# AMOSTRAGEM E MODELAMENTO DOS CIRCUITOS DE COMINUIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

B. B. Lira – Universidade Federal do Paraíba. Campus Universitário - Departamento de Engenharia Civil. Laboratório de Matérias e Estruturas. CEP 58059-900 – João Pessoa PB.
E-mail: belarminolira@ct.ufpb.br

## RESUMO

Técnicas de amostragem de circuitos de moagem e classificação são abordadas através dos trabalhos desenvolvidos nas usinas de beneficiamento mineral da Pancontinental, localizada em Kalgoorlie, Austrália e da Mina Igarapé-Bahia da Companhia Vale do Rio Doce CVRD, localizada no Estado do Pará. Estes trabalhos foram utilizados para modelar e simular as unidades em apreço. Os mecanismos e equações referentes ao modelo matemático para os hidrociclones, desenvolvidos no Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre - JKMRC da Universidade de Queensland - Austrália, são abordados. Este modelo tem demonstrado sua eficiência em modelar e simular circuitos de cominuição/classificação com a precisão requerida pela industria mineral.

PALAVRAS CHAVE: Amostragem, Hidrociclone, Modelamento, Classificação.

## 1. INTRODUÇÃO

O interesse industrial em amostrar e modelar um fluxo de polpa em uma usina de processamento mineral vem crescendo nas ultima décadas. Um dos motivos deste crescimento é a conscientização empresarial da potencialidade da utilização das informações, provenientes da amostragem e modelamento, no aumento da capacidade e eficiência operacional dos equipamentos.

A amostragem dos circuitos de fluxo de polpa fornece subsídios no desenvolvimento de modelos matemáticos para uma unidade de processo, tais como, os circuitos de cominuição/classificação. A introdução de espectrômetro "on line" de raios-X, medidor magnético de fluxo e o P.S.M. "Particle Size Monitor" como instrumentos fundamentais de controle de processo nos circuitos de beneficiamento mineral, vem automatizando necessariamente a amostragem dos circuitos industriais. O controle de processo, que sofreu um grande impulso com aplicações da informática e o modelamento como uma ferramenta, utilizam-se da amostragem como base à sua aplicabilidade. Neste trabalho apresentamos detalhes de amostragem e modelamento de dois circuitos de cominuição de minério de ouro. Um da Mina Igarapé-Bahia da Companhia Vale do Rio Doce CVRD e um segundo da Pancontinental "Gold Mine" localizada na Austrália. Para o circuito da CVRD apresentamos um sistema de amostragem mecânica desenvolvido para coleta de dados na descarga dos moinhos. Ainda salientamos técnicas desenvolvidas no Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre JKMRC e experiência do autor por ocasião da amostragem dos circuitos de cominuição/classificação

## 2. TÉCNICAS E METODOLOGIA DE AMOSTRAGEM

Amostragem é uma extração de uma porção do fluxo mineral seguido da preparação das amostras em laboratório, através de processos químicos e/ou físicos. É por natureza um processo aleatório, como conseqüência o erro ou desvio sistemáticos na coleta das amostras é também aleatório.

A amostragem dos circuitos de fluxo de polpa fornece subsídios no desenvolvimento de modelos matemáticos para uma unidade de processo, tais como, os circuitos de cominuição e classificação. Em todas as aplicações, condições operacionais são modificadas para determinar modelos estatísticos ou parâmetros, baseados em fundamentos teóricos do

processo. A literatura apresenta uma vasta bibliografia de modelos (Napier-Munn et al, 2001; Lira, 1990; Lira e Kavetsky, 1991 e 1992; Lynch, 1977; Lynch e Rao,1975; Kavetsky 1977; Nageswararao, 1978;), desenvolvidos a partir da combinação da amostragem e fundamentos físicos do processo.

