

METODOLOGIA PARA OPTIMIZAÇÃO DE CIRCUITOS DE FRAGMENTAÇÃO GRAÚDA

J.S. Baptista, J.S. Carvalho e P. Teixeira
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

RESUMO

A simulação e os métodos de optimização são ferramentas ainda pouco utilizadas na área da produção de inertes para a construção civil. O seu campo de aplicação vai deste a incorporação directa em sistemas automáticos de controlo até à utilização no apoio à decisão em unidades não automatizadas com tecnologia mais antiga. Nestas últimas, a sua correcta aplicação permite obter ganhos significativos na performance sem que haja a necessidade introduzir novos equipamentos ou trocar os existentes.

Este artigo está dividido em duas partes: na primeira parte apresentam-se as metodologias para simulação e optimização de circuitos de fragmentação graúda para a produção de inertes para a construção civil; na Segunda, um exemplo com base num caso em estudo.

INTRODUÇÃO

Os inertes

Os circuitos de fragmentação graúda destinam-se à cominuição de rochas duras, como o granito, o gneisse ou o calcário. Os seus produtos são fragmentos minerais de diferentes tamanhos, os quais recebem a designação genérica de inertes ou agregados. Estes são usados fundamentalmente nas indústrias ligadas à construção civil. A produção de cargas inertes ultra-finas (fillers) para incorporar em detergentes, tintas ou plásticos tem uma primeira fase de produção semelhante.

Embora básicos, todos estes materiais tem uma produção de natureza complexa e dispendiosa. A redução de calibre exige que sejam quebradas as ligações moleculares internas. Para isso é necessário submeter cada partícula, na sua globalidade, a tensões, de modo a que várias fracturas se instalem e propaguem até à superfície. O controlo desta operação é impossível, pelo menos com os meios e as tecnologias existentes. O fenómeno de instalação e propagação de fracturas está dependente das características mineralógicas, petrográficas e texturais da rocha bem como do historial de tensões a que esta esteve submetida desde a sua formação. Assim, apenas temos a certeza de que os fragmentos resultantes das operações de cominuição vão ser dos mais diversos tamanhos e formas, entre os quais apenas é possível estabelecer uma relação de natureza estatística. Acresce a este conjunto de dificuldades a grande quantidade de energia necessária para destruir as ligações internas dessa mesma rocha.

No processo de produção é sempre produzida uma gama larga de calibres que vão deste os ultra-finos até blocos de algumas dezenas de centímetros. Os maiores blocos são sucessivamente rebitados que não ultrapassem as dimensões máximas desejadas. Na impossibilidade de obtenção de partículas com igual forma e calibre (todas as partículas são diferentes), os produtos comerciais são caracterizados por uma medida técnica definida por um intervalo de calibre ou lote (ex.: 5mm-15mm), cuja valorização está dependente das características mecânicas e de forma das partículas que o compõe.

O mercado

Os produtos naturais com origem directa em rochas industriais são normalmente pouco valorizados devido à sua abundância e dispersão pelo globo. Como produto com essa origem, os inertes são caracterizados pelo um elevado volume de produção e baixo valor unitário. Essa desvalorização é ainda agravada por se encontrarem na base da pirâmide dos materiais utilizados na construção civil.

Devido a estes factores, as unidades que os produzem tendem a localizar-se nas vizinhanças dos centros consumidores de modo a que os custos de transporte não se tornem dominantes. É por isso que, tradicionalmente, as unidades de produção de agregados são pequenas relativamente às necessidades do mercado global mas, em contrapartida, omnipresentes.

A disseminação e a dimensão das unidades a par com as características da principal indústria consumidora, faz com que seja difícil obter números correctos do valor global da sua produção. São por isso muitas vezes utilizados estimadores como a produção de cimento ou a construção de estradas. Com base em valores declarados, uma estimativa da produção de inertes britados na União Europeia (UE) aponta para valores da ordem dos dois biliões (2.10^9) de toneladas por ano. Sendo a produção de inertes um processo com consumo energético intensivo, um valor desta ordem de grandeza apenas neste pequeno conjunto de países, permite de imediato concluir que qualquer ligeira melhoria na rendibilidade do sistema produtivo se traduz em economias muito significativas quando elevadas à escala mundial. É aqui de assinalar que os inertes são o material mais usado, logo a seguir ao ar e à água.

A optimização do design dos diagramas dos circuitos, a correcta definição e controlo dos *set-points* e uma operação cuidada, podem melhorar significativamente a eficiência energética. Estes padrões de funcionamento podem ser implementados não só em novas unidades mas também noutras já existentes. Para isso é necessário recorrer a uma metodologia sistémica, trabalhando simultaneamente as principais variáveis envolvidas e promovendo o número necessário de pequenas alterações sucessivas e devidamente planeadas para adequar o ritmo de mudança às condições operacionais concretas. Este tipo de abordagem passa necessariamente por uma sensibilização dos responsáveis a quem caberá, depois, promover a formação dos quadros operacionais.

