíticas deriváveis para cada uma delas, é então possível definir as respectivas densidades de repartição de calibres em número $p(x)$, volume $h(x)$ e massa $w(x)$, respectivamente:

$$p(x) = \frac{dP(x)}{dx}$$

Eq.

!Error!Argumento de modificador desconocido.

$$v(x) = \frac{dV(x)}{dx}$$

Eq.

!Error!Argumento de modificador desconocido.

$$w(x) = \frac{dW(x)}{dx}$$

Eq.

!Error!Argumento de modificador desconocido.

representando $p(x)dx$, $h(x)dx$ e $w(x)dx$ a fracção compreendida no intervalo $]x, x+dx[$ respectivamente para o número, volume e massa de partículas.

No presente trabalho toda a parte experimental foi efectuada utilizando uma representação mássica da distribuição da propriedade calibre. Nessa medida, e uma vez que qualquer generalização para qualquer dos outros tipos de representação é facilmente efectuada, a partir deste momento toda a notação obedecerá a esse critério.

MODELO DESCRITOR DO DESGASTE

A descrição da fragmentação e do desgaste foi efectuada a partir do modelo matricial de transição finita apresentado por Lynch (1977). No processo de fragmentação e desgaste que se passa dentro de um moinho de tambor, as partículas têm uma certa probabilidade de transitarem para uma classe de calibre inferior.

Quando há fragmentação cada partícula têm uma probabilidade de ser fragmentada. Quando isso acontece, todas as partículas resultantes (filhas) têm uma elevada probabilidade de transitarem para um calibre diferente do da partícula de origem (mãe).

Quando o fenómeno é de desgaste, processa-se o polimento da partícula mãe, a qual permanece na mesma classe ou passa para a classe de calibre imediatamente inferior. Enquanto isto, as partículas filhas, de reduzidas dimensões, transitam directamente para o *infra* ou seja, para a classe que alberga os fragmentos de menores dimensões.

Todo este processo pode ser descrito pela seguinte expressão:

$$\bar{c} = \bar{T} \bar{f} \quad \text{Eq. ;Error!Argumento de modificador desconocido.}$$

Em que \bar{c} é a distribuição granulométrica do produto resultante da fragmentação, \bar{f} a distribuição granulométrica da carga inicial do moinho e \bar{T} é a *matriz de transição finita*, responsável pela descrição da transformação da carga inicial no produto final. Esta matriz integra em si a descrição dos fenómenos físicos inerentes ao processo de fragmentação e desgaste que pretendemos descrever.

O balanço mássico genérico do processo de fragmentação e desgaste, pode ser descrito da seguinte forma:

$$\begin{array}{ccccccc} f_1 & c_{1,1} & 0 & 0 & \cdot & 0 & \\ f_2 & c_{2,1} & c_{2,2} & 0 & \cdot & 0 & \\ f_3 & c_{3,1} & c_{3,2} & c_{3,3} & \cdot & 0 & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ f_n & c_{n,1} & c_{n,2} & c_{n,3} & \cdot & c_{n,n} & \end{array}$$

A primeira coluna da matriz representa a distribuição granulométrica da alimentação. A massa total da alimentação é dada pela expressão

$$F = \sum_1^n f_k$$

A segunda coluna representa a distribuição das partículas filhas, resultantes da cominuição da classe f_1 , a terceira coluna representa a distribuição das partículas filhas, resultantes da cominuição da classe f_2 , etc. Ou, de uma forma genérica, $c_{i,k}$ representa a massa das partículas de calibre i resultante da fragmentação de f_k :

$$c_{i,k} = T_{i,k} f_k$$

Aqui, $T_{i,k}$ representa a fracção de material do calibre k da alimentação que passará para o calibre i dos produtos:

$$\begin{array}{ccccccc} T_{1,1}f_1 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & \\ T_{2,1}f_1 & T_{2,2}f_2 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & \\ T_{3,1}f_1 & T_{3,2}f_2 & T_{3,3}f_3 & \cdot & \cdot & 0 & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ T_{n,1}f_1 & T_{n,2}f_2 & T_{n,3}f_3 & \cdot & \cdot & T_{n,n}f_n & \end{array}$$

Compreende-se assim que a equação Eq. ;Error!Argumento de modificador desconocido. defina completamente o processo descrito.

