

# NECESSIDADES, DEFICIÊNCIAS E AVANÇOS DOS ANALISADORES CONTÍNUOS DE DENSIDADE EM PROCESSOS MINERAIS<sup>1</sup>

Rodrigo Cesar Miranda<sup>2</sup>  
Marco Aurélio Soares Martins<sup>3</sup>  
Hugo Montalvão Gontijo<sup>4</sup>  
Jean Tadeu de Miranda Cunha<sup>5</sup>  
Mônica Guimarães Vieira<sup>6</sup>

## Resumo

Operações em processos minerais como moagem, classificação e concentração são bastante dependentes da densidade, daí se reconhece a importância de se terem medidas contínuas deste parâmetro com alto grau de confiabilidade. Os equipamentos comumente utilizados nos processos de tratamento mineral apresentaram alta taxa de falha de medição e ainda têm como desvantagem o custo elevado de implantação e manutenção. A convivência com estes problemas de medição de densidade motivou o desenvolvimento de um analisador que fosse barato, robusto e provesse medidas contínuas. O sistema de análise de densidade foi fundamentado na razão entre a massa da polpa e o seu volume. O sistema é capaz de receber amostras de diversos pontos da planta e de forma automática realizar medidas de densidade em minutos. O equipamento projetado apresenta estabilidade e representatividade de medida frente às variações da polpa. Adicionalmente, o fato de não se exigir um medidor para cada ponto torna o sistema flexível e vantajoso do ponto de vista econômico.

**Palavras-chave:** Analisadores contínuos; Densidade; Medição.

## CONTINUOUS DENSITY ANALYZERS IN MINERAL PROCESS: REQUIREMENTS, DISABILITIES AND ADVANCES

### Abstract

The efficiency of grinding, classification of solids, flotation, and other mineral operations is very dependent on the density, hence it is recognized the importance of taking continuous measurements of this parameter with a high degree of reliability. The equipment commonly used in mineral treatment processes have a high failure rate measurement and also the disadvantage of the high cost of deployment and maintenance. Living with these problems of measuring density motivated the development of an analyzer that is cheap, robust and could provide continuous measures. The analysis system was based on the density ratio between the mass of pulp and its volume. The system is able to receive samples from various parts of the plant and automatically perform density measurements in minutes. The device designed is able to give stable and representative measure of pulp variation during the process. Additionally, the fact of not requiring a different measure device for each point makes the system flexible and advantageous from an economic standpoint.

**Keywords:** Continuous analyzers; Density; Measurement

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

<sup>2</sup> Eng. Químico MSc, Processos, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia.

<sup>3</sup> Eng. Minas, Operações, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia.

<sup>4</sup> Eng. Controle e Automação, Automação, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia.

<sup>5</sup> Eng. Produção, Projetos, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia.

<sup>6</sup> Eng. Química, Processos, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia.

## 1 INTRODUÇÃO

O controle de processo tem se tornado cada vez mais importante nas indústrias de beneficiamento mineral devido à competição global, às rápidas mudanças das condições econômicas do mercado e às rigorosas regulamentações ambientais e de segurança. Em geral, a eficiência desse controle é dependente da presença de analisadores para medição das variáveis do processo. Quanto maior a frequência em que se têm dados e quanto maior a confiabilidade destes, maiores serão as possibilidades do sistema de controle obter melhores resultados de qualidade e produtividade.<sup>(1)</sup>

Dentre as diversas variáveis presentes na indústria de mineração, a densidade da polpa de minério é uma variável de grande importância no controle produtivo. Esta pode ser representada pela Equação 1, que é a razão entre determinada massa de material e seu volume:

$$\text{densidade} = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad \text{Eq. 1}$$

Para exemplificar a influência da densidade nos processos pode-se citar a moagem em que a densidade aumenta ou diminui a produção de finos.<sup>(2)</sup> Nas classificações ela altera parâmetros operacionais importantes, como exemplo temos a hidrocilonagem, em que o diâmetro de corte das partículas é modificado e as espirais, onde a modificação é na velocidade de sedimentação. Já nas operações de concentração a densidade influencia o tempo de residência na flotação, a recuperação metalúrgica na separação magnética, entre outros. Além disso, em operações de bombeamento deve ser levada em conta a variável para evitar a deposição de material.

Adicionalmente, medições de densidade são importantes para fechamento de balanços de massas e contabilização de produção. Várias usinas utilizam densímetros juntamente com medidores de vazão para determinação de fluxos de massa em pontos estratégicos que possibilitem o fechamento desse balanço.