Existem várias maneiras de melhorar a qualidade na obtenção de dados a partir da amostragem. Provavelmente um dos pontos mais críticos é manter a estabilidade do circuito durante o período da amostragem e a representatividade dos dados obtidos. Principalmente quando o minério na jazida apresenta diversas características de fragmentação como nos dois casos em estudo. As seguintes orientações devem ser seguidas antes e durante o processo da amostragem. Em uma primeira fase devemos verificar as frentes de lavras do minério e definir pontos da mina de onde os minérios devem ser lavrados e estocados no pátio de alimentação da instalação de britagem. Desta forma garantimos uma uniformidade na alimentação do circuito.

Em uma segunda fase devemos nos familiarizar com o circuito de beneficiamento e analisar os pontos de amostragem. A usina deverá estar operando estável a mais de 60 minutos antes de iniciar a amostragem, como também esta estabilidade deverá permanecer durante o período de obtenção dos dados. A estabilidade do circuito deverá ser observada para todas as variáveis operacionais da alimentação da planta. Todas as variáveis mensuráveis a exemplo das taxas e níveis de fluxos e as variáveis operacionais como adição de água, tipo do minério, distribuição granulométrica da alimentação devem permanecer invariáveis durante a amostragem.

Através dos resultados de cominuição em laboratório, utilizando um duplo pendulo (Narayanan, 1986; Leung, 1988; Lira 1990; Lira 2002), uma relação entre a energia específica e o produto resultado da fragmentação foi estabelecido para cada minério (Lira 1994; Lira e Leung, 1986; Narayanan, et al. 1987.). Também famílias de curvas destes minérios foram determinadas conforme se mostra as Figuras 1A e 1B para os minérios da CVRD e da Pancontinental respectivamente (Lira, 1999; Lira e Leung, 1987). Observa-se nestas curvas que os minérios fragmentam-se de maneira semelhante. Estas correlações são fundamentais para determinar as características de cominuição dos minérios no modelamento matemático dos equipamentos de moagem (Lira e Kavetsky, 1991 e 1992; Lira, 1990; Leung, 1988; Narayanan, 1985; Napier-Munn et al. 2001)

## 3. AMOSTRAGEM NAS USINAS DE PROCESSAMENTO MINERAL

Como parte do projeto "The Simulation and Automatic Controlo of Mineral Treatment Process", conduzido pelo Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre JKMRC e financiado pela Australian Mineral Industries Research Association – AMIRA, a amostragem do circuito de cominuição da usina de processamento mineral da Pancontinental "Gold Mine" – Paddington, Kalgoorlie, Austrália, foram conduzidas entre outros circuitos (Lira e Leung, 1987). A usina de processamento mineral da Companhia Vale do Rio Doce - Mina Igarapé-Bahia também foi amostrada tendo como suporte um convênio de cooperação técnica entre o Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco DEMINAS/UFPE e a CVRD (Lira, 1999). Ambas as usinas foram amostradas pelo autor com os seguintes objetivos:

i. Estabelecer um balanço de massa dos circuitos de cominuição/classificação;
ii. Definir modelos que permitisse simular os circuitos cominuição/classificação;
iii Determinar os parâmetros requeridos pelos modelos, para estabelecer condições operacionai que permitam o aumento da capacidade das usinas;
iv Coletar dados para programas de pesquisa dos circuitos indústrias de processamento mineral das Instituições envolvidas.