A descrição da matriz de transição finita \bar{T} pode ainda ser mais detalhada, dando origem a duas outras com uma interpretação fenomenológica bem definida:

- o Uma *matriz destruição* \bar{S} que descreve a probabilidade de destruição de cada lote;

- o Uma *matriz formação* $\overline{\overline{B}}$ que indica a probabilidade de as partículas geradas por fragmentação terem por destino determinado lote.

Assim, a fracção de partículas que mudou de lote é dada por $\overline{\overline{S}}f$ sendo a das que permanece descrita pela expressão $(\overline{\overline{I}} - \overline{\overline{S}})f$. Quanto à massa das partículas filhas que vão cair a cada lote pode ser obtida através da expressão $\overline{\overline{BS}}f$.

O processo de cominuição descrito na Eq. **!Error!Argumento de modificador desconocido.** vem então sob a forma:

$$\overline{\overline{c}} = (\overline{\overline{BS}} + \overline{\overline{I}} - \overline{\overline{S}})f$$

Esta expressão obriga, no entanto à determinação de n elementos para a matriz destruição e $n(n-1)/2$ elementos para a matriz formação, num total de $n(n+1)/2$ elementos quando se usa uma série de n malhas de tamisagem. Este número exorbitante de graus de liberdade aponta assim, claramente, para uma condensação de parâmetros, a qual é efectuada a partis das matrizes *destruição e formação*.

Matriz Destruição, S

Cada valor da função destruição, indica a fracção mássica das partículas da classe C_k que é fragmentada por unidade de tempo.

Para a condensação desta matriz, recorreu-se à formulação de Madureira e Regueiras (1972) e Leite (1984) apoiado nas conjecturas de Greenwood e Hiorns (1967), válida quando os calibres definidores de cada classe se encontrem numa razão constante e que pode ser escrita do seguinte modo:

$$S_k = PA * PK^{k-1}$$

Os dois parâmetros introduzidos têm a seguinte leitura fenomenológica:

- o PA – Velocidade de destruição do lote mais graúdo (S_1). A este parâmetro está associada a configuração energética do moinho. Quanto mais elevado for o seu valor, maior a acção exercida sobre as partículas. Varia no intervalo]0,1[.
- o PK – Mede o gradiente de decrescimento da velocidade de destruição das classes de calibre abaixo do máximo. Avalia as características texturais do minério e as condições de moagem. São permitidos valores no intervalo]0,+∞[.

Matriz Formação

Cada elemento $B_{i,k}$ da *função formação*, representa a fracção mássica das partículas de calibre C_k que passaram para o calibre C_i .

A *função formação* é uma matriz triangular inferior em que os elementos da diagonal são nulos com excepção do último $B_{k,k}$.

Para esta função foi utilizada a formulação desenvolvida por Harris (1968), que na sua forma diferencial proposta por Leite (1984) tem a seguinte configuração:

$$b_{i,k} = \left[1 - \left(\frac{C_{i-1,k}}{C_k} \right)^{PW} \right]^{PG} - \left[1 - \left(\frac{C_{i,k}}{C_k} \right)^{PW} \right]^{PG}$$

Em que C_k são os calibres das partículas progenitoras e $C_{i,k}$ os sucessivos calibres C_k nos quais se encontram as partículas suas descendentes. PW e PG variam no intervalo]0,+∞[. Segundo Leite (1984), a sua interpretação é a seguinte, quando

- o PW>1 e PG>1 - são gerados essencialmente lotes intermédios;
- o PW>1 e PG<1 - formação para os lotes vizinhos próximos;
- o PW<1 e PG>1 - grande produção de finos distantes;

- $PW < 1$ e $PG < 1$ - são obtidas fundamentalmente as classes vizinhas e os finos distantes.

Obviamente que estas referências são apenas indicativas e isso é devidamente ressalvado pelo autor. A interpretação de um processo a partir de modelos fenomenológicos não se pode ficar pela simples leitura de parâmetros ou das suas relações. Também não é suficiente a verificação da evolução das funções que eles geram no seu conjunto. É sempre necessário um conhecimento e uma sensibilidade ao próprio processo da parte de quem analisa os resultados.