O objetivo do presente trabalho é propor um método de análise densidade com base na realização uma revisão bibliográfica a respeito importância da densidade das polpas de minérios em processos e dos analisadores utilizados atualmente.

## 2 A INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DE POLPAS EM PROCESSOS MINERAIS

Embora não seja um fator crucial para a qualidade do produto, a densidade pode alterar drasticamente a eficiência das operações. Entendendo a sua influência nos processos é possível usá-la como variável de controle levando a maior estabilidade e eficiência nas plantas. A seguir são explicitados os modos de atuações da densidade em diversas operações.

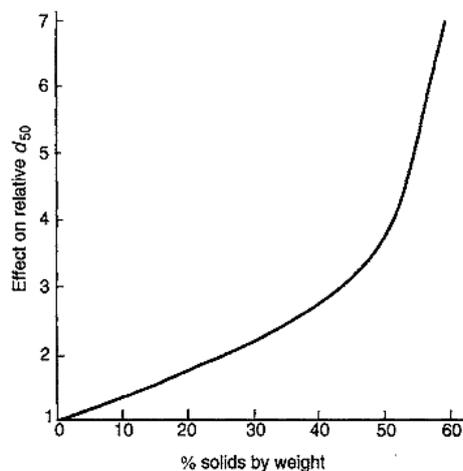
Na moagem, se a densidade da polpa é baixa, os finos serão carregados diminuindo o tempo de residência total do moinho, que resulta em uma moagem mais grossa. Por outro lado, aumentar a densidade tornará a polpa mais viscosa e as bolas são revestidas por uma camada de polpa, o que diminui a eficiência de cominuição.<sup>(3)</sup>

Em espirais classificadoras a densidade determina a taxa de sedimentação de partículas. Sua diminuição eleva a sedimentação livre permitindo as partículas mais finas depositarem-se sem a influência do fluxo horizontal. Em situações em que são requeridas separações mais finas a densidade da polpa no *overflow* deve ser mantida acima de um valor conhecido como crítico de diluição.

Relativo à separação gravítica, deve ser ressaltada a influência da propriedade em estudo em jiques e mesas gravimétricas. Nestes, o processo de separação é baseado na aceleração diferencial de partículas sólidas em meio fluido. Quanto maior a diferença de densidade entre os minerais a serem separados e quanto maior a densidade da polpa, maior será a eficiência da operação. Além disso, a densidade da polpa deve ser monitorada, uma vez que muito alta pode comprometer o funcionamento do equipamento.<sup>(4)</sup>

Existem operações cujo critério de desempenho mais importante é a densidade, por exemplo, no processo de espessamento. Neste, as partículas em suspensão na polpa podem sedimentar segundo três regimes: clarificação, sedimentação por zona e compressão, que são governados pela densidade e pela tendência de agregação das partículas.<sup>(5)</sup> Sabe-se que se a densidade de alimentação do equipamento estiver muito baixa a sedimentação ocorre em uma escala muito pequena. Então, a filosofia de controle geralmente é baseada nas densidades dos fluxos envolvidos.

Também é conhecido que na hidrociclonação o efeito do aumento da densidade de polpa de alimentação é complexo visto que a viscosidade efetiva da polpa e o grau de sedimentação forçada é aumentado dentro do equipamento. A eficiência da separação diminui com aumento da densidade da polpa e aumenta o ponto de corte devido a maior resistência ao movimento rotativo dentro do ciclone, reduzindo a queda de pressão efetiva. Assim, se o objetivo for uma separação em tamanhos mais finos ela só poderá ser alcançada com alimentações de baixo teor de sólidos e grandes quedas de pressão. A Figura 1 demonstra o efeito da porcentagem de sólidos, que pode ser obtida através da densidade da polpa, no corte obtido pelo hidrociclone.<sup>(4)</sup>



**Figura 1.** Efeito da porcentagem de sólidos no corte do hidrociclone.

Na flotação, a densidade é uma variável de importante monitoramento, por sua influência direta em várias etapas internas da operação. O tempo de residência, fator que afeta tanto o teor quanto a recuperação do teor flotado, depende diretamente da densidade da polpa. A manipulação da densidade da polpa pode diminuir perdas, dado sua relação com o processo de adesão,<sup>(6)</sup> e manter uma boa estabilidade para a camada de espuma, através do aumento da densidade, que permite a transferência laminar na interface polpa-espuma.<sup>(7)</sup>

Outra operação de concentração que pode ser incluída no estudo é a separação magnética, que tem a eficiência aumentada em determinados intervalos de densidades de polpa. Isso pode ser explicado pelo fato de que a separação depende

da aderência do material na área superficial magnética do equipamento. Se a polpa estiver muito densa a camada de partículas fica muito grossa e muitas partículas magnéticas não terão atração suficiente para ficarem retidas, diminuindo a recuperação metalúrgica. Um controle baseado nestes conceitos pode ser interessante e de simples execução.