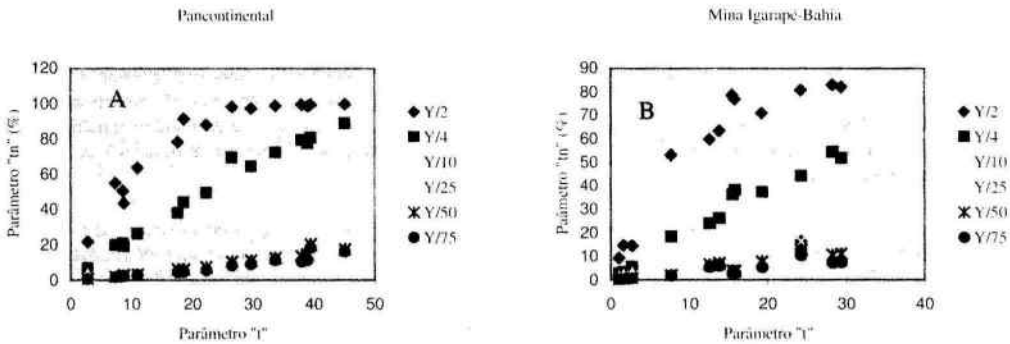


Figura 1A e 1B – Famílias de curvas de fragmentação dos minérios da Pancontinental e da Mina Igarapé-Bahia da CVRD. (Y – Tamanho das partículas).

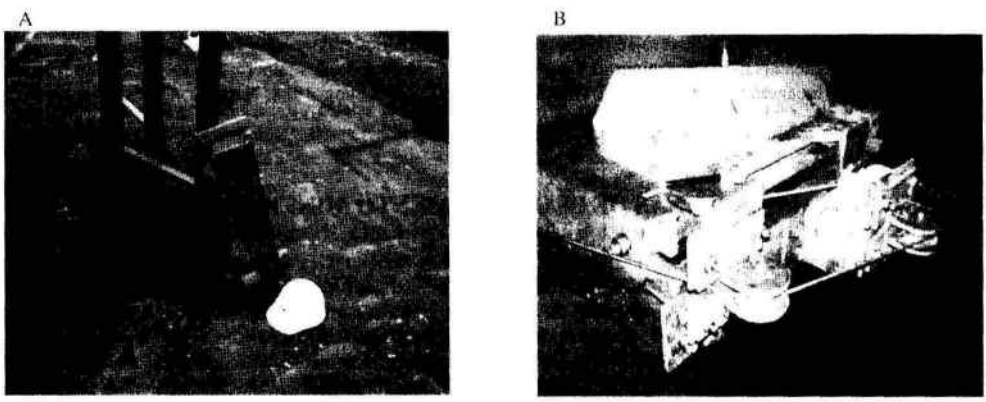


Figura 2A e 2B – Equipamento mecânico utilizado na amostragem do fluxo de polpa do moinho primário da Mina Igarapé-Bahia.

O diagrama do circuito de moagem da Pancontinental é apresentado na Figura 03 onde destaca os pontos de amostragem. Na usina da pancontinental os testes foram realizados nas capacidades de 135 e 128 t/h e na Mina Igarapé-Bahia a alimentação nova do circuito era de 136 t/h. Em cada amostragem as variáveis do circuito, tais como adição de água, fluxo de massa e alimentação dos hidrociclones, foram monitorizadas por um período de 30 minutos para assegurar a estabilidade do circuito. Após o qual as amostras foram coletadas, utilizando-se equipamentos automáticos e manuais em intervalos de 15 minutos por um período de 90 minutos. A estabilidade do circuito pode ser observada através da uniformidade da potência dos moinhos antes e durante a amostragem conforme se ilustra na Figura 4. Verifica-se neste diagrama a estabilidade dos moinhos com uma potência em torno dos 820Kwatts para o moinho de bolas.