TRABALHO E CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Tradicionalmente o lote 0-5mm (pó) era classificado como um subproduto da produção de inertes. Nos últimos anos a sua importância tem vindo a crescer, nomeadamente com a sua utilização como areia após lavagem. Neste trabalho procura-se apontar no sentido de elevar ainda mais o valor acrescentado que é possível obter deste produto através da melhoria do seu coeficiente de forma.

Para tal foi escolhido um produto proveniente da fragmentação de um gneisse, rocha de origem metamórfica, que origina, por fractura, uma larga percentagem de partículas lamelares. Esta característica constituía, à partida, um desafio complementar extremamente estimulante. Na pesquisa da solução para a melhoria do coeficiente de forma, foram realizadas largas dezenas de testes laboratoriais em moinho de tambor sob as mais diversas condições operacionais. De seguida, iremos apresentar alguns dos resultados obtidos, com a avaliação de metodologias indirectas de análise da forma que permitem simultaneamente o controlo do processo.

Nos ensaios procurava-se proceder ao desgaste da superfície das partículas, no sentido de eliminar as rugosidades e melhorar a sua forma. Os ensaios foram realizados em regime batch num moinho de tambor com 305mm de diâmetro interno e 290mm de comprimento. Neste era introduzida uma carga de minério com uma massa rondando as 2000g de areias lavadas resultantes da fragmentação do gneisse da pedreira da Malaposta. A esta carga era adicionada uma outra composta por agentes moentes com várias tipologias e com massa, calibre e forma diferenciadas, de acordo com os objectivos da experiência.

ANÁLISE DE IMAGEM

Antes de descrevermos sucintamente os procedimentos efectuados para a análise da forma das partículas a partir da sua imagem, convém dizer que este é um campo ainda numa fase muito elementar de desenvolvimento ao nível da definição de um descritor universal para este parâmetro. Se a descrição de um círculo ou de um quadrado é tarefa simples, descrever a forma de partículas como as que a seguir apresentamos levanta outro tipo de problemas bastante mais complexos.

A análise das areias foi efectuada a partir de imagens obtidas com uma câmara digital. Para tratamento destas imagens foi desenvolvido um programa em MATLAB (Image toolbox).

Antes da obtenção dos parâmetros de forma pretendidos (eixo maior, eixo menor e área da projecção da partícula no plano), foi definido o contorno, o qual levantou alguns problemas originados pela heterogeneidade cromática das partículas e por alguns problemas de iluminação conforme se pode observar na Fig. **!Error!Argumento de modificador desconocido.** e nas restantes fotografias.

Na tabela 1 encontram-se resumidos alguns dos resultados obtidos a partir da análise de imagem, bem como algumas das relações entre eles que julgamos melhor espelharem a evolução da forma dos grãos relativamente ao tratamento a que foram sujeitos.

Tabela 1 - Parâmetros de forma

Amostras	(0) Área	Variância área	Eixo Maior (E M)	Variância E M	Eixo menor (E m)	Variância E m	EM/Em	Média dos eixos	(1) Círculo E M	(2) Círculo E m	(1)-(2)	(1)-(0)	(2)-(0)
	mm ²		mm		mm			mm	mm ²	mm ²			
A	3.15	0.27	2.50	0.17	1.66	0.05	1.51	2.08	4.92	2.15	2.77	1.77	1.00
B	3.35	0.74	2.49	0.31	1.72	0.04	1.44	2.11	4.86	2.33	2.53	1.51	1.02
C	3.46	0.53	2.87	0.49	1.65	0.07	1.74	2.26	6.47	2.14	4.33	3.01	1.31
D	3.61	0.87	2.85	0.67	1.64	0.03	1.74	2.24	6.38	2.11	4.26	2.77	1.49
AR	2.96	0.26	2.36	0.09	1.64	0.05	1.43	2.00	4.36	2.12	2.24	1.41	0.83

D - Areia sem qualquer tratamento; AR - Areia de rio

- o Os valores apresentados como exemplo, são resultado do cálculo da média aritmética dos valores obtidos para o conjunto das partículas de calibre 0.118mm.