O acompanhamento da densidade é importante no transporte de polpas, pois a densidade influencia na vazão de uma bomba com velocidade de rotação constante e também a velocidade crítica de deposição varia com a densidade. Com isso é importante ter dados de velocidade de escoamento e densidade em pontos críticos para deposição. Na Figura 2 pode ver visualizado um exemplo de aumento da velocidade de deposição com o aumento da densidade da polpa.<sup>(8)</sup>

### Slurry Density vs Deposition Velocity

(29" Id line, fines fraction = 20%, D50 = 200 micron  
SRC Pipeflow programme)

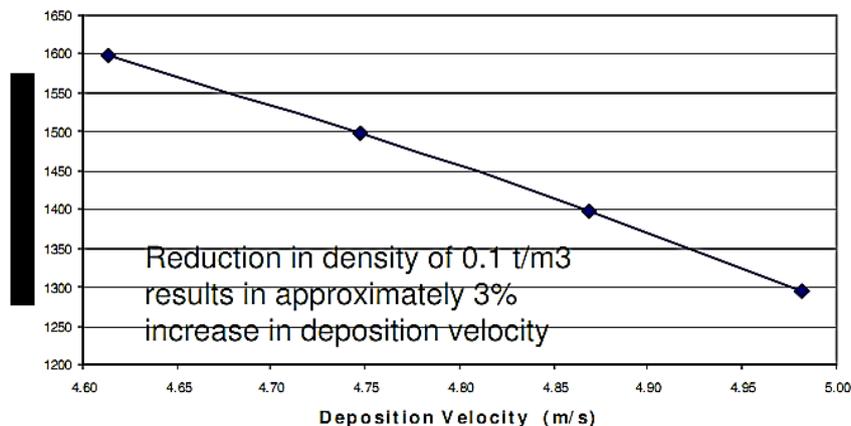


Figura 2. Variação da velocidade de deposição com a densidade da polpa em um bombeamento.

Como se pode observar o controle da densidade da polpa é um fator que pode tornar diversas operações mais eficientes e com isso aumentar a produtividade e reduzir gastos.

### 3 ANALISADORES DE DENSIDADE

Observada a vasta importância da densidade de polpas em usinas de beneficiamento, é clara a necessidade de obter medidas confiáveis dessa propriedade. Cabe então a indagação a respeito do atendimento desta demanda por parte do mercado de analisadores de densidade. Em ato contínuo, são apresentados os produtos disponíveis baseados em diferentes teorias como medidores nucleares, refratômetros, medidores mássicos de efeito Coriolis, medição com diapasão vibrante, areômetros, análise de laboratório e medidor capacitivo.

Os medidores nucleares realizam análises autômatas de forma contínua utilizando uma fonte radioativa. Os raios gama produzidos por uma fonte atravessam as paredes da tubulação e a polpa com intensidade que é inversamente proporcional à densidade da polpa. Os raios são detectados por uma câmara de ionização de alta eficiência e o sinal de saída elétrico é registrado diretamente como a densidade da polpa. A grande vantagem deste método é a elevada precisão e a baixa frequência de manutenção. Suas desvantagens estão associadas ao uso de fontes emissoras de radiação, que implica em riscos de acidentes e danos ao meio ambiente,

trabalhadores e comunidades vizinhas. O uso desse tipo de medidor resulta em elevados gastos em treinamento, especialização e qualificação dos profissionais em radioproteção, além de implantação de diversas normas corporativas sobre o atendimento a acidente com fonte radioativa.<sup>(9)</sup>

Outro analisador importante é o refratômetro, que tem como princípio de funcionamento a emissão de luz por um LED que incide sobre uma interface prisma-líquido através de uma série de ângulos. Os ângulos incidentes que forem totalmente refletidos sensibilizarão um receptor que produzirá um sinal em forma de corrente ou tensão. A sensibilização do receptor é proporcional à densidade.<sup>(10)</sup> Sua vantagem é a simplicidade do método e facilidade de calibração. As desvantagens são a imprecisão para medição de fluxos com altas porcentagens de sólidos e a dificuldade de manter uma superfície translúcida (prisma) que não se contamine com os sólidos provenientes de medidas posteriores.