Dificuldades do processo

O processo produtivo inicia-se na pedreira, onde grandes blocos são arrancados do maciço com o recurso a explosivos ou a equipamento mecânico adequado. Esses blocos são então carregados e transportados para a instalação de fragmentação, onde faseadamente as suas dimensões são reduzidas para os tamanhos comercialmente utilizados. Quando atingem o calibre desejado, as partículas são retiradas do circuito com o auxílio de unidades classificadoras que produzem os lotes comerciais finais e um rejeito constituído por partículas finas e ultra-finas.

Sendo a produção destas últimas a mais dispendiosa do ponto de vista energético e de desgaste dos equipamentos, vemos que, ironicamente, o lixo é o produto com custos de produção mais elevados.

Assim, o objectivo é produzir uma distribuição granulométrica tal que maximize a produção dos lotes mais valiosos e minimize os rejeitos. Para isso é necessário proceder à monitorização do processo de modo a obter a informação necessária para proceder ao ajuste das regulações das máquinas de modo a que o *set-point* da produção se mantenha estável, independentemente das características da rocha que alimenta a instalação. As estratégias de controlo são no entanto de difícil implementação devido ao carácter aleatório da alimentação proveniente da pedreira que assenta em variáveis de natureza estatística, como a distribuição de forma e de calibre, ou até incontrolláveis como a dureza ou a friabilidade da rocha. A incontrollabilidade destas características, inerente aos produtos naturais com que se trabalha³ são ainda agravadas pela pressão que sobre elas se exerce durante as operações de arranque do maciço e de fragmentação. São aí introduzidas tensões que se traduzem em micro-fissuras que, mesmo não se afirmando em fracturas, fragilizam de forma não uniforme todo o maciço rochoso e cada um dos seus fragmentos depois de arrancado. Estas acções externas chegam mesmo a modificar acentuadamente as propriedades de resistência mecânica dos inertes.

Embora as consequências de muitos dos factores de origem externa ao maciço possam ser minimizados com a aplicação de boas práticas operatórias, elas são aceites e tidas como resultado incontornável da exploração. Os seus resultados vão reflectir-se depois nas indústrias a jusante que vêem os seus custos crescer pela necessidade de introdução de mais cimento ou outro ligante para assegurar as características necessárias e compensar a falta de qualidade dos agregados.

A ultrapassagem destes problemas sob o ponto de vista do controlo é, como se pode imaginar, complexa. Durante o processo de cominuição são produzidas gamas extensas de calibres, cuja distribuição granulométrica depende não só das características do maciço e do seu historial de exploração, mas também dos equipamentos utilizados para fragmentação e das suas características construtivas.

Com todas estas condicionantes, o problema do controlo coloca-se sob um duplo ponto de vista: por um lado o carácter não determinístico do sistema e por outro o elevado número de variáveis de diferentes origens que estão inerentes ao processo em si. A abordagem da simulação e controlo de um processo de redução de calibre de rochas não é tão simples que possa ser resolvido através de um sistema de equações com mais variáveis, para tal apenas seriam necessários computadores mais rápidos para lhe dar uma solução em tempo útil. A aleatoriedade de propriedades e o carácter não reversível dos fenómenos, conduz a que as oscilações permanentes nas características da matéria prima se repercutam ao longo de toda a cadeia produtiva resultando, na prática, que o sistema não chague nunca a estabilizar. Nestas condições um regime permanente nunca é alcançado. Este tipo de instalações vive assim em transiente permanente com distribuições granulométricas da produção que variam minuto a minuto de acordo com as variações da natureza da rocha na alimentação da instalação. Como consequência, o controlo apenas é possível com o recurso a amostragem, balanços de massa e modelos previsionais do funcionamento particular de cada um dos equipamentos e das suas interacções para cada tipo particular de rocha. Nestas condições, os modelos, as estratégias e as rotinas de verificação tornam-se mais importantes que o equipamento de controlo em si. Estes modelos podem depois ser usados directamente ligados e a gerir o sistema de controlo ou, em alternativa, como auxiliares de decisão, sendo depois a ordem de regulação de cada um dos equipamentos da instalação efectuada manualmente pelo operador.

³ Granito, gneisse, calcário, etc.

Metodologia

A metodologia descrita neste artigo e que descreveremos pormenorizadamente, encontra-se sistematizada na fig.1.