Dos valores sombreados na tabela 1, as amostras A e B correspondem àqueles que julgamos melhor representarem a evolução positiva da forma no sentido que pretendíamos a partir da areia tal qual, representada pela amostra D. A amostra proveniente de areia de rio (AR) serve como padrão, uma vez que é aquela que melhor coeficiente de forma apresenta, qualquer que seja o parâmetro considerado.

As amostras A e B, apesar de apresentarem valores muito próximos relativamente aos parâmetros de forma considerados, tem características bastante distintas. Como veremos mais tarde. Enquanto que a amostra A obteve bons coeficientes de forma a partir da fractura das partículas alongadas de gneisse que compunham a alimentação, na amostra B esse efeito foi obtido a partir de um efeito de desgaste. Como resultado destas diferentes origens, a amostra A apresenta partículas angulosas como se pode observar na Fig. **Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido.**, enquanto as partículas da amostra B apresentam uma superfície mais polida (Fig. **Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido.**). Analisemos então mais detalhadamente os resultados experimentais.

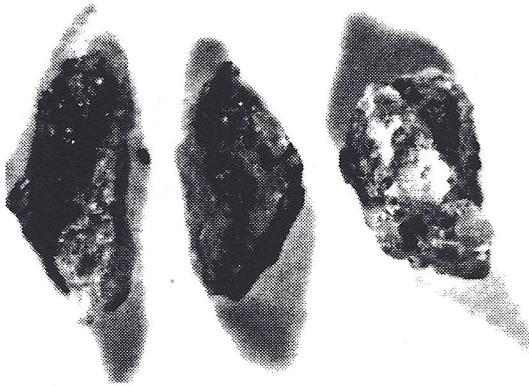


Fig. **Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido.** - Imagem digital de algumas partículas da amostra D.

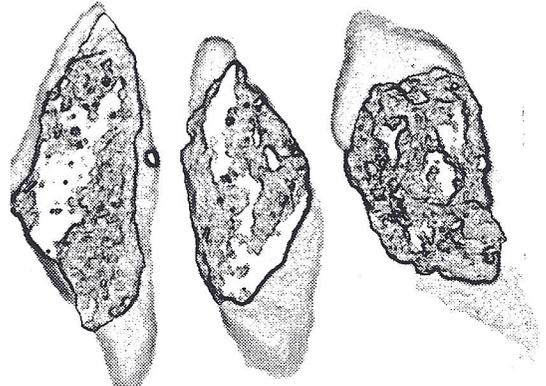


Fig. **Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido.** - Partículas da Fig. **Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido.** após um primeiro tratamento para definição do contorno.

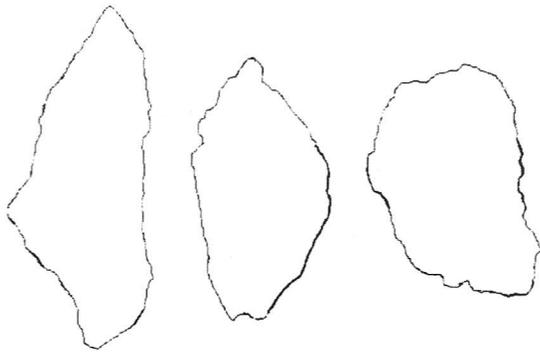


Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. - Contorno da partículas da Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido..

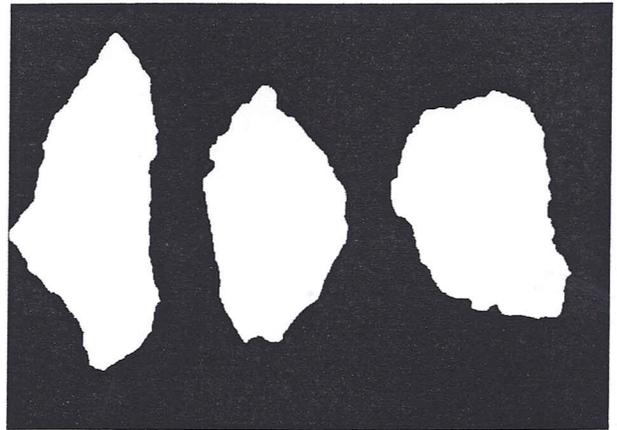


Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. - Tratamento das imagens das partículas da Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. para o cálculo da área.