O densímetro de massa constante, apesar de muito antigo, é de fácil utilização. O equipamento é posto a flutuar em um líquido e permite-se ler no ponto de afloramento a densidade absoluta do fluido. O areômetro é um instrumento que funciona igualmente, mas que ao invés da densidade fornece um número que se relaciona à densidade. O areômetro é de simples uso e manutenção, mas não possui boa precisão e pode também ter problemas com deposição.<sup>(11)</sup>

Há disponíveis no mercado instrumentos que se utilizam de técnicas interessantes como a vibração de um diapásão. Neste a frequência natural é determinada pela sua forma e material. Se o diapásão é imerso em um líquido, a frequência de vibração é determinada pela densidade do líquido. O medidor utiliza esta propriedade para traduzir o sinal de frequência em densidade. Analisadores nos quais o diapásão é imerso na polpa apresentam problemas relacionados à deposição de material, que compromete a validade das medidas. Medidores nos quais o movimento é transmitido ao diapásão por meio de um elemento piezo-elétrico imerso têm faixa de medição pequena de  $0,5 \text{ g/cm}^3$  a  $2,0 \text{ g/cm}^3$ .<sup>(12)</sup>

Assim como o medidor de diapásão os analisadores capacitivos utilizam-se outro interessante princípio que é o do diferencial de pressão hidrostático. A densidade pode ser obtida através de uma sonda de imersão e dois sensores de pressão integrados em uma única unidade. O transmissor de densidade e concentração capacitivo mede de forma contínua e precisa a densidade e a concentração de polpas.<sup>(13)</sup> Esses analisadores não são capazes, entretanto, de medir fluxos em calha e são muito suscetíveis a deposição de sólidos.

Medidores mássicos podem ser usados para determinação de densidade através da relação entre massa e densidade como descrito na Equação 1. Desta forma deve-se ter uma medida adicional de volume.

Um exemplo de medidor de densidade através da massa tem como princípio de funcionamento físico o Efeito, ou Força, Coriolis. O fluido quando passa através do medidor possui uma velocidade angular gerada pela excitação dos tubos de medição através de uma bobina de excitação. Essa velocidade angular acelera o fluido aumentando sua velocidade periférica. A força gerada por esse aumento de velocidade periférica é chamada Força Coriolis. Os tubos de medição são deformados por essa força e essa deformação é captada por sensores. Dessa forma, a diferença dos ângulos de fase gerada nos tubos quando o fluido escoar é proporcional a quantidade de massa que passa pelos tubos. O instrumento é indicado para controles precisos de processo, porém, em processos minerais, o uso não é aconselhável visto que a deposição de material é pronunciada nos tubos de medição, conseqüentemente, a medição perde a confiabilidade rapidamente.<sup>(14)</sup>

Fatores como riscos à segurança industrial do analisador de densidade mais eficiente<sup>(9)</sup> e a impossibilidade de medições diretas de fluxos não pressurizados e fluxos de calha por analisadores convencionais, levaram a uma lacuna a ser preenchida no mercado em questão de eficiência e disponibilidade de medidores de densidade. Porém, com a tecnologia de automatização disponível hoje, é possível projetar um analisador mais simples e que tenha o grau de acurácia de analisadores nucleares e ainda seja capaz de medir fluxos em calha diretamente. Segundo Napier-Munn e Wills,<sup>(4)</sup> o método mais conhecido de determinação de densidade é a pesagem de pequenas amostras que se encontram dentro de um volume conhecido. Este é o princípio utilizado da conhecida balança Marcy (Figura 3). Com base nesses conceitos foi projetado um analisador que reunisse a praticidade e a exatidão das balanças Marcy e a capacidade de gerar medidas continuamente, além da possibilidade de receber várias amostras de diversos pontos da usina.



**Figura 3.** Balança Marcy.

Basicamente, o equipamento projetado possui o seguinte funcionamento:

- uma pequena porção fluxo é encaminhada até o amostrador, que seleciona parte do fluxo para ser enviada ao analisador;
- essa parte é recebida por um multiplexador onde é feito o gerenciamento de qual amostra será analisada e qual será descartada; e
- se for aceita para análise, a amostra escoo para um recipiente com volume conhecido e uma balança mede seu peso. Os dados de massa e volume são convertidos em densidade dentro do sistema e este valor é disponibilizado para controle do processo. O recipiente é então esvaziado e passa por um processo de limpeza estando pronto para começar outra análise.