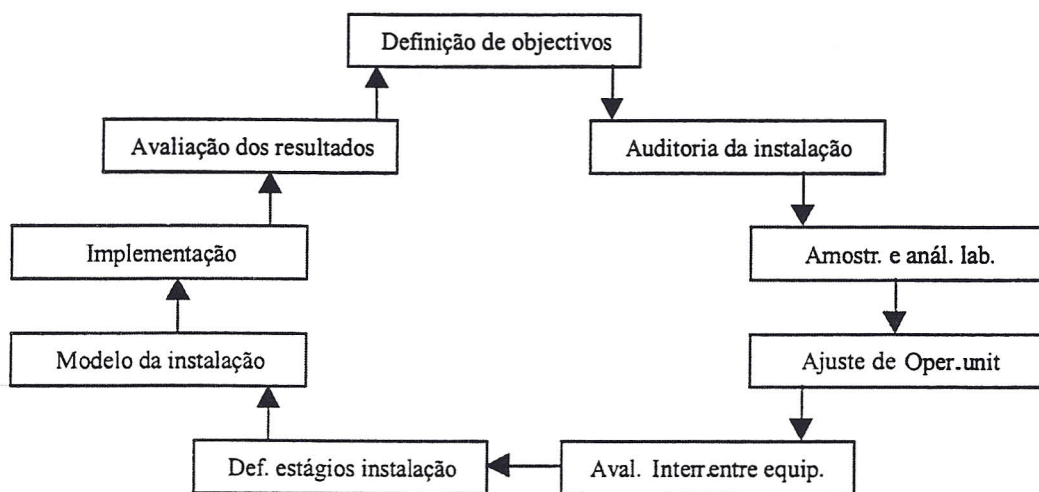


Fig. 1 – Esquema da metodologia de abordagem do problema

1. Definição de objectivos

Os objectivos definidos para estas unidades centram-se usualmente em quatro vectores:

- Maximizar a utilização da capacidade produtiva;
- Maximizar o benefício.
- Minimizar as perdas em lotes indesejáveis
- Ajustar a produção à procura

Existe portanto a necessidade de ponderar a importância relativa de cada um destes critérios que só aparentemente é coincidente.

Por exemplo, a natureza complexa da formação de calibres⁴ e o facto de cada um dos lotes comerciais em que essa produção é dividida possuir um valor de mercado distinto, conduz a que a máxima capacidade de produção só ocasionalmente corresponda ao máximo benefício da instalação. A conciliação destes dois objectivos, produção e benefício, seria já por si um problema delicado. No entanto, a estes, acrescem ainda outros factores: a minimização dos resíduos e a procura do mercado. Quanto aos resíduos, o problema é suficientemente complexo para, por si só, justificar uma abordagem autónoma. A procura de mercado nem sempre é coincidente com a valorização relativa de cada lote, ou seja, nem sempre o lote mais procurado num determinado momento é aquele que origina maior benefício ($B=V-CO$)⁵.

O problema não se fica, no entanto, por aqui. A distribuição granulométrica que é possível produzir a partir do maciço em exploração com os equipamentos disponíveis também não é fácil de controlar e um ajuste perfeito à procura é virtualmente impossível.

Este cenário complexo é ultrapassado na prática diária, através da aceitação da produção de grandes quantidades de produtos de baixo valor comercial e de resíduos,

⁴ que como vimos atrás corresponde sempre a uma distribuição granulométrica extensa.

⁵ B- benefício; V- valor comercial; CO- custos operatórios.

alguns dos quais com impactes ambientais negativos. Uma vez que a produção de gamas granulométricas extensas é incontável, e com ela a produção de resíduos, nomeadamente partícula finas e ultrafinas, a solução não está, obviamente em eliminar a sua produção mas sim em minimizá-la. Até porque são estes calibres os que absorvem maiores quantidades de energia.

Para coordenar todos estes factores propõe-se a formulação de uma função benefício comandada directamente pelo operador e baseada nos princípios de optimização multi-critério. Apenas deste modo é possível responder de forma flexível e eficaz à complexidade inerente a este problema. Foge-se, assim, das soluções pragmáticas mas pouco eficazes utilizadas, sem cair, no entanto, em simplificações teóricas que não tem qualquer significado no dia a dia das unidades de produção. Em resumo, o problema da optimização tem de ser abordado de uma forma sistémica em toda a sua complexidade e dificuldades inerentes, uma vez que soluções parciais correriam o risco de, ao maximizar um dos factores, fazer descer o benefício global da instalação.

Podemos então afirmar que não existe um único objectivo mas sim um conjunto de interesses antagónicos que cabe ao gestor da instalação conciliar por forma a obter o melhor resultado global.