APRESENTAÇÃO DOS ENSAIOS

Apresentaremos de seguida três ensaios, cujos resultados são comparados, em termos de forma, com duas amostras padrão. Uma composta por partículas não tratadas com a mesma origem das que sofreram tratamento (D - Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. a Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido.), e outra por de areia de rio (AR - Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. e Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido.).

Para cada um dos ensaios são apresentadas quatro figuras, dois gráficos, uma fotografia e uma imagem do contorno das partículas aí representadas:

- Os gráficos da esquerda representam as cumulantes das distribuições granulométricas. Nestes a linha a tracejado representa a amostra inicial e a linha contínua o resultado após desgaste.
- Os gráficos da direita representam a distribuição da função formação. Através sua análise é possível conhecer a distribuição das partículas formadas por cominuição ou desgaste durante o ensaio e, conseqüentemente ajustar os procedimentos e a configuração do moinho no sentido da modelação dos resultados pretendidos.
- Na fotografia é possível observar a forma mas, principalmente, o grau de polimento das partículas.
- Na imagem do contorno evidencia-se a forma da partícula no plano em que é observada. Foi a partir deste que todos os parâmetros de forma foram medidos de modo directo ou indirecto.

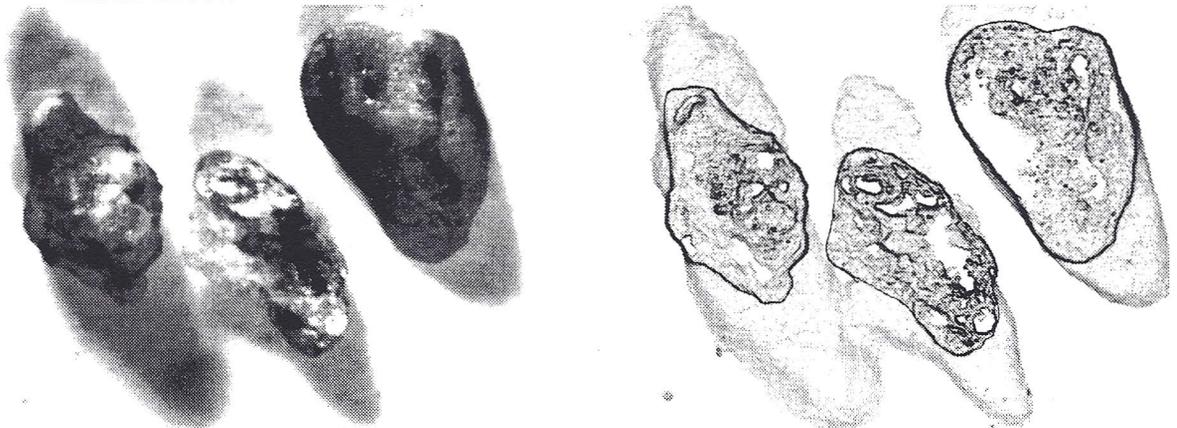


Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. - Imagem digital de algumas partículas da amostra AR.

Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. - Partículas da Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. após um primeiro tratamento para definição do contorno.

Ensaio A

Massa da amostra	Condições do ensaio			
	Carga Moente		Velocidade de rotação	
2012.6 g	Seixos de praia	Ø-37.5-50mm	3970g	40 rpm

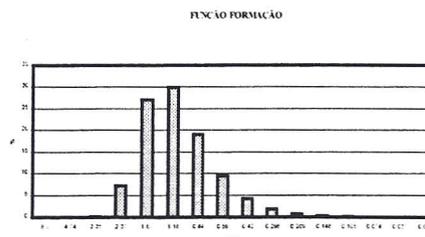
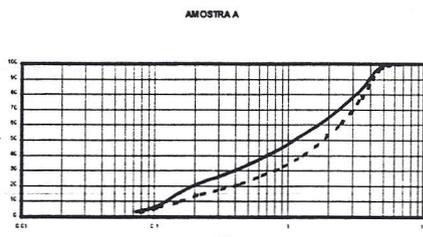


Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. - Cumulantes da amostra A antes e após tratamento.

Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. - Função selecção da amostra A.