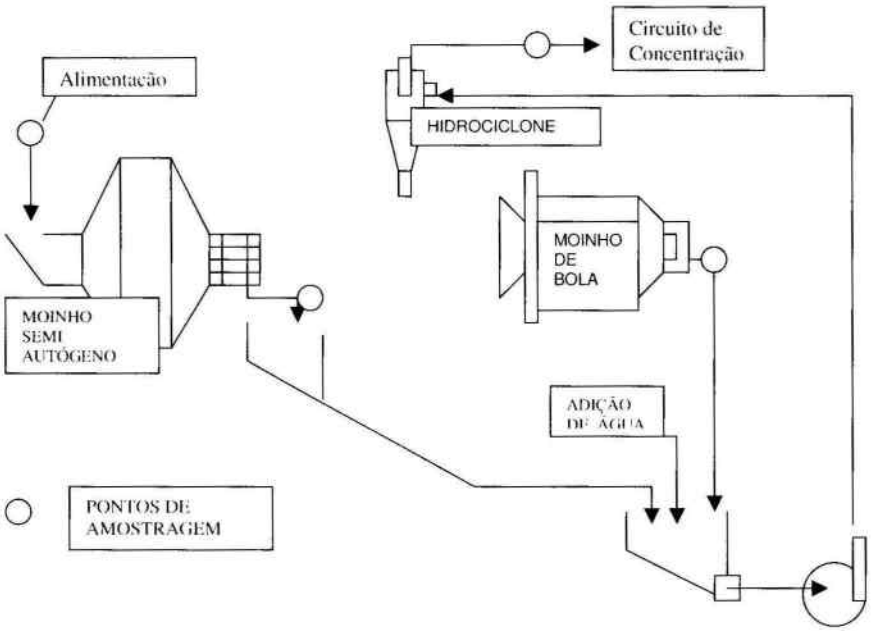


Figura 3 – Representação esquemática do circuito de cominuição/classificação da Pancontinental

Baseado nas dimensões geométricas e uma extensiva quantidade de dados operacionais dos hidrociclones industriais, Lynch-Rao (1975) desenvolveram as equações destes equipamentos para estabelecer sua característica de desempenho. As mudanças nas variáveis denominadas:vazão de poupa (C); diâmetro de corte ($d_{50}$); recuperação de água no "underflow" (Rf) e recuperação volumétrica da polpa no "underflow" (Rv); são controladas pelas seguintes variáveis que podem ser ajustadas: diâmetro do "Vortex Finder" (Dv) diâmetro do "Spigot" (Ds); pressão de alimentação (P) e concentração de sólido na polpa alimentada.

A influência do diâmetro injetor, ângulo do cone e comprimento do hidrociclone são quantificados nas equações apresentadas nas seções seguintes. Entretanto, as características do minério no comportamento dos hidrociclones não são incorporadas. Em conseqüência, um extensivo número de dados em pelo menos um dos classificadores a ser analisado, é requerido para determinar os parâmetros que dependem do material.

O modelo de Nageswararao (1978) foi utilizado para simular os circuitos de classificação das usinas de beneficiamento da Pancontinental e da Mina Igarapé-Bahia. Conforme descrito nas seções anteriores, o modelo possui um numero de equações que descreve mudanças na curva de eficiência do equipamento e na alimentação. As equações são utilizadas para calcularem os parâmetros do modelo correspondentes a uma particular aplicação, permitindo descrever desta forma o desempenho do classificador. As equações abaixo descrevem a variação da pressão, diâmetro de corte ($d_{50}$), e "water split" (c) no hidrociclone, que foram utilizadas no modelamento do circuito de classificação das usinas de beneficiamento analisadas.