2. Auditoria da instalação

Nesta fase prende-se obter informações detalhadas sobre a instalação e o seu funcionamento com o objectivo de identificar os seus problemas e virtualidades, assim como de estabelecer o ponto de partida que servirá como termo de comparação para a fase pós optimização. Nesta perspectiva é necessário analisar o estado e o modo de funcionamento da instalação, em particular os seguintes aspectos:

- Características relevantes de cada um dos equipamentos utilizados em termos de processo e para cada tipologia de rocha existente na pedreira, em particular a relação regulação/caudal/distribuição granulométrica;
- Diagrama e capacidade instalada. Nem sempre a capacidade instalada corresponde à capacidade efectiva. Esta depende da distribuição granulométrica e forma das partículas que se pretende produzir;
- Regime de funcionamento. Neste parâmetro de análise devem ser anotados factores como a regularidade da alimentação, frequência das paragens e seus motivos bem como a existência da turnos e respectivo rendimento;
- Problemas operatórios relevantes, em particular os estrangulamentos produtivos. Estes é que vão contribuir para determinar a capacidade real da instalação. O seu conhecimento pode apontar eventuais soluções;
- Nível de formação do pessoal. Este factor a par com a motivação para a tarefa condiciona a indicação e o planeamento de eventuais futuras acções de formação;
- Nível de automatização existente e sua tipologia. A tecnologia de automação existente condiciona a possibilidade de controlo directo da instalação pelo modelo matemático da instalação e pelo programa de optimização;
- Características técnicas e distribuição granulométrica dos produtos finais. São particularmente importantes os índices de forma e de desgaste das partículas. A distribuição granulométrica dos produtos finais permite aferir a qualidade da crivagem e eventual saturação dos crivos. Devem ainda ser quantificados os produtos não vendáveis gerados no processo.
- Produção de cada lote. Este valor nem sempre corresponde às vendas. Deve por isso ser recolhido por amostragem à saída dos fragmentadores;

- Valor da produção de cada lote em unidades monetárias para medição dos índices de rendibilidade de cada um. É importante conhecer qual o valor unitário do benefício originado por cada lote.

No final desta fase é já possível projectar e sistematizar eventuais necessidades de alteração do funcionamento da instalação, quer a nível do diagrama, quer dos equipamentos quer em termos de formação de pessoal.

3. Amostragem e análise laboratorial

A preceder a campanha de amostragem deve ser efectuado um levantamento geológico da pedra. Neste levantamento deve ser dada especial ênfase à relação entre as características geológicas e técnicas que lhes estão associadas. Como exemplos podemos apontar a textura, a friabilidade, o grau de alteração, bem como a fracturação e micro fissuração existente de origem natural ou provocada pelos trabalhos de desmonte efectuados.

As amostras da alimentação e dos produtos de descarga de cada um dos equipamentos, tanto fragmentadores como classificadores, deve ser efectuada tendo sempre em atenção o local de origem desse material na pedra. As amostras devem ser representativas e o seu número suficiente para que seja assegurada a fiabilidade dos resultados na fase seguinte, que corresponde ao ajuste dos modelos dos equipamentos. Tanto na amostragem como na análise granulométrica deve haver o cuidado de seguir procedimentos normalizados, para assegurar que todas as amostras e análises são comparáveis.

Como consequência desta fase torna-se possível proceder aos primeiros acertos em termos de funcionamento e regulação dos equipamentos principais da instalação.

4. Ajuste de modelos cinéticos para as operações unitárias

Uma vez obtidos os resultados das análises referentes ao funcionamento de cada um dos equipamentos, é possível iniciar um processo dialéctico de ajuste dos modelos, com re-amostragem sempre que isso se torne necessário. Nesta fase, é importante dar atenção não só à qualidade dos ajustes mas também identificar os lotes nos quais os valores apresentam, sistematicamente, desvios elevados relativamente aos valores reais. Nesta eventualidade devem ser tomadas medidas no sentido de os corrigir os erros e acertar a interpretação dos resultados. Estas podem, inclusivamente, incluir a análise de outras funções de ajuste ou a reformulação dos modelos aplicados. Deve ainda ser dada atenção às características mineralógicas e petrográficas do jazigo, durante a interpretação dos resultados e, se necessário, ajustar parâmetros diferentes para as diversas zonas da pedra.

Desta fase resulta a capacidade de simulação das máquinas e, consequentemente, de previsão dos seus resultados industriais.

5. Avaliação da interacções entre os equipamentos

Esta fase é particularmente importante, nomeadamente para a simulação dos circuitos fechados. Uma boa sintonia entre os modelos de cada fragmentador e do crivo que lhe fecha o circuito com os dados reais desse mesmo circuito fechado, podem evitar perdas de tempo e maus resultados em ensaios de ajuste da produção a solicitações específicas. Em particular quando se pretende produzir lotes de gama estreita ou com elevados coeficientes de forma. É também importante a verificação do comportamento da curva de descarga de cada fragmentador à variação de regulação do anterior, permitindo avaliar, deste modo, os benefícios potenciais de uma regulação conjunta.

Com esta fase inicia-se a análise e conhecimento do funcionamento sistémico da instalação sob o ponto de vista do processo.