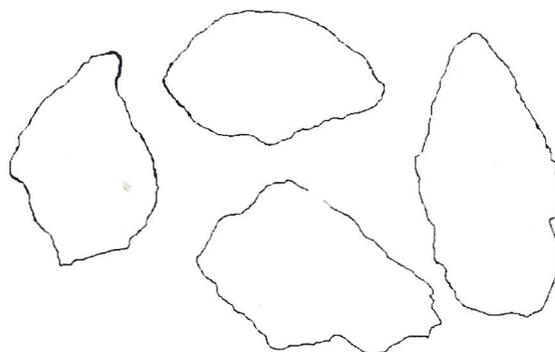
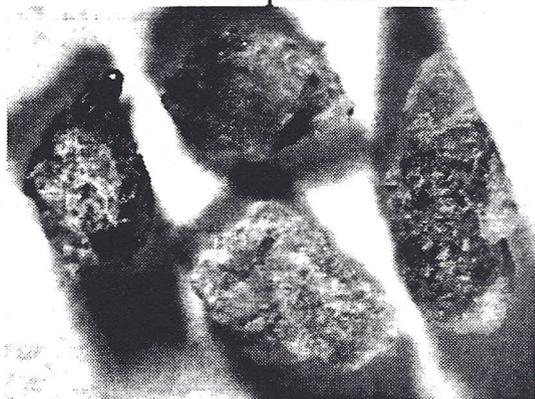


Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. - Imagem digital de algumas partículas da amostra A.

Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. - Contorno da partículas da Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido..

Pela análise da Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. é possível verificar que durante o ensaio se deu essencialmente a produção de calibres intermédios, sendo a produção de finos reduzida. Este resultado pode ser confirmado pela análise da função formação (Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido.), onde se verifica que as partículas *filhas* se concentram nos calibres intermédios, sendo praticamente nula a produção de finos.

Este tipo de reacção não configura um desgaste mas sim uma fragmentação das partículas. Na Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. esta hipótese pode ser confirmada, uma vez que as partículas se apresentam angulosas apesar de mostrarem uma sensível melhoria da *cubicidade* relativamente às que se podem observar na Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido.. Esta análise qualitativa é confirmada através da tabela 1, onde se pode verificar que os parâmetros de forma desta amostra são significativamente melhores do que os da areia de origem (amostra D).

Ensaio B

Massa da amostra	Condições do ensaio			
	Carga Moente			Velocidade de rotação
2012.6 g	Seixos de praia	Ø-37.5-50mm	3970g	20 rpm

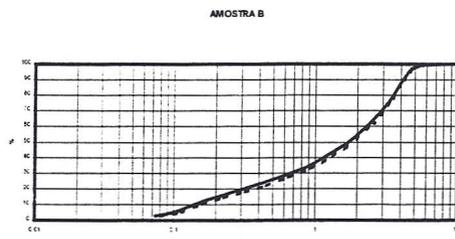


Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. Cumulantes da amostra B antes e após tratamento.

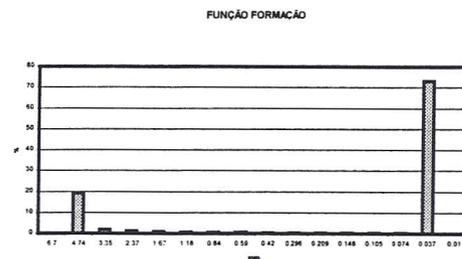


Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. - Função selecção da amostra B.



Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. - Imagem digital de algumas partículas da amostra B.

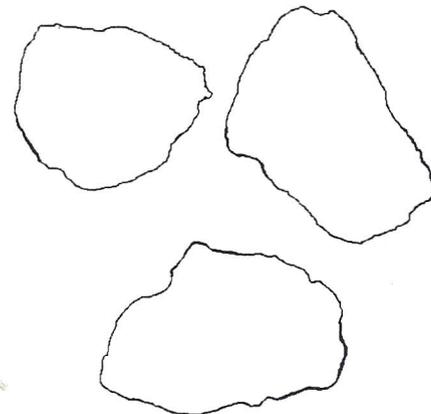


Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. - Contorno da partículas da Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido..

Neste ensaio foram mantidas todas as condições operacionais relativamente ao ensaio A, com excepção da velocidade de rotação, a qual foi reduzida para metade. Esta mudança teve como objectivo uma significativa diminuição da energia do sistema, para eliminar o processo de fragmentação. Numa apreciação da Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido., podem-se verificar as consequências: quase não se consegue distinguir a cumulante da alimentação da do produto final.