#### **4 OPTDENSITY<sup>®</sup>**

O OptDensity<sup>®</sup> foi desenvolvido com base em uma técnica consolidada e já empregada em várias indústrias. O projeto prevê a obtenção de medidas em intervalos de tempo de 5 a 10 minutos. É um sistema de medição de densidade de múltiplos fluxos composto, principalmente, de amostrador, multiplexador, sistema de pesagem e medição de nível que podem ser visualizados na Figura 4.

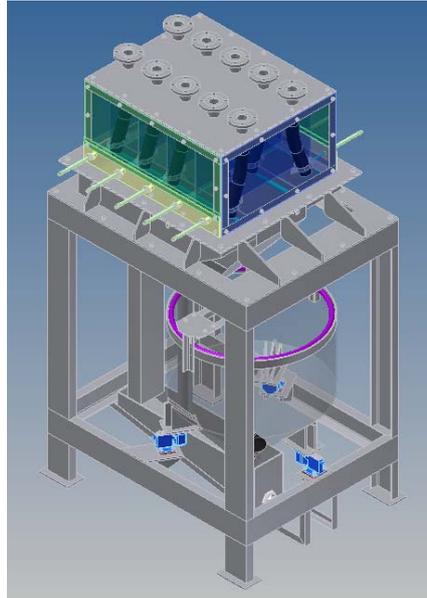


Figura 4 – OptDensity<sup>®</sup>.

As etapas de funcionamento do sistema consistem em:

- coleta da amostra no amostrador primário e envio ao multiplexador;
- no multiplexador a amostra poderá ter dois destinos, tanque de medição de densidade ou descarte;
- no tanque será feita a pesagem da amostra e determinação do volume para obtenção da densidade; e
- descarte da amostra.

O amostrador (Figura 5) foi projetado para operar em condições severas, suportando poeira, umidade e vibração. Consiste em um amostrador primário do tipo Vezin com acionamento pneumático. A amostra é desviada com uma faca acionada por um cilindro pneumático, que opera mesmo com porcentagem de sólidos elevada.

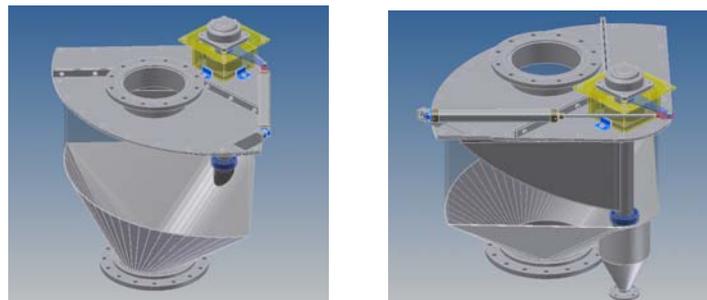


Figura 5. Amostrador primário.

O sistema multiplexador é capaz de gerenciar de 1 a 10 fluxos de amostras, podendo selecionar um fluxo para medição ou descarte. Acoplado logo abaixo do multiplexador, o sistema de medição é responsável por analisar cada fluxo individualmente. Esse consiste de uma caixa cônica contendo células de carga e um medidor de nível ultrassônico para determinação das medidas de peso e volume. A massa é medida por um conjunto contendo 3 células de carga. Todo o gerenciamento das amostras, fluxos, pesagem, medição do volume e medida da densidade é realizado por uma central de processamento localizada em um painel.

Controlado por um sensor de nível a laser, o tanque enche e é pesado por células de carga instaladas na base. Após a análise da densidade é acionada a válvula dardo, liberando o material já analisado. Logo após a liberação do material é ligado um fluxo de água para limpeza do equipamento para a próxima análise.

A calibração é feita amostrando-se somente água e ajustando as células de carga para gerar um peso correspondente a densidade real da água à temperatura ambiente. No sistema é possível ajustar os critérios de estabilização das células de carga, os critérios de descarte, a ordem de análises, o número de amostras e a frequência de análise desejada para cada ponto.

A manutenção é esporádica, apenas para verificação da existência de alguma deposição que eventualmente não foi removida pelo sistema e da calibração das células de carga.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da revisão bibliográfica a respeito das aplicações e da disponibilidade de medidores de densidade podemos concluir que as operações de transporte de minérios, moagem, hidrociclonagem, espessamento, jigagem, flotação e separação magnética podem ser controlados com maior eficiência através da obtenção contínua de dados de densidade. Esses dados também podem proporcionar melhores condições para o fechamento de balanços de massa.