6. Definição de estágios da instalação

O método de optimização utilizado para a optimização dos circuitos de fragmentação graúda baseia-se na *programação dinâmica*. A sua implementação exige a subdivisão do circuito em estágios cada um dos quais apenas dependente do anterior. No tipo de diagramas em análise e sob um ponto de vista absoluto, esta premissa é de muito difícil ou mesmo de impossível implementação. Os calibres finos produzidos nos primeiros estágios de fragmentação são aí separados, voltando a integrar o circuito nos estágios finais. No entanto, é possível e vantajoso utilizar esta metodologia com algumas adaptações (Baptista, 1988), pois ela permite a redução significativa do número de iterações, factor fundamental para a obtenção de resultados em tempo útil e, consequentemente, para permitir a incorporação do modelo da instalação como previsor num sistema automático de controlo.

É desta fase que sai a base funcional para o modelo global com o qual se fará o cálculo da maximização do benefício.

7. Modelo da instalação

O modelo é uma solução personalizada para cada instalação. Deve ser capaz de simular e prever os resultados de todas as alternativas válidas de regulação, incluindo fragmentadores, classificadores, by-passes, especificações dos lotes e todas as variações esperáveis por parte do mercado, desde a variação da procura até às alterações dos preços ou das mais valias inerentes à produção de cada lote. É com este modelo da instalação que se procede à optimização do seu funcionamento. Assim, ele tem de ser capaz de responder às seguintes perguntas:

- Como ajustar a produção à procura?
- Como produzir mais, do que vale mais?
- Como minimizar a produção de lotes indesejáveis?
- Como aumentar a flexibilidade da produção?
- Como maximizar o benefício?

Desta fase sai o modelo operacional de previsão dos resultados industriais. É este modelo que na fase seguinte vai ser implementado para optimização do processo produtivo.

8. Implementação

A implementação do sistema de optimização deve ser efectuada em duas etapas:

1ª Avaliação das capacidades de adequação das previsões efectuadas aos resultados reais.

É importante nesta fase tentar detectar, analisar e corrigir eventuais desvios, nomeadamente em relação às distribuições granulométricas, entre os valores previstos pelo simulador e os verificados na prática.

Para além destas verificações, o modelo pode ainda ser utilizado como auxiliar de decisão do operador da instalação para minimizar o tempo de reacção à variação das condições operacionais.

Após uma avaliação positiva e caso as condições operacionais da instalação o permitam, passa-se à fase seguinte:

- 2ª Integração do modelo de optimização no sistema de controlo. Com esta operação, este sistema adquire capacidade de decisão sobre o decorrer do processo. Isso permite-lhe actuar em tempo real no sentido de manter permanentemente elevados índices de rendibilidade independentemente da variação das características da alimentação.

A garantia de bom funcionamento desta abordagem passa ainda pela formação dos operadores e de todo o pessoal que lida com a instalação, não só na utilização do programa mas também nas áreas da amostragem, o do funcionamento dos equipamentos.

O resultado desta fase é uma instalação de fragmentação a funcionar de forma optimizada, de acordo com os múltiplos objectivos ponderados ao nível da gestão da unidade de produção.

9. Avaliação dos resultados

Após a implementação de todos os procedimentos a avaliação final permite a quantificação dos ganhos obtidos e, eventualmente, decidir da redefinição de algum aspecto que possa ser melhorado. A avaliação dos ganhos deve ser efectuada relativamente à situação anterior à intervenção. Pode ainda acontecer que, devido à evolução verificada nos múltiplos factores operacionais da unidade, haja necessidade ou tenham sido criadas condições para reequacionar todo o processo e repetir os passos necessários sob as novas condições operacionais.