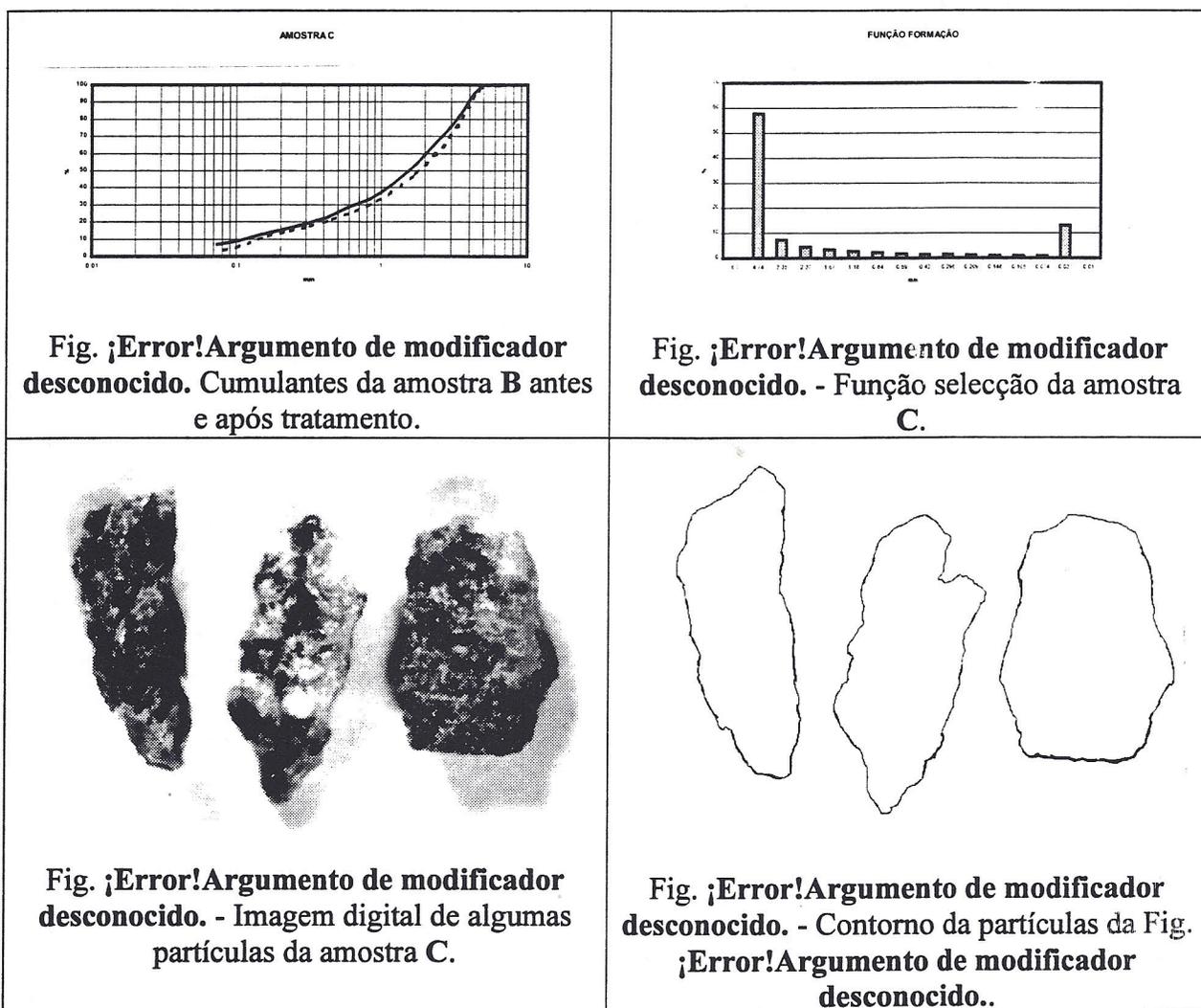
Neste exemplo, e ao contrário do que acontecia no anterior, pode ser verificada a grande vantagem da análise da *função formação* (Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido.). Dela podemos facilmente concluir que a fragmentação não foi significativa e que se produziram fundamentalmente finos, ou seja, a acção fundamental foi a de desgaste, como era pretendido.