Além disso, foi possível relacionar os medidores disponíveis no mercado, produzindo a Tabela 1 que classifica as características de cada um.

**Tabela 1.** Avaliação de características de analisadores considerando o uso em usinas de mineração

Analisadores	Exatidão	Repetitividade	Intervalo de medição	Manutenção	Custo
NUCLEAR	Alta	Alta	Amplo	Complexa	Alto
REFRATÔMETRO	Baixa	Baixa	Médio	Mediana	Mediano
AREÔMETRO	Baixa	Baixa	Amplo	Simples	Baixo
DIAPASÃO VIBRANTE	Alta	Alta	Restrito	Mediana	Mediano
CAPACITIVO	Alta	Alta	Amplo	Mediana	Alto
EFEITO CORIOLIS	Mediana	Mediana	Amplo	Mediana	Mediano

Com base nas características positivas e negativas dos analisadores contínuos, foi desenvolvido o projeto de um medidor que possui elevada exatidão, sendo também barato e seguro.

O projeto representa um avanço no cenário dos analisadores de densidade visto que possibilita tanto a análise direta de fluxos de calha quanto a realização de medidas múltiplas em um só equipamento e também a união da exatidão das medidas com o baixo custo e a segurança de sua utilização.

## REFERÊNCIAS

- 1 PIRES, J. N. *Automação Industrial*. 3ª edição, Editora Lidel, 2002.
- 2 TUCKER, P. *The Influence of Pulp Density on the Selective Grinding of Ores*. International Journal of Mineral Processing. v. 12, i. 4, April 1984, p. 273-284.
- 3 CLERMONT, B.; LUX, J. *The Influence of Mill Speed and Pulp Density on the Grinding Efficiency for Secondary Stage Grinding*. International Platinum Conference 'Platinum Adding Value', The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.
- 4 NAPIER-MUNN, T.; WILLS, B. *Mineral Processing Technology - an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*, 7ª edição. 2006.
- 5 GOMES, A. B. M., *Relatório de Laboratório – dimensionamento da área unitária de um espessador*. 2010. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- 6 MAZON, R. *Efeito do Tempo de Residência sobre Recuperação Metálica da Flotação Colunar Reversa de Minério de Ferro*. 2006. Dissertação – UFOP.
- 7 YOVANOVIC, A. *Fundamentos da Flotação – novo fundamento teórico dos processos minerais*; Engenharia da concentração de massa por flotação; Volume 1.; U. del Norte, Chile, 1973.
- 8 SHARPE, J. A. *How to Specify the Operating Conditions for a Slurry*. Pump. J.A.S. Solutions Ltd. Calgary Pump Symposium, 2005.
- 9 GANDAR, L. A; SALLES, C.G.; DA SILVA E. D. e TORIBIO, N. M. *Otimização dos Trabalhos Envolvendo Radiação Industrial*. Encontro Internacional sobre Radioproteção Industrial; São Paulo, SP (Brasil); 18-20 Mar 1996.
- 10 BRASEQ – Brasileira de Equipamentos LTDA. Refratômetros para Processo - The Electron Machine Corporation. Disponível em: <http://www.braseq.com.br/site/pdf/emc.pdf> Data de acesso: 23/05/2011.
- 11 FEIRA DE CIÊNCIAS – *Fluidoestática*. Disponível em: [http://www.feiradeciencias.com.br/sala07/07\\_T01\\_04.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala07/07_T01_04.asp) Data de acesso: 23/05/2011.
- 12 YOKOGAWA. Density analyser. Disponível em: [http://www.yokogawa.com/us/is/downloads/pdf/analytical/Density/BU/DM8\\_BU\\_10.pdf](http://www.yokogawa.com/us/is/downloads/pdf/analytical/Density/BU/DM8_BU_10.pdf). Data de acesso: 10/05/2011.
- 13 ALVES, E. O. *Medição Contínua de Densidade e Concentração em Processos Industriais*. Mecatrônica Atual. Jan/Fev 2010.
- 14 WIKIBOOKS - *Mecânica dos fluidos/Medidores por efeito Coriolis*. Disponível em: [http://pt.wikibooks.org/wiki/Mec%C3%A2nica\\_dos\\_fluidos/Medidores\\_por\\_efeito\\_Coriolis](http://pt.wikibooks.org/wiki/Mec%C3%A2nica_dos_fluidos/Medidores_por_efeito_Coriolis) Data de acesso: 23/05/2011.