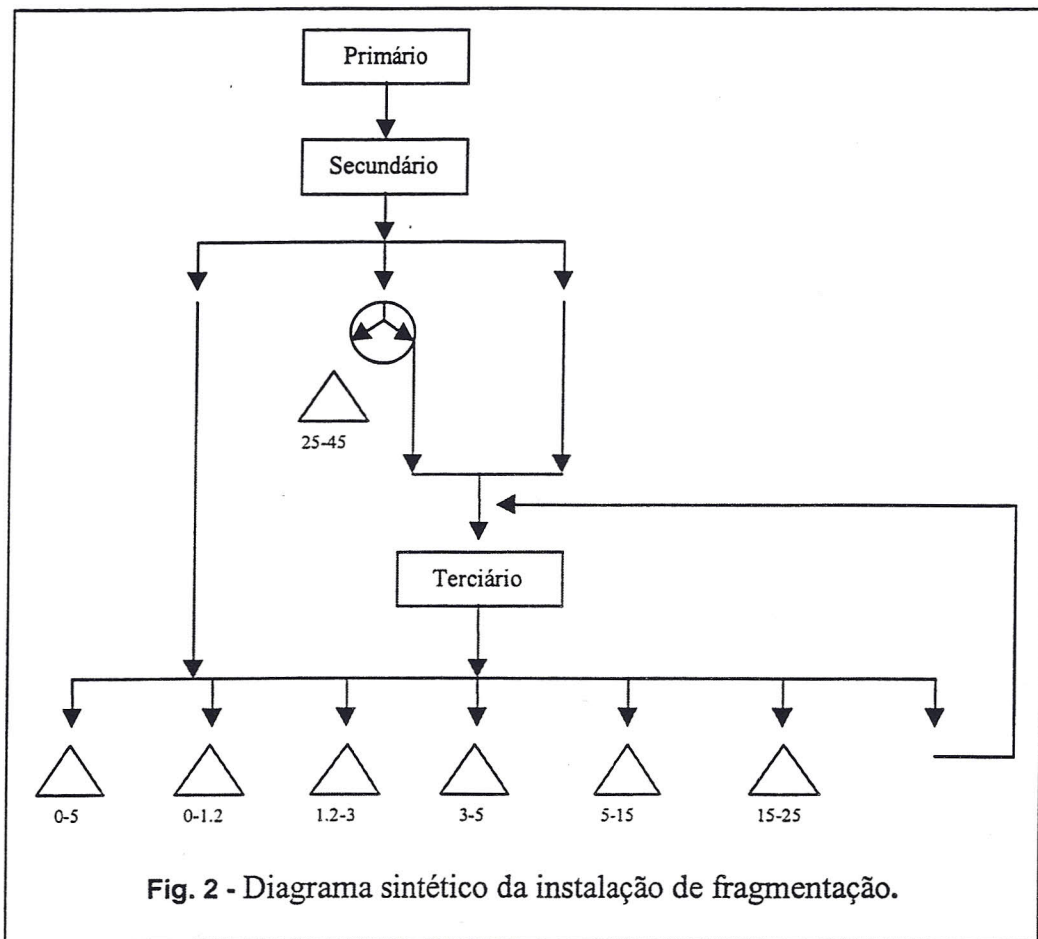
ANÁLISE DE CASO

Apresentada a metodologia, pretende-se agora dar uma ideia das variações de rendimento que ocorrem numa instalação de produção de inertes, a partir de pequenas oscilações do valor da regulação dos fragmentadores. Para tal recorremos a um acontecimento incontornável nestas unidades que é o contínuo desgaste do revestimento dos fragmentadores por acção da rocha submetida às acções de cominuição. O valor deste desgaste depende da abrasividade, sendo o teor em sílica, normalmente, um bom indicador para avaliação deste parâmetro. Como exemplo podemos indicar que em rochas com um elevado teor em sílica, como o granito, o desgaste nos moinho cónicos chega a ser da ordem de 1 mm por cada turno.

Para demonstrar as vantagens da utilização de um sistema de optimização recorremos a uma instalação que se encontra a produzir inertes a partir de um afloramento granítico. Esta apresenta um diagrama com três estágios de fragmentação, trabalhando o último em circuito fechado (fig.2). Os produtos finais mais graúdos são obtidos logo após o segundo estágio onde há a possibilidade de obter um lote 25-45mm ou 45-65mm por manipulação de um by-pass e/ou substituição das redes de um crivo. No terceiro estágio são produzidos os lotes com calibres inferiores a 25 mm. Aí podemos encontrar desde areias finas até britas, sendo o *tout venant* (tv) produzido de acordo com as solicitações, por mistura de vários lotes.

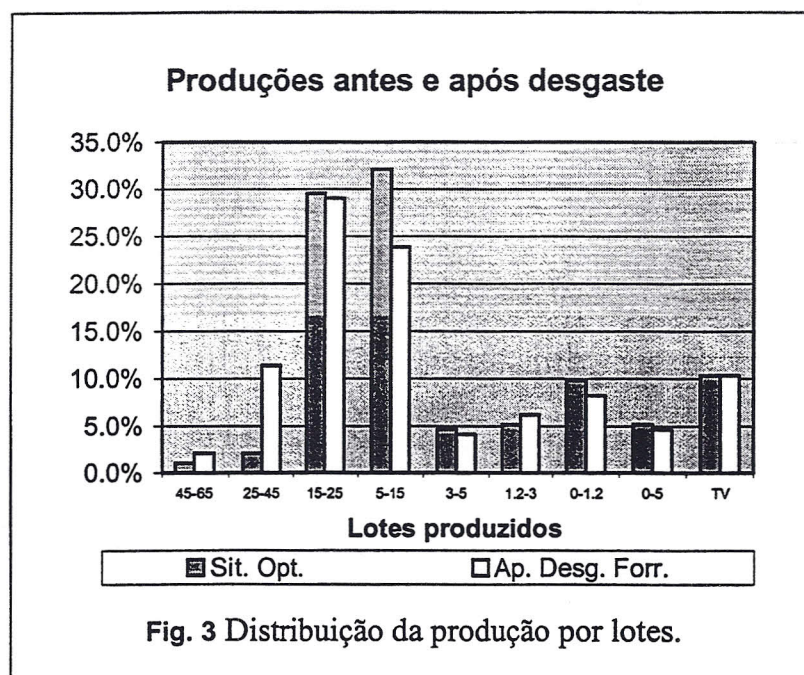
O primeiro passo para efectuar a análise de sensibilidade das variações do valor do benefício face às variações da regulação dos fragmentadores foi a colheita de amostras da descarga de cada uma das máquinas. Depois de analisados e tratados os dados, procedeu-se à configuração do modelo da instalação, com o qual se procedeu à simulação do seu funcionamento.