Na Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. podemos verificar que as partículas resultantes apresentam superfícies com polimento sendo a sua forma, já não *cubiforme*, mas *esferoide*. Na projecção bidimensional apresentada na Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. verifica-se que o contorno das partículas que se aproxima do círculo.

Contudo, apesar de a partir da observação directa das partículas e da análise da função formação se poder facilmente concluir do elevado grau de desgaste que estas sofreram durante o ensaio, já o mesmo não se pode dizer relativamente aos parâmetros de forma apresentados na tabela 1. Estes, de um modo geral não se distinguem de forma significativa dos da amostra A. A nossa interpretação para este facto é a de que apenas parâmetros de carácter linear (áreas e distâncias) não fornecem informação suficiente para a análise do polimento. Falta, por isso, conseguir uma leitura das características da superfície da própria partícula.

Ensaio C

Massa da amostra	Condições do ensaio			
	Carga Moente		Velocidade de rotação	
2014.8 g	Bolas de ferro	Ø-30mm	1020g	40 rpm



Quisemos de seguida confirmar até que ponto ia a legibilidade da função formação relativamente ao polimento das partículas. Para tal desenhou-se um conjunto de ensaios nos quais fosse reduzida a formação finos relativamente ao ensaio B mas igualmente sem a formação de partículas intermédias.

Relativamente ao ensaio anterior, verifica-se no gráfico da Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido. uma maior quantidade de finos. Este facto poderia partida pronunciar um bom polimento da superfície das areias. Este facto é ainda reforçado quando se analisa a função formação Fig. ;Error!Argumento de modificador desconocido..

No entanto, quando recorremos à análise de imagem, verificamos de imediato, tanto através da apreciação dos parâmetros da tabela 1 como através da Fig. **;**Error!Argumento de modificador desconocido. e da Fig. **;**Error!Argumento de modificador desconocido. que os efeitos de polimento sofridos por esta amostra são desprezíveis.

CONCLUSÕES

Como conclusão evidente deste trabalho podemos referir, relativamente à medição da forma através da análise de imagem, que tal é possível e relativamente fácil se apenas nos interessarem parâmetros relativos à cubicidade das partículas. No entanto, se pretendermos avaliar o grau de polimentos dos grãos o problema complica-se significativamente.

Contudo, conforme também se pôde verificar, pela análise dos resultados da amostra C, que a simples verificação da função formação também não dá informação suficiente para tomar decisões relativamente ao problema do polimento das partículas.

O caminho apontado por este estudo vai no sentido de ultrapassar o problema complementando a informação resultante da análise de imagem com uma leitura atenta dos parâmetros cinéticos, nomeadamente os relativos à função formação.

BIBLIOGRAFIA

Austin, L., Concha, F., Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación. CYTED, Concepcion.

Baptista, J.M.S., Modelo não-linear de transporte diferencial no calibre. Tese de Doutoramento FEUP, Porto 1997.

Greenwood and Hiorns, Proc. 2nd Eur. Symp. On size reduction, Verlag Chemie, Weinheim, 1967.

Harris, The application of size distribution equations to multi-event comminution process. Trans. AIME, 241:pp.343-358, 1968.

Leite, M.R.M., Moagem não linear em moinho de barras. Tese de Doutoramento FEUP, Porto 1984.

Lynch, A.J., Mineral crushing and grinding circuits. Ed. Elsevier, New York, 1977.

Madureira C.M.N. e Regueiras, Conceitos fundamentais para um estudo fenomenológico de processos de fragmentação. Com n^o 29, II Simpósio sobre teorias da informação e dos sistemas, FEUP, 1972.

Mendes, N.C., Simulação numérica de um circuito de moagem de clínquer. Dissertação de Mestrado FEUP, Porto 1995.

Oliveira, N C.N., Caracterização e valorização de matérias-primas - Valorização de resíduos de pedreira. Relatório de Estágio à Ordem dos Engenheiros, Porto 1999.

Oliveira, P .A.S., Produção de areias artificiais para alimentação de praias. Relatório de Seminário de Projecto, FEUP, Porto 2000.

Velho, J., Gomes, C., Romariz, C., Minerais Industriais. Coimbra 1998.