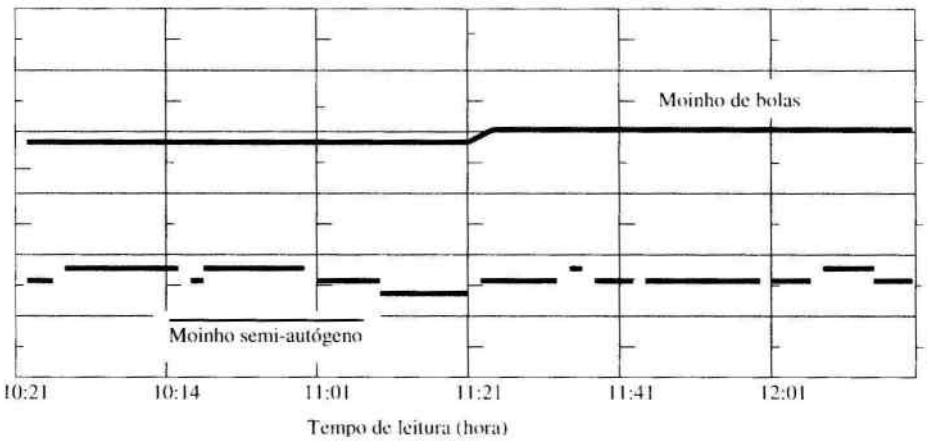


Figura 4 – Típica oscilação da potência dos moinhos da Pancontinental antes e durante a coleta de dados do circuito cominuição/classificação.

$$P^{-0,5} = K_q\, D^2\, \rho^{-0,5}\, Q^{-0,5}\, Q^{-1}\, V^{0,6}\, I^{0,45}\, (L/D)^{0,2}\, \Phi^{0,1}\, D^{-0,15} \quad (1)$$

$$d_{50c} = K_d\, D\, \exists^{0,93}\, \alpha^{-0,22}\, V^{0,52}\, S^{-0,74}\, I^{0,5}\, (L/D)^{0,2}\, Q^{0,15}\, D^{-0,65} \quad (2)$$

$$\alpha = P / (\rho\, g\, D) \quad (3)$$

$$(1 - c) = K_w\, \exists^{0,26}\, \alpha^{-0,53}\, V^{-1,19}\, S^{2,39}\, I^{-0,5}\, (L/D)^{0,22} \quad (4)$$

$$\exists = v / (1 - v)^3 \quad (5)$$

$$Qu / Q = K_v\, \alpha^{0,31}\, D_v^{-0,94}\, S^{1,83}\, I^{-0,25}\, (L/D_i)^{0,22}\, \Phi^{-0,24} \quad (6)$$

onde,
- $v$ = Fração volumétrica dos sólidos na polpa de alimentação;
- $V$ = Vazão do minério no "underflow" ($m^3/h$);
- $c$ = Fração de água no "underflow";
- $S$ = Diâmetro do "Spigot" (m);
- $L$ = Comprimento da seção cilíndrica (m);
- $D$ = Diâmetro do hidrociclone (m);
- $Q$ = Vazão da polpa na alimentação ($m^3/h$);
- $Qu$ = Vazão do minério no "underflow" ($m^3/h$);
- $P$ = Densidade da polpa de alimentação ($t/m^3$);
- $\Phi$ = Ângulo do cone (graus);
- $\alpha, c$ = Parâmetros
- $P$ = Pressão da alimentação (kPa);
- $g$ = Aceleração da gravidade ($m/s^2$)
- $V, I, S$ = Diâmetro normalizados do "Vortex Finder", "Inlet" e "Spigot";

A constante de proporcionalidade Kq é função da alimentação do material e diâmetro do hidrociclone. Para os hidrociclones classificando minérios idênticos, a dependência do diâmetro pode ser empiricamente representada pela equação segundo NAGESWARARAO:

$$K_q = K_{qo} \cdot ( D )^{0,65} \qquad (7)$$

onde, Kqo depende das características da alimentação dos sólidos (ex. peso específico). Como pode ser observado nas equações descritas, há quatro parâmetros que necessitam ser determinados para uma específica aplicação. Estes parâmetros são caracterizados a partir dos dados de amostragem e correspondem a: Kd - separação das partículas; Kv - divisão de volume de polpa; Kq - capacidade do hidrociclone e Kw - partição de água.