Como ponto de partida para análise escolheu-se uma configuração optimizada, obtida a partir do valor de venda dos lotes, e admitindo a existência de mercado para toda a produção. De seguida efectuou-se uma simulação utilizando em todos os fragmentadores uma abertura superior 1 mm à calculada para a configuração optimizada, mantendo todos os outros



parâmetros inalterados. Este aumento no valor da abertura pretende simular os acontecimentos provocados pelo desgaste das forras.

Na Fig.3 pode ser observado o valor das produções antes (situação otimizada) e após desgaste. Verifica-se, como seria de esperar, um aumento da produção dos lotes mais graúdos e um diminuição dos de menor calibre. Neste caso concreto a interpretação é a seguinte: ao aumentar o valor da regulação, a composição granulométrica média dos produtos de descarga



subiu em toda a instalação. No terciário esta subida representa um aumento da percentagem de partículas produzidas acima dos 25 mm. Resulta daqui um aumento da carga circulante (de 8 para 22t/h – Quadro 1) e, conseqüentemente, uma diminuição da capacidade efectiva desta máquina. Quanto ao aumento da produção dos lotes de calibre superior, ele tem duas origens: por um lado o crescimento do calibre médio da produção e por outro o facto de o terciário ter diminuído a sua capacidade efectiva devido ao aumento no caudal do seu circuito fechado.

Para que o cálculo das variações no benefício fosse efectuado a uma escala que permitisse evidenciar os resultados obtidos, assumimos que: o desgaste não era compensado pelo sistema de controlo, que o aumento no valor da regulação de todas as máquinas em 1 mm face à situação óptima bem como as condições de mercado se mantiveriam ao longo de um ano. Para o mesmo efeito arbitramos ainda uma produção de um milhão de toneladas por ano, cerca de 4000 t/dia. Este é um valor relativamente elevado para os padrões correntes neste momento em Portugal mas que consideramos adequado para que existam boas condições de exploração. Os resultados obtidos constituem, em si, um excelente indicador das potencialidades de sucesso da metodologia anteriormente descrita.

O conjunto dos resultados são apresentados no Quadro 1. Nele podemos observar que este simples aumento de 1 mm na regulação de cada máquina pode, nesta unidade, provocar perdas da ordem dos 1.7% no valor da facturação o que representa, num milhão de toneladas por ano, um valor superior a 100 000 Euros.

Quadro 1

LOTES	Euros/t	SITUAÇÃO OPTIMIZADA			APÓS DESGASTE DAS FORRAS		
		t	%	Euros	t	%	Euros
45-65	5.75	10 363	1.0%	59 585	20 725	2.1%	119 171
25-45	6.25	20 725	2.1%	129 534	113 990	11.4%	712 435
15-25	6.75	295 337	29.5%	1 993 523	290 155	29.0%	1 958 549
5-15	8.25	321 244	32.1%	2 650 259	238 342	23.8%	1 966 321
3-5	10.20	46 632	4.7%	475 648	41 451	4.1%	422 798
1.2-3	8.75	51 813	5.2%	453 368	62 176	6.2%	544 041
0-1.2	3.75	98 446	9.8%	369 171	82 902	8.3%	310 881
0-5	3.25	51 813	5.2%	168 394	46 632	4.7%	151 554
TV	5.00	103 627	10.4%	518 135	103 627	10.4%	518 135
TOTAL		1 000 000	100%	6817617	1 000 000	100%	6 703 886
Equipamento		Primário	Secundário	Terciário	Primário	Secundário	Terciário
Regulação (mm)		160	13	10	161	14	11
Carga Circulante (t/h)				8			22
Perdas totais						1.7%	113731
Perdas médias mensais							9478

CONCLUSÕES

Mediante os resultados apresentados facilmente se conclui das enormes vantagens da aplicação dos procedimentos de optimização apresentados. Ao partirmos de uma situação optimizada, da qual a generalidade das instalações estão distantes, foi possível demonstrar, com alguma facilidade, que não são necessárias grandes alterações na regulação para que as perdas nos resultados globais atinjam valores consideráveis.

Sabemos que mesmo as instalações mais sofisticadas apenas apresentam optimização ao nível da máquina. Uma abordagem deste tipo, embora meritória não pode contemplar toda a complexidade dos parâmetros e suas inter-relações no conjunto de uma instalação de

fragmentação e classificação. É assim a abordagem sistêmica proposta, não só uma forma inovadora de resolução global do problema, como também altamente eficaz.

BIBLIOGRAFIA

1. Arbiter, N., and Harris C.C., 1982, "Scale-up and Dynamics of Large Grinding Mills - A Case Study", Design and Installation of Comminution Circuits, AIMM and Petr. Eng., pp.491-508.
2. Austin, J.G., Klimpel, R.R., Luckie, P.T. and Rogers, R.S.C., 1982 "Simulation of Grinding Circuits for Design", Design and Installation of Comminution Circuits, AIMM and Petr. Eng., pp.301-324.
3. Austin, J.G., Klimpel, R.R. and Luckie, P.T., 1984, "Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling", Soc. Mining Eng. AIME, New York, N.Y.
4. Austin, J.G. and Concha, F., 1987, "Diseno y Simulación de Circuitos de Molienda", Univ. Concepción, Concepción.
5. Baptista, J.B. e Leite, M.R.M., 1994, "Non-linear Transport Model for Rod Mill Simulation", 8th European Symposium on Comminution, 17-19/5 Stockholm, Sweden.
6. Griffith, A.A., 1920, "Phenomena of Rupture and Flow in Solids", Phil. Trans. Roy. Soc. London.
7. Griffith, A.A., 1924, "The Theory of Rupture", Proc. First Int. Congr. For Applied Mechanics, Delft.
8. Grujić, Milorad et al. 1984, "Desarrollo de Ecuaciones Para la Calculacion de la Optima Potência de Electromotores de Molinos Semiautogenos". IV Simposium Sobre Molienda, Nov. de 1984 Viña Del Mar, Chile.
9. Herbst, J.A., 1977, "Estrategias de Control para Circuitos Cerrados de Molienda Basadas en Modelos", Viña del Mar, Chile, pp.561-570.
10. Herbst, J.A. and Fuerstenau, 1980, "Scale-up Procedure for Continuous Grinding Mill Design Using Population Balance Models", International Journal of Mineral Processing, 7, pp.1-31.
11. King, R.P., 1992, "Techniques for Estimating the Amount of Grain-Boundary Fracture During Comminution of Mineralogical Materials", Comminution, Theory and Practice, S. Komar Kawatra, SMME- AIME
12. Klimpel, R.R., 1992, "Some Experiences With Using Population Balance Models to Analyse Industrial Grinding Circuits", Comminution-Theory and Practice, S. Komar Kawatra, Editor, pp.219-232.
13. Leite, M.R.M., 1985, "Cinética da Fragmentação. Método Global de Determinação de Parâmetros", Estudos, Notas e Trabalhos, DGGM, t.27, pp.105-111.
14. Leite, M.R.M., 1990, "Kinetic Models for the Simulation of Crushing Circuits", Minerals Engineering, Vol3, Nº1/2, pp.165,180.
15. Liu, J. and Schöner, K., 1994, "Modelling of Interparticle Breakage", Pre-prints, 8th European Symposium on Comminution, Stockholm, Sweden.
16. Lynch, A.J., 1977, "Mineral Crushing and Grinding Circuits", Elsevier scientific, New York, 1977
17. Lynch, A.J. and Morrel, S., 1977, "The Understanding of Comminution and Classification and its Practical Application in Plant Design and Operation", pp.405-426.
18. Lynch, A.J. and Rao, T.C., 1965, "Digital Computer Simulation of Comminution Systems". Proc. 8th Comm. Min. Metall. Congr., Aust., N.Z., 6: 597-606.
19. Lynch, A.J., Whiteman W.J. and Narayanan, S.S., 1986, "Ball Mill Models: Their Evolution and Present Status", Advances in Mineral Processing, Arbiter Symposium, Society of Mining Engineers, Inc, pp.48-66.
20. Madureira, C.M.N., 1992, "A Metodologia Sistêmica", Geo-sistemas, Nº1, pp.21-35
21. Madureira, C.M.N. e Regueiras, P.F.R., 1972, "Conceitos Fundamentais Para Um Estudo Fenomenológico Dos Processos De Fragmentação", C.E.E.E.S.- Porto e C.E.E.N.- Lisboa nº29, FEUP.
22. Schöner, Klaus, 1986, "Advances in the Physical Fundamentals of Comminution", Advances in Mineral Processing, Arbiter Symposium, Society of Mining Engineers, Inc, pp.19-32.