Estes parâmetros dependem das características das partículas sólidas que estão sendo classificadas e não da geometria do equipamento. Desta forma podem ser utilizadas para prever o comportamento dos hidrociclones, operando em condições variadas. As equações apresentadas acima não só podem ser utilizadas para calcular os parâmetros correspondentes a uma determinada aplicação, como também para prever o desempenho dos hidrociclones em um intervalo de condições de alimentação e dimensões. No primeiro caso, os parâmetros da curva de eficiência são ajustados e os valores obtidos são introduzidos nas equações para determinar os parâmetros. A equação seguinte foi utilizada para ajustar a curva de eficiência reduzida para os hidrociclones analisados.

$$E ( d / d_{50c} ) = K \; ( e^{\alpha} - 1 ) / ( e^{\alpha (d/d50c)} + e^{\alpha} - 2) \qquad (8)$$

onde "d" é o tamanho da partícula, E a eficiência, "$d_{50}$" o tamanho da partícula no qual apresenta uma eficiência de classificação de 50% e "**α**" controla a forma da curva. Este parâmetro "**α**" depende somente das características do minério classificado e não da geometria dos hidrociclones ou condições de operação. No caso de simulação, as constantes são usadas para calcular novos valores de "c" e "$d_{50c}$" correspondente à nova condição. Estes dados em conjunção com os valores do parâmetro "**α**", definem o novo produto a partir de uma dada alimentação. Utilizando-se técnicas de regressão não-linear, curva de eficiência da equação 08 é ajustada de tal forma que reproduza a classificação observada durante a amostragem dos hidrociclones. Os parâmetros dos hidrociclones apresentados na Tabela I, obtidos através das técnicas descritas neste trabalho, reproduzem adequadamente os fluxos de partículas e polpa observados no circuito da Pancontinental como pode ser observado nas Tabelas II e III

Tabela I – Parâmetros dos hidrociclones da Pancontinental

| Teste | Constantes | | | | Parâmetros da curva partição | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Kd | Kq | Kv | Kw | α | c | $d_{50c}$ |
| Minérios Primário e Secundário na proporção de 1:1 | $1,56 \times 10^{-4}$ | 363 | 3,31 | 5,70 | 4,60 | 0,67 | 0,11 |
| Minério Primário | $1,78 \times 10^{-4}$ | 409 | 4,51 | 7,59 | 4,53 | 0,44 | 0,19 |

Tabela II – Comparação entre os produtos observados e calculados nos fluxos doshidrociclones, operando com uma alimentação de 100% do minério primário.

| TESTE 1 | % Retida Finos (-62μ) | % Sólidos | Massa (t/h) sólido | água |
|---|---|---|---|---|
| "overflow" | | | | |
| Calculados | 70,31 | 32,12 | 133,69 | 282,12 |
| Observados | 72,80 | 32,40 | 134,60 | 282,12 |
| "underflow" | | | | |
| Calculados | 15,50 | 68,34 | 137,32 | 296,41 |
| Observados | 16,60 | 68,20 | 137,32 | 295,50 |

Tabela III – Comparação entre os produtos observados e calculados para os hidrociclones operando com uma alimentação de 50% do minério primário.

| TESTE 2 | % Retida Finos (-62μ) | % Sólidos | Massa (t/h) sólido | água |
|---|---|---|---|---|
| "overflow" | | | | |
| Calculados | 60,03 | 42,39 | 126,97 | 171,44 |
| Observados | 56,00 | 42,90 | 128,40 | 172,58 |
| "underflow" | | | | |
| Calculados | 23,61 | 64,00 | 383,43 | 215,66 |
| Observados | 22,00 | 63,80 | 382,00 | 216,75 |

## 6. CONCLUSÃO

O modelo de Nagesrarao desenvolvido no JKMRC para os hidrociclones demonstrou sua eficiência em modelar e simular um circuito de classificação, com a precisão requerida pela indústria mineral.

i A eficiência operacional dos hidrociclones é função do tipo de minério, como evidenciado pelos valores dos parâmetros do modelo.

ii A instalação do amostrador mecânico na descarga do moinho primário da Mina Igarapé-Bahia é no mínimo mais eficiente devido sua configuração geométrica e operacionalidade.

iii A melhor condição de classificação foi atingida com a alimentação de 1:1 dos minérios da Mina da Pancontinental.

iv Os minérios analisados apresentam características de fragmentação semelhante.

## AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer ao corpo técnico das Empresas, onde as amostragens foram conduzidas, pelo o apoio na obtenção e processamento dos dados obtidos e apresentados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

Lira. B. B., Junior, D. S., Costa, M. M. P. Características de fragmentação do minério da mina igarapé-Bahia. *Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalúrgia*. Recife. 2002

Lira, B. B. and Kavetsky, A. Breakage Power in a Grinding Process. *XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia e III Encontro sobre Tecnologia Mineral do Hemisfério Sul*. São Lourenço, Minas Gerais. 1992

Lira, B. B. and Kavetsky, A. Application of a New Model-Based Method of Ball Mill Simulation and Design. *Minerals Engineering*, 3 No 1;2. 149-163p.London. 1991.

Lira, B. B. Modelos Matemático de Moagem: Parâmetros e Aplicação. *XIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia*. Salvador, 1990.

Lira, B. B. and Leung, K. Modelling and Simulation of the Paddington Grinding Circuit. *JKMRC Report*, 71p Brisbane, Australia., 1987.

Lira, B.B. The Development and Application of an Energy - Based Ball Mill Simulation and Design Technique, *University of Queensland*, Australia. Ph.D. Thesis. Brisbane, Australia. 1990

Lira, B. B. Ensaios de cominuição em laboratório com os minérios da Mina Igarapé-Bahia. Reporte. *Fundação de Apôia a Universidade Federal de Pernambuco FADE e Departamento de Engenharia de Minas da UFPE*. 46p. Recife. 1999.

Lira, B. B. and SAITO, F. Grinding Parameters for Copper Slags. *Processing in Mineral Technology*, Demirel & Ersayin. 519-526p. Rotterdam. 1994

Leung, K. An energy based, ore specific model for autogenous and semi-autogenous grinding mills. *Julius Kruttschnitt Mineral Centre, Department of Mining and Metallurgical Engineering, University of Queensland*, Ph.D. Thesis Australia. 1986.

Lynch, A. J., Whiten, W. J. and Narayanan, S. S. Ball mills models. Their evolution and present status. *Advances in Mineral Processing A. M. E./A.I.M.E.*, 46-66, 1986.

Lynch, A. J.; Rao, T. C. Modelling and scale-up of hydrocyclone classifier In: *International Mineral Processing Congress*, 11, Cagliari,. Processings, Cagliari; Universita Cagliari, p. 245-269. 1975

Lynch, A. J. Mineral Crushing and Grinding Circuits. The Simulation , Otimisation, Design and Control. *Elsevier Publlishing*, Amsterdam, 240p 1977.

Narayanan, S.S., Lira B.B. and Rong, R.X. A single particle breakage technique for the determination of comminution characterisation of coal. *Coal Preparation*, Australia **5**, 211-227. 1987.

Narayanan, S. S., Development of a laboratory single particle breakage technique and its application to ball mill modelling and scale-up. Ph.D. Thesis. *University of Queensland*. 1986

Nageswararao, K. Hydrocyclone Modelling and Scale-up. Ph.D. Thesis. *University of Queensland*, Austrália, 1978.

Napier-Munn T. Morrell, J., S. Morrison, R.D. Kojovic, T. Mineral Comminution Circuits. *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre*. Brisbane, 409p. 2001.

Whiten, W. J and Kavetsky, A.Studies on scale-up of ball mills. Mills desingn and grinding performance of large ball mills. *I.S.M.E/A.I.M.E* Mini Symposium. 83 85-94. Salt Lake City, Utah. 1983

Whiten, W. J and Kavetsky, A.Studies on scale-up of ball mills. *Minerals and Metallurgical Processing*. 1. 23-28. 